

## PROCESAMIENTO SEMI-SÓLIDO DE LA ALEACIÓN A-356 MEDIANTE NRC

### Semisolid processing of the alloy A-356 by NRC

#### RESUMEN

Las diferentes rutas para el procesamiento de metales en estado semi-sólido, o tecnologías de Rheocasting, se han multiplicado hoy día. Una de tales técnicas, conocida como NRC (NRC<sup>TM</sup>: New Rheocasting Process), ha sido usada aquí para investigar mecanismos adicionales que permitan la obtención de una fina morfología globular en la aleación A-356. Los resultados del análisis morfológico llevado a cabo mediante microscopía SEM, permiten revelar una morfología con granos de tipo globular, característica del procesamiento semi-sólido. La dureza promedio del material estuvo alrededor de 55HB y fue aumentada hasta 110HB luego de un tratamiento en solución.

**PALABRAS CLAVES:** Aleación A-356, enfriamiento controlado, metalurgia semi-sólida, propiedades mecánicas, reocolado

#### ABSTRACT

*Nowadays the different routes for the processing of semisolid metals, or rheocasting technologies have been multiplied. One of these techniques, known as New Rheocasting Process (NRC<sup>TM</sup>: New Rheocasting Process), has been used to investigate additional mechanisms that allow a fine globular morphology in the alloy A-356. The SEM analysis shows globular grain morphology. The hardness of the material was already 55HB, and it was enhanced to 110HB after a solution treatment.*

**KEYWORDS:** Alloy A-356, controlled cooling, semisolid metallurgy, mechanical properties, rheocasting

#### MARCO VALENCIA

Ingeniero Metalúrgico, M. Sc.

Profesor asociado

GPC: Grupo de productividad hacia la competitividad  
Escuela de ingeniería de Antioquia  
pfmaval@eia.edu.co

#### JAVIER COLETO FIAÑO

Ph.D.

Head of Aeronautic Division

Aerospace Business Unit

Fundación Inasmet-Tecnalia

P Mikeletegi, 2.

E-20009 San Sebastian

Spain

jcoletto@inasmet.es

#### VLADIMIR MARTINEZ

Ingeniero Mecánico, M.Sc. Ph.D.

Profesor asociado

GINUMA: Grupo de investigación sobre nuevos materiales

Universidad Pontificia Bolivariana

hader.martinez@upb.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN

La denominada Metalurgia Semisólida, comprende un conjunto de procesos que combinan las ventajas de los métodos tradicionales de forja y fundición. Sus inicios se remontan a los estudios que sobre aleaciones Pb-Sn realizó Spencer en el MIT en el inicio de los años 70's [1]. En su investigación, Spencer mostró que el cizallamiento de una aleación metálica durante su solidificación, corrige la formación del entramado dendrítico por una morfología globular. Como resultado, el fluido resultante parcialmente solidificado, posee una baja viscosidad aparente, alta fluidez y un comportamiento tixotrópico, resultando ideal para procesos de fundición incluso a fracciones de sólidos tan altas como 0.6 [2].

Estas nuevas técnicas de fundición han permitido la producción de formas compactas de gran integridad, excelente combinación de resistencia y ductilidad, que son además requisitos para el diseño de componentes ligeros, con ahorros en peso de alrededor del 50% comparativamente con partes en acero [3].

De otra parte, el término Rheocasting, acuñado por primera vez por Flemings et al. [2, 4] en el MIT, se utiliza hoy día para referirse a los diferentes procesos con los cuales se obtienen morfologías globulares. El Thixocasting a su vez, es un término debido a Joly y Mehrabian [5] que comprende el recalentamiento hasta el intervalo semi-sólido de lingotes obtenidos por Rheocasting y que son luego transformados en piezas finales mediante procesos termomecánicos [6].

Hoy día, las tecnologías más simples de Rheocasting incluyen la Agitación Electromagnética (EMS: Electromagnetical Stirring), y la Agitación Mecánica (MSC: Mechanical Stirring Casting), las cuales provocan un alto flujo convectivo en el material que se procesa.

Otros procesos son la Fundición en Spray (SP: Spray Casting) y distintas tecnologías fundamentadas en el control de la solidificación y la nucleación. Dentro de éstas se cuentan la Deformación Inducida con Fusión Activada (SIMA: Strain Induced Melt Activated Process) y el Nuevo Rheocasting (NRC<sup>TM</sup>: New Rheocasting Process), como tecnologías que poseen cierta importancia comercial hoy en día.

Otras tecnologías nacientes son el Refinamiento de Lingotes (GRB: Grain Refined Billet), el denominado Rheocasting semi-sólido (SSRTM: Semi-solid Rheocasting), la Reoconversión Continua (CRP: Continuous Rheoconversion), Fundición sub-liquidus (SLCTM: Sub-Liquidus Casting) y la Extracción Controlada de Entalpía (SEDD: Swirl Enthalpy Equilibration Device). Los detalles de estos últimos

procesos se hallan ampliamente documentados en los trabajos de Apelian et al [7] y Jorstad [8]. La Figura 1 ha sido preparada para mostrar esquemáticamente la situación de estas tecnologías en relación a las operaciones secundarias que permiten la obtención de piezas finales.

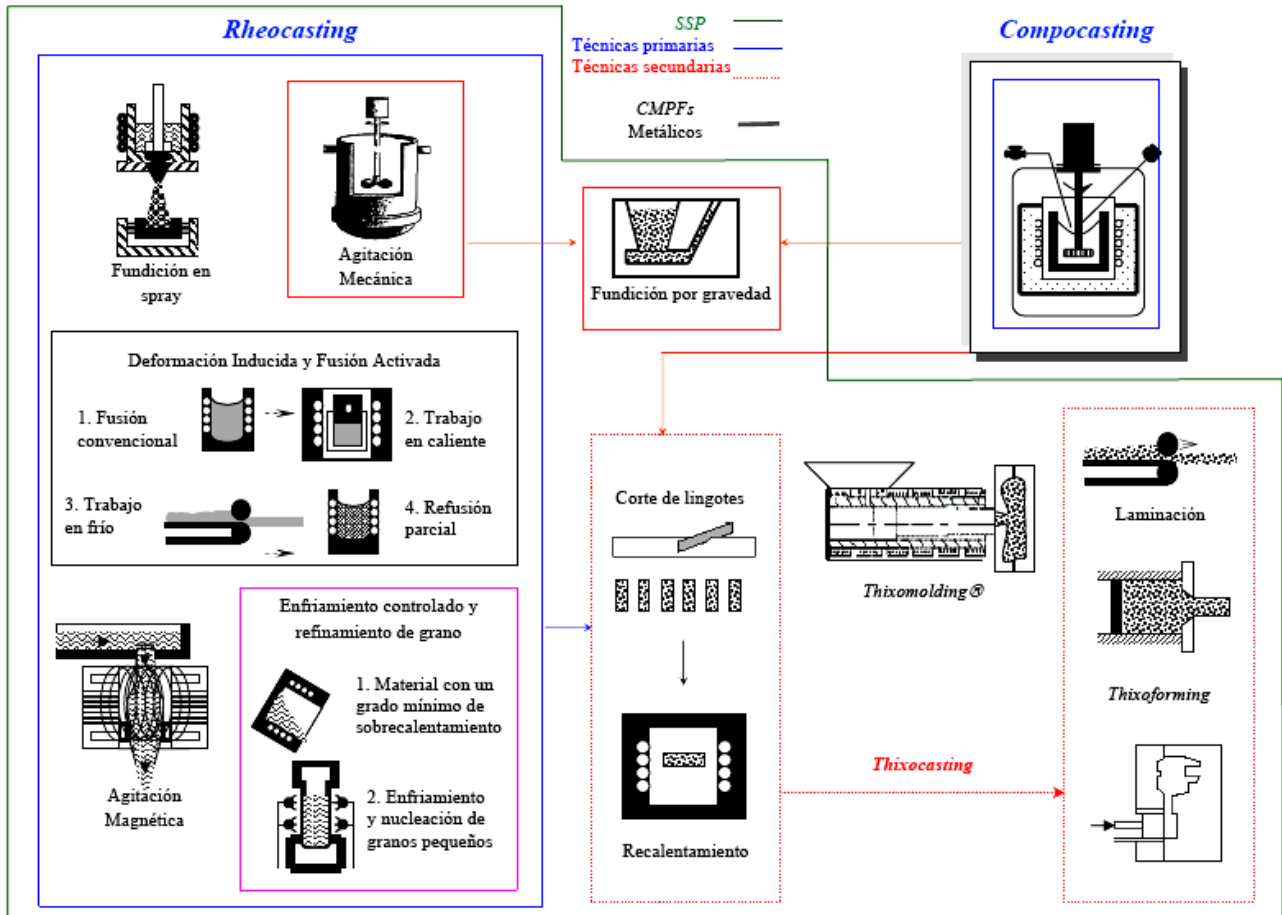


Figura 1. Metalurgia Semisólida. Semisolid process (SSP), Composites metálicos particulados fundidos (CMPFs), compcasting: Técnica para la fabricación de CMPFs en estado semisólido mediante agitación mecánica, Thixomolding: técnica secundaria para aleaciones de Mg (Tomado de la ref. [9])

En este trabajo se han investigado mecanismos adicionales que permitan la obtención de una fina morfología globular en la aleación A-356 mediante NRC. Dentro de las tecnologías que poseen una cierta importancia comercial, el NRC es un proceso patentado por la compañía japonesa UBE [10]. El mismo es un proceso de enfriamiento controlado y refinamiento de grano en el cual el material es enfriado desde el estado líquido hasta una temperatura en el intervalo semi-sólido, muy cercana a liquidus [11].

El enfriamiento controlado, el posterior sostenimiento por un corto periodo de tiempo en el intervalo semi-

sólido y el uso o no de elementos afinadores y refinadores de grano, provocan en conjunto la nucleación de muchos granos pequeños, permitiendo que los mismos desarrollen una morfología globular [12].

Como se describe en la patente de la UBE, un aspecto central en el proceso NRC es el enfriamiento controlado, que además se relaciona con el llenado laminar del crisol, para la fundición relativamente fría. Este tipo de llenado puede ser conseguido controlando el vertido de la fundición a lo largo de la pared de un crisol inclinado. Posteriormente, la pasta resultante puede ser trasladada a

un equipo de conformación para la fabricación de una pieza (Figura 1).

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La aleación usada en este estudio contiene aproximadamente un 7% de silicio para una buena colabilidad. El magnesio permite la obtención de compuestos intermetálicos después de un tratamiento térmico y tiene gran influencia sobre las características mecánicas; de suerte que permite incrementar la resistencia máxima, el límite elástico y la rigidez. La composición química detallada se lista en la Tabla 1.

Al	Mg	Si	Cu	Ti	Pb	Sn	Ni
Bal.	0.32	6.82	.022	.100	.013	.042	.006

Tabla 1. Composición química de la aleación A-356

### 2.1. NRC

El procesamiento por NRC de la aleación A-356 fue realizado como se describe a continuación:

-Inicialmente fue fundida la aleación de aluminio en un horno de inducción. La temperatura máxima alcanzada en esta etapa es de 715°C. Como es común en las

operaciones de fundición, se debe proceder a desgasificar el sistema. En este caso, se introdujo una lanza de grafito para pasar argón durante 15 minutos.

Para el caso que aquí fue de interés, la aleación es susceptible de formar una estructura acicular en su solidificación; formando agujas de silicio desordenadas. Esta estructura es muy frágil y decreta fácilmente las propiedades mecánicas. El objeto de la modificación es restringir la normal nucleación y el crecimiento de las agujas de silicio durante la solidificación. Por tal motivo, en una etapa paralela, se procedió a adicionar Sr como modificador (Figura 2a).

-El porcentaje de modificador adicionado normalmente está comprendido entre 300 y 600 ppm. De acuerdo a lo obtenido en las pruebas prototipo se adicionaron 450 ppm de Sr. Para evaluar el correcto modificado se realizaron pruebas metalográficas manteniendo una estructura del tipo 4 según recomendaciones AFS; es decir ausencia de estructura laminar. Esta modificación se realizó a una temperatura de 715°C, antes del desgasificado, ya que el Sr por tener una tensión superficial menor a la del aluminio absorbe hidrogeno aumentando las características mecánicas por redistribución de los elementos aleantes.



Figura 2. Etapas del reocalado de la aleación A-356 por NRC: (a) Fusión de la aleación en un horno de inducción, (b) Colada en un crisol de acero precalentado, (c) Enfriamiento controlado (d) Lingote de aleación reocalada (corte con un cuchillo)

-Posteriormente se procedió a adicionar un agente afinador. La afinación es una operación que permite la segregación de puntos de nucleación en el seno del aluminio para conseguir una estructura fina. Por ello el afinado es recomendable realizarlo lo más tarde posible, que es cuando mayor efecto presenta.

En este estudio se utilizó Ti como afinador. Es además recomendable que la aleación tenga un bajo contenido en Ti, para poder así adicionar en la fundición el porcentaje adicional y asegurar el mejor efecto posible. El Ti fue adicionado a los 720 °C, con el fin de mejorar la ductilidad, la colabilidad, las propiedades mecánicas (Alargamiento) y reducir el agrietamiento.

La adición de Ti en este caso fue de máximo un 0.2%, ya que por encima de este valor aparecen compuestos intermetálicos duros, que mas tarde pueden perjudicar el mecanizado de piezas. Por lo tanto, como la aleación posee 0.1% de Ti, se adicionó 0.1%wt. para la corrección de la composición química.

-Posterior a la adición de los elementos aleantes, la temperatura se lleva hasta los 640°C, en donde se realiza el trasvase a un crisol de acero al carbono (Figura 2b). Para proporcionar resistencia al desgaste y al choque térmico, el crisol fue recubierto previamente con nitruro de boro [13]. En este apartado, el crisol de acero está previamente precalentado a 180°C (Figura 2b). La inclinación de mismo es de 45°, procurando que el vaciado se haga por las paredes, intentando en todo momento garantizar un flujo laminar.

-Luego de vaciar la colada, se procede a enfriarla lentamente, usando para ello aire comprimido de 0.3 a 0.4Bar. (Figura 2c). El enfriamiento de la aleación se asegura hasta alcanzar 589°C, temperatura en la que se procede a retirar el lingote fundido del crisol de acero.

-A continuación, se extrae el lingote de aleación reocolada. Como se observa en la Figura 2d, la plasticidad del material es muy elevada gracias a la morfología de grano globular que se presenta. Esta es una de las características más sobresalientes de los metales procesados en estado semi-sólido. Los parámetros más importantes para el procesamiento por NRC de la aleación A-356, han sido resumidos en la Tabla 2.

Parámetro	Valor
Temperatura de colada al crisol de acero	640°C
Temperatura de adición de Sr (300 - 600 ppm)	715°C
Temperatura de adición de Ti (máx. 0.2 wt %, Para la aleación particular se adiciona solo un 0.05 wt %, ya que la misma posee como base un 0.15wt%)	720°C
Temperatura de precalentamiento del crisol de acero (capacidad 3 Kg)	180°C

Tabla 2. Parámetros de relevancia para el NRC de la aleación A-356

## Morfología resultante

La microfotografía de la Figura 3 muestra la morfología obtenida para la aleación A-356 luego del procesamiento por NRC. Se observa una microestructura de grano de tipo globular casi en su totalidad, además de algunas estructuras tipo roseta. La dureza promedio del material estuvo alrededor de 55HB.

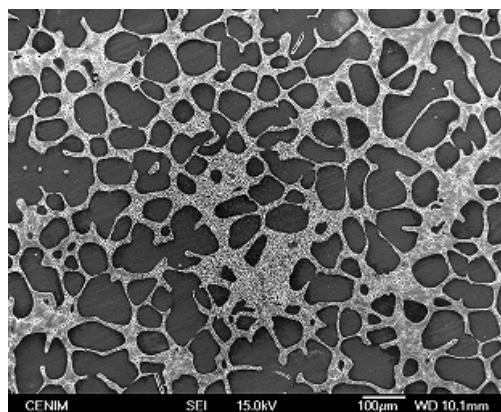


Figura 3. Micrografía SEM de aleación de aluminio A-356 sin tratamiento térmico

## 2.2. Tratamiento térmico

De cara al mejoramiento en propiedades mecánicas de la aleación reocolada. Se procedió con un tratamiento de tipo T6. Inicialmente se realizó un tratamiento en solución a 548°C, durante 8 horas, seguido de un temple en agua. En segundo lugar, un envejecimiento artificial ejecutado a una temperatura de 170°C, durante 6 horas y enfriado en aire.

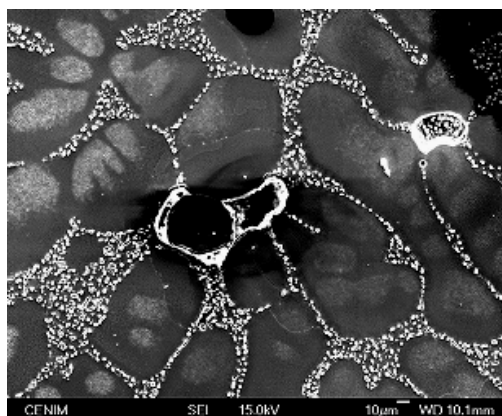


Figura 4. Micrografía SEM de aleación de aluminio A-356 con tratamiento térmico

La Figura 4 es la microestructura de la aleación luego del tratamiento térmico. Nótese dentro de los granos primarios la formación de precipitaciones o compuestos

intermetálicos. Estos incrementaron la dureza de la aleación hasta 110HB. También se observan algunos poros en los límites de grano, lo que no representa problema alguno, ya que estos se pueden eliminar mediante operaciones secundarias de proceso (Figura 1) [9].

### 3. COMPORTAMIENTO MECÁNICO

La Tabla 3, lista las propiedades mecánicas iniciales sin tratamiento térmico, mientras que la Tabla 4 lista las propiedades finales con tratamiento térmico para la aleación reocolada por NRC.

Propiedad	A-356 con adición Sr-Ti
Dureza	55 HB
Esfuerzo último	180 MPa

Tabla 2. Propiedades mecánicas sin tratamiento térmico

Propiedad	A-356 con adición Sr-Ti
Dureza	110 HB
Esfuerzo último	245 MPa

Tabla 3. Propiedades mecánicas con tratamiento térmico

### 4. CONCLUSIONES

Los resultados del procesamiento por NRC de la aleación A.356, han mostrado que la incorporación de Sr y Ti como elementos modificadores y afinadores microestructurales, facilita la obtención de granos globulares, además de las condiciones especiales de enfriamiento controlado.

La aleación A-356 reocolada, presentó una alta plasticidad como consecuencia del procesamiento semi-sólido, lo cual resulta de gran utilidad para la implementación de procesos de conformación.

El tratamiento térmico por solución se realiza por un tiempo de 8 horas a una temperatura de 548°C y el de envejecimiento a una temperatura de 170°C y un tiempo de 6 horas. De esta manera la dureza de la aleación es incrementada desde 55 hasta 110HB.

### 5. REFERENCIAS

[1] Spencer D B. *Rheology of liquid-solid mixtures of lead-tin*. Tesis Sc.D. Massachusetts (USA):

Department of Metallurgy and Materials Science, Massachusetts Institute of Technology, 1971.

- [2] Spencer D B, Mehrabian R, Flemings MC, "Rheological Behavior of Sn-15 Pct Pb in the Crystallization Range", *Metallurgical Transactions*, vol. 3, pp. 1925-1932, 1972.
- [3] H. Kaufmann, H. Wabusseg and P. J. Uggowitzer "Metallurgical and Processing Aspects of the NRC Semi-Solid Casting Technology", Leichtmetall-Kompetenzzentrum, LKR; A-4262 Ranshofen, Austria 2 Institut für Metallforschung, ETH Zürich; CH-8092 Zürich, Switzerland.
- [4] Flemings M C, Riek R G, Young K P, "Rheocasting Processes", *AFS International Cast Metals Journal*, vol. 1, 3, pp. 11-22. 1976
- [5] Joly P A, Mehrabian R. "The rheology of a partially solid alloy", *Journal of Materials Science*, vol. 11, 8, pp. 1393-1418. 1976.
- [6] Young K, Eisen P. "Semi-Solid Forming: the process and the path forward", *Metallurgical Science and Technology*, vol. 18, 2, pp. 11-15, 2000.
- [7] Apelian D, Jorstad J, de Figueredo A M. *Science and Technology of Semi Solid Metal Processing*, Rosemont, IL: North American Die Casting Association, 2001. p. 7-20.
- [8] Jorstand J L, "SSM Processes-An overview". En: Alexandrou A, Apelian D, Georgiou G, Jorstad J, Makhoulouf M, Pan Q, Garofoli C. (eds.), *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Limassol, (Chipre), University of Cyprus, Cyprus, 2004, p.1-10.
- [9] 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.
- [10] P. Giordano and G. Chiarmetta, "New rheocasting: a valid alternative to the traditional technologies for the production of automotive suspension parts" STAMPAL S.p.A.; Via Lombardia, Borgaro T.se (TO), 10071, Italy.
- [11] Haga Toshio, Kapranos P. *J. Mater. Proc. Tech. Vol.* 130-131, pp. 594-598, 2002.
- [12] Kaufmann H, Wabusseg H, Uggowitzer P J. "Metallurgical and Processing Aspects of the NRC Semi-Solid Casting Technology", *Aluminium*, vol. 76, pp. 69-75, 2000.
- [13] S. Kalpakjian and S. Schmid, *Manufactura Ingeniería y Tecnología*, 4th ed, Ed. New York: Prentice Hall, 2002, pp. 206-207.

### AGRADECIMIENTOS

H. V. Martínez y M. F. Valencia agradecen a Colciencias el financiamiento del proyecto No. 12100817302, del cual hizo parte este trabajo. El equipo de NRC pertenece a la fundación Inasmet-Tecnalia.