

# Respuesta integral

CARROS DE CARGA, HORNOS, CAMPANA DE ASPIRACIÓN,  
COLADAS... DE LA MÁS ALTA TECNOLOGÍA.



**ABP**  
INDUCTION

Líderes mundiales en hornos  
de media y alta potencia.



La mayor planta fusora  
por inducción del mundo,  
con una capacidad de  
65 ton y 42 MW de potencia.



**CON SERVICIO TÉCNICO LOCAL**

Representante exclusivo para España y Portugal:

Desde la máquina más simple, hasta la más compleja instalación llave en mano.

**EURO-EQUIP**

INGENIERÍA Y EQUIPOS PARA FUNDICIÓN

Poligono Industrial La Cruz - Parcela 4-5 - 48196 Lezama (SPAIN) • Tel.: (34) 944 761 244 - FAX: (34) 944 761 247 • E-mail: euroequip@euroequip.es

www.euroequip.es



Inductotherm Tri-Trak® Technology...

**INDUCTOTHERM**  
**ONDARLAN**  
An Inductotherm Group Company  
www.ondarlan.com

**INDUCTOTHERM GROUP** Leading Manufacturers of Melting, Thermal Processing & Production Systems for the Metals & Materials Industry Worldwide.

# Simulación del Proceso de Semisólidos Rheocasting (SSR<sup>®</sup>) en un componente de automoción con PROCAST

Por S. Menargues, M. T. Baile, M. Campillo, J. A. Picas y A. Forn

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica (CMEM),  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

## Resumen

La técnica Semi-Solid Rheocasting es una alternativa a los procesos de fundición tradicionales. La simulación numérica de estos métodos resulta muy útil para definir el proceso real. Se presenta un nuevo ensayo de campo para determinar parámetros tales como la temperatura, la velocidad, el llenado del molde y la solidificación. Las herramientas de simulación permiten comprender mejor los procesos, y de ese modo es posible predecir y eliminar los defectos potenciales antes de que ocurran. El componente objeto de este estudio es una cubierta de una pieza de automóvil elaborada con una aleación de aluminio de segunda fusión A380. El software utilizado para simular el proceso ha sido ProCAST de ESI Group. Las características de la microestructura se han analizado mediante microscopía óptica y electrónica. Todo ello ha procedido al desarrollo de un modelo basado en datos experimentales. Para el modelizado el estado semisólido se considera homogéneo, con propiedades thixotrópicas y su microestructura se define como un parámetro estructural. Se han comparado los resultados obtenidos con las pruebas reales.

## Introducción

Se ha aceptado que el proceso de fundición de metales en estado semisólido (SSM) tiene numerosas ventajas frente a otras técnicas de fundición. Dichas ventajas son, entre otras, la ausencia de turbulencias durante el llenado de la cavidad, la disminución de la contracción en la fundición, la inyección del

material a menor temperatura y el aumento de la vida útil de la pieza. En los últimos años ha crecido la introducción en el mercado de la producción de componentes de aluminio y magnesio, fabricados a partir de técnicas de fundición en estado semisólido. Hay varias razones para ello y a continuación se citan las más importantes [1]:

- Mayor reconocimiento del proceso como un proceso maduro y competitivo en su segmento de nicho de mercado.
- Garantía de que el control del proceso es adecuado y de que tiene como resultado componentes con propiedades mecánicas evaluadas.
- Reducción del coste de los procesos de fabricación mediante técnicas de fundición semisólida.
- Mayor conocimiento de los procesos de conformación semisólida.
- Utilización de herramientas de simulación para predecir el llenado de la cavidad y la solidificación.
- Esta técnica permite el uso de aleaciones de segunda fusión.

Uno de los procesos más importantes es el denominado Semi-Solid Rheocasting (SSR) [1].

En 2002, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, Massachusetts Institute of Technology) y la empresa IDRA Castings Machines S.r.l desarrollaron en Estados Unidos el proceso Semi-Solid Rheocasting process (SSR). El proceso emplea una máquina auxiliar para compactar y una máquina de



inyección convencional. Esta técnica reúne todas las ventajas de los procesos de fundición en estado semisólido y, al mismo tiempo, es muy competitiva en comparación con los procesos existentes [1, 2].

### Procedimiento experimental

La tecnología SSM consiste en la inyección a alta presión de un material en estado pastoso o semisólido obtenido mediante un agitador SSR (Figura 1<sup>a</sup>). El agitador enfría el metal y se inicia una pequeña fracción de solidificación [3].

El proceso SSM consta de los siguientes pasos [1]:

Paso n.º 1: El aluminio fundido se mantiene por encima del punto de fusión.

Paso n.º 2: Se introduce una varilla de refrigeración de grafito. La varilla se agita a gran velocidad y el caldo, al entrar en contacto con la varilla, se enfría a unos pocos grados por debajo de la temperatura liquidus. La varilla se mantiene en el caldo durante intervalos de tiempo muy cortos y la velocidad de la agitación no supera los 60 rpm. La parte más crítica del proceso está en la obtención del primer 1% en volumen de fracción sólida no dendrítica. Es necesario controlar rigurosamente la velocidad de enfriamiento ( $0.3-3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ) durante esta fase de agitación (Figura 1c).

Paso n.º 3: Después de un intervalo corto de agitación, el tubo de grafito se extrae y deja como resultado una masa pastosa con una pequeña fracción de contenido sólido (<20%) que se transfiere a la máquina de inyección.

El objeto de este estudio ha consistido en analizar el efecto de las condiciones de la inyección sobre la integridad de la estructura de la aleación de segunda fusión A380, obtenida a partir del proceso semisolid rheocasting (SSR). La composición de dicha aleación se muestra en la tabla 1.

El agitador necesitó entre ocho y diez segundos para generar un 1% de fracción sólida por cada 4 kilogramos de aleación A380 (Figura 2).

Al	Si	Cu	Fe	Mg	Mn
Base	8,7	3,0	0,7	0,15	0,25
Zn	Ti	Ni	Cr	Pb	
0,5	0,05	0,06	0,03	0,08	

Tabla 1: Composición de aleación A380 según los porcentajes en peso.

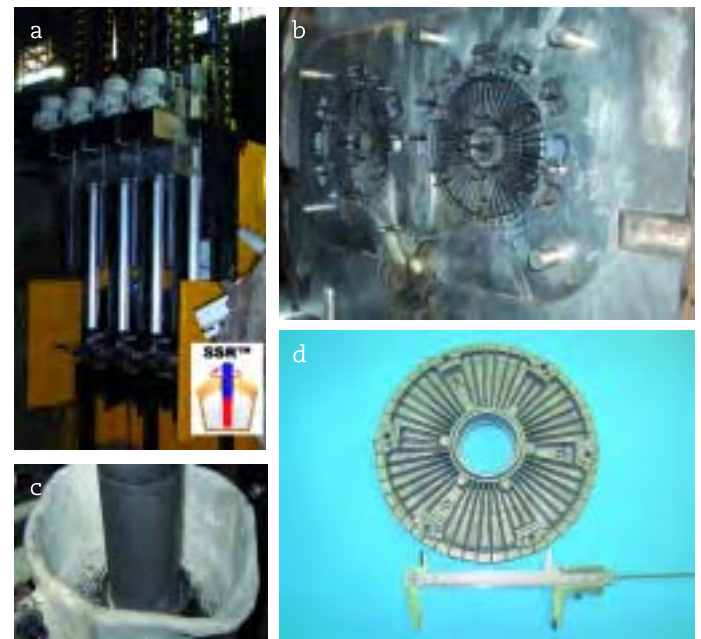


Figura 1: Fotografías de a) estación SSR, b) molde SSR, c) agitador de grafito y d) componentes de SSR.

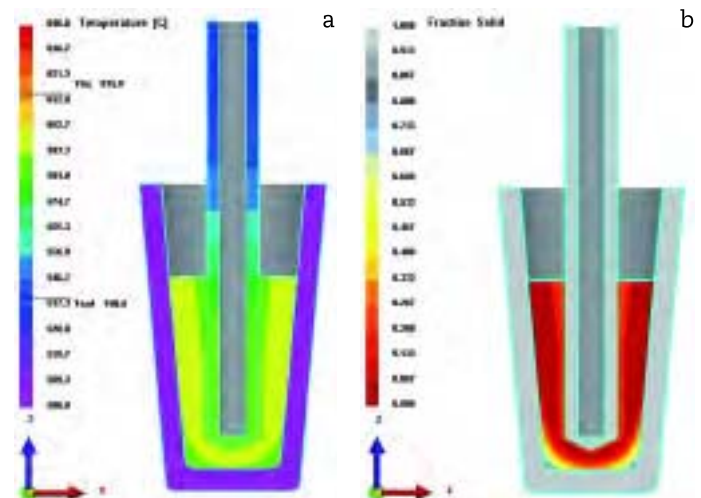


Figura 2: La simulación con ProCAST muestra a) el mapa de temperaturas del agitador después de ocho segundos de enfriamiento; b) el mapa de la fracción sólida generada tras ocho segundos de enfriamiento.

### Modelo semisólido utilizado en ProCAST

La inyección de materiales en estado semisólido se puede abordar por medio de dos modelos de aproximación diferentes: observar el comportamiento de un material bifásico u observar un fluido homogéneo en el que las fases sólida y líquida tengan la misma velocidad. El segundo modelo tiene un intervalo de solidificación más amplio interpretado

según el modelo Power Law Cut-Off (PLCO) de ProCAST. El modelo de PLCO se basa en considerar que el material es isotrópico, su comportamiento es viscoplástico e independiente de la presión y su deformación es homogénea.

Las ecuaciones 1 y 2 describen el comportamiento del fluido en un conformado por Thixocasting, mediante una función no newtoniana de la viscosidad, introduciendo el modelo matemático de Navier-Stokes [4] en el modelo PLCO:

$$\mu(\dot{\gamma}, T) = \mu_0(T) \dot{\gamma}_0^{n-1} \quad \text{para } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0 \quad (1)$$

$$\mu(\dot{\gamma}, T) = \mu_0(T) \dot{\gamma}^n \quad \text{para } \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_0 \quad (2)$$

donde  $\mu$  es la viscosidad local no newtoniana,  $\mu_0$  es la viscosidad aparente,  $\dot{\gamma}$  velocidad de deformación local,  $\dot{\gamma}_0$  velocidad de deformación de la sección crítica (cut-off) y  $n(T)$  el índice de pseudoplasticidad en función de la temperatura.

En el proceso de inyección a alta presión (HPDC) para inyectar el metal líquido o en estado semisólido (SSM), el desplazamiento del pistón se lleva a cabo en dos etapas, con una velocidad de inyección  $V1$  y  $V2$ , respectivamente. Para estudiar el efecto de ambas velocidades, analizamos los valores de  $V1$  considerando que se encontraban entre  $0,10$  y  $0,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y que los valores de  $V2$  eran similares a los de  $V1$ . Las simulaciones con ProCAST permitieron delimitar dichas velocidades.

### Condiciones de contorno

La cubierta de la pieza de automóvil que forma parte del proceso (Figura 1d) se ha realizado utilizando una aleación de aluminio A380. La caracterización reológica de dicho material se basa en ecuaciones del modelo PLCO, a través de las que se obtienen los valores de viscosidad local, velocidad de cizalla local y la dependencia de estos parámetros con la temperatura (Figura 3). Estos valores se introducen en la base de datos del programa.

La simulación se realiza de acuerdo con estas premisas. No obstante, cuando se producen cambios de sección o estrangulamiento durante la inyección del material semisólido, cambia la morfología del fluido y se pueden superar los valores de velocidad de deformación. Si esto sucede, es necesario dividir la pieza en dominios (cut-off) y aplicar la velocidad de deformación adecuada a cada uno de los dominios.

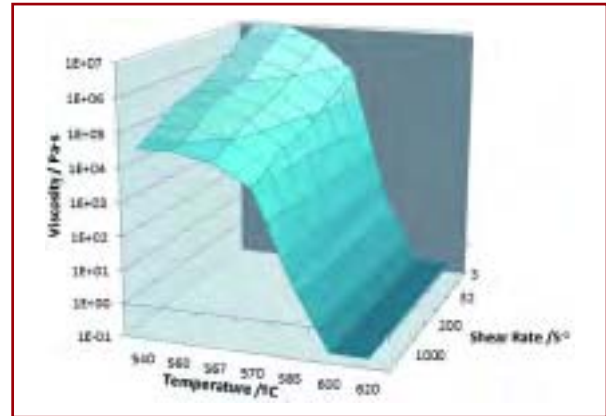


Figura 3: Evolución de la viscosidad frente a la temperatura y la velocidad de deformación.

El componente consistente en la cubierta de la pieza de automoción se ha dividido en tres dominios o regiones (Figura 4): dos de ellas corresponden al canal de llenado, una a los rebosaderos y otra a la pieza. Cada región muestra los valores de velocidad de deformación de corte (cut off).

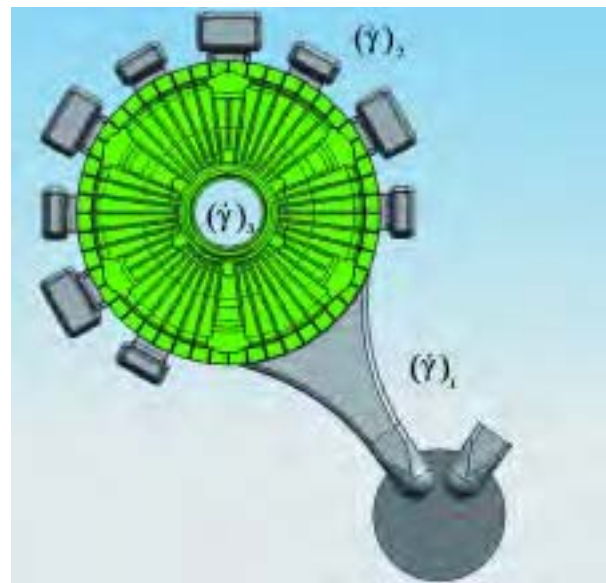


Figura 4: Representación de los dominios del componente.

### Efecto de la velocidad de llenado

En el proceso de inyección a alta presión (HPDC) para inyectar el metal líquido o en estado semisólido (SSM), el desplazamiento del pistón se lleva a cabo en dos etapas, con una velocidad de inyección  $V1$  y  $V2$ , respectivamente. Para estudiar el efecto de ambas velocidades, los valores de  $V1$  se

encontraban entre  $0,10$  y  $0,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y los valores de  $V_2$  eran similares a los de  $V_1$ .

La Figura 5a) muestra el mapa de porosidad para un llenado con una velocidad lineal de pistón de  $0,10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  que se corresponde con una velocidad de entrada de  $2,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La Figura 5b) muestra el mapa de porosidad para un llenado con una velocidad lineal de pistón de  $0,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , que se corresponde

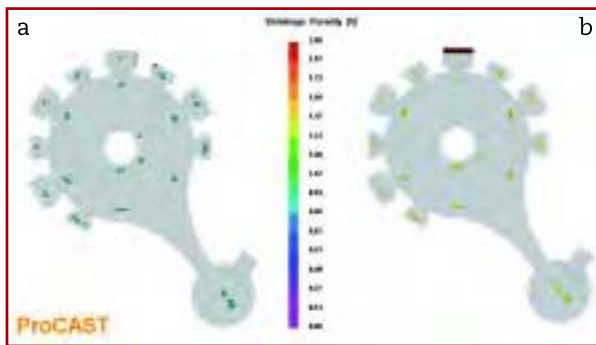


Figura 5: La simulación con ProCAST muestra a) la porosidad por contracción del llenado laminar y b) la porosidad del llenado turbulento.

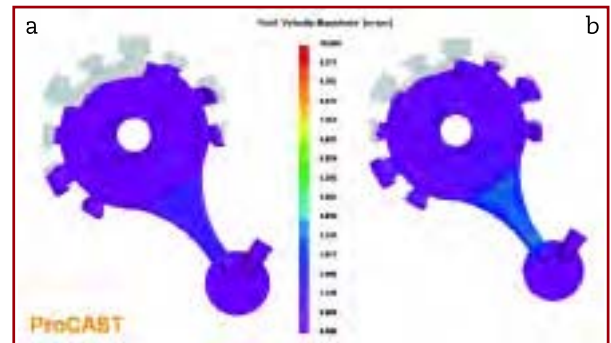


Figura 7: Velocidad de entrada del fluido del metal durante el llenado para las siguientes velocidades del pistón: a)  $0,10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y b)  $0,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

con una velocidad de entrada del metal de  $5,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Además, también se estudiaron los siguientes parámetros en la simulación: se consideró que la temperatura de la aleación estaba entre los  $590 \text{ }^\circ\text{C}$  y los  $598 \text{ }^\circ\text{C}$  para la aleación de aluminio A380 y que la temperatura del molde era  $305 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este valor

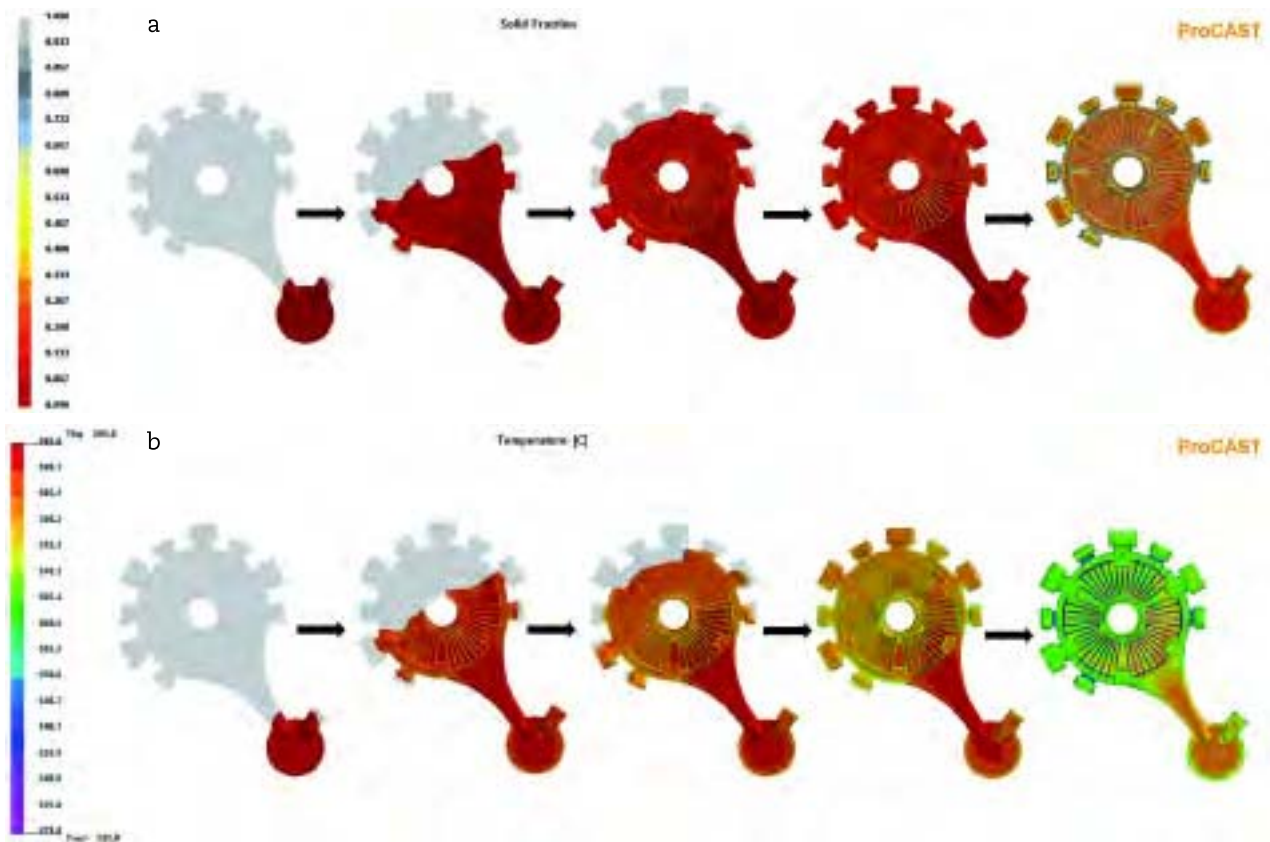


Figura 6: La simulación con ProCAST muestra a) la fracción sólida y b) los mapas del perfil de temperatura durante el llenado, respectivamente.



es clave en la realización de estudios experimentales sobre el proceso SSM. La simulación se llevó a cabo en distintas condiciones, utilizando un parámetro fijo y modificando el otro.

Se ha demostrado experimentalmente que si la inyección se realiza a velocidades inferiores al valor óptimo, la solidificación se produce de forma prematura antes del llenado de la cavidad, con las correspondientes fluctuaciones de la presión.

Este ajuste permitió definir el valor adecuado de la velocidad para comenzar el experimento. Como consecuencia se han obtenido componentes con una menor cantidad de defectos y una reducción parcial de la porosidad.

### Análisis radiográfico

Se realizaron análisis radiográficos de los diferentes componentes con el fin de validar la simulación. Resultaron de gran utilidad para identificar defectos importantes (Figura 8) principalmente de la porosidad de contracción y la porosidad por gas en determinadas zonas, marcadas con los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Observamos que no había porosidad en el resto de zonas si la inyección se realizaba mediante llenado laminar [5].

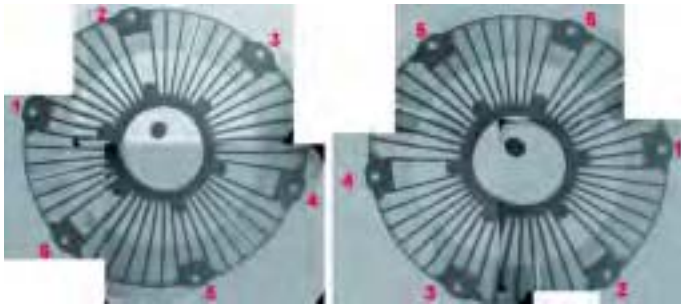


Figura 8: Radiografía de dos componentes diferentes [5].

### Análisis metalográfico

La microestructura de la aleación de aluminio A380 as-cast consiste en granos primarios del sólido  $\alpha$ . La fase  $\alpha$  está rodeada de una fina capa eutéctica en la que se detectan compuestos intermetálicos. Mediante el análisis EDS se determinó que los compuestos eran  $\text{Al}(\text{Si}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cu})$ ,  $\text{Al}(\text{Si}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cu}, \text{Cr})$ ,  $\alpha\text{-AlFeSi}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  y  $\text{CuAl}_2$ . Al contrario que en los procesos de Thixocasting, no se observaron microconstituyentes eutécticos ocluidos en los granos  $\alpha$ .

La presencia de los compuestos de estos elemen-

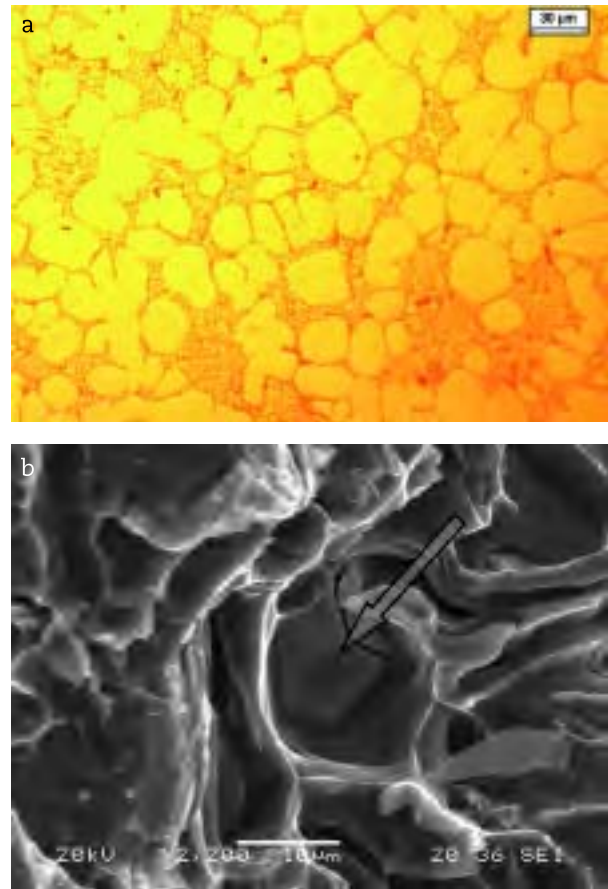


Figura 9: a) Micrografía de A380 en estado de colada (SSR) y b) Micrografía SEM del análisis EDS que detectó los compuestos intermetálicos  $\text{Al}(\text{Si}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cu}, \text{Cr})$ .

tos afecta principalmente a las zonas de la aleación A380 SRR, donde el contenido de hierro es superior al 0,12%. La fase del silicio eutéctico parece ser la más importante para iniciar la fractura en la aleación  $\text{AlSi7Cu3Fe0.2}$ . Sin embargo, se objeta que cuando el contenido de hierro es mayor ( $>0.6\%$ ), las fases férricas son más relevantes en el inicio de la fractura que las del silicio.

### Conclusiones

El modelo Power Law Cut-Off (PLCO), perteneciente al programa ProCAST, resulta ser una herramienta adecuada para predecir el comportamiento del llenado del molde de la aleación A380 en estado semisólido.

Para este volumen inyectado durante el proceso SSR se ha observado que cuando la agitación dura ocho segundos, no se generan glóbulos en fase alfa; sin embargo, si es superior a 12 segundos, la inyección resulta imposible.

Si se aumenta ligeramente la temperatura del líquido, 10 °C aproximadamente, no aumenta la porosidad concentrada en las partes masivas del componente y cerca de la entrada.

Los resultados óptimos de la simulación se obtuvieron con una temperatura de aleación de 595 °C, una temperatura de molde de 305 °C y una velocidad de entrada de 2.34 ms<sup>-1</sup> ( $v_{\text{piston}} = 0.10 \text{ ms}^{-1}$ ). Esta velocidad de inyección está muy por debajo del proceso estándar HPDC.

Las velocidades altas de inyección producen una mayor porosidad de solidificación o microporosidad, pero siempre por debajo del 1%.

El análisis por medio de rayos X muestra que el tamaño de la porosidad en el proceso SSR es inferior al 1%. Dicho dato fue confirmado mediante la simulación por elementos finitos con ProCAST.

A través de la simulación no se localizaron capas de óxido. Otro aspecto importante en la simulación del proceso SSM es mejorar la fase de segregación.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) de España la ayuda recibida a través de los proyectos DPI2005-02456 y CICYT DPI2007-62948. Los autores desean también mostrar su agradecimiento a Dr. James A. Yurko.

rial de Ciencia y Tecnología (CICYT) de España la ayuda recibida a través de los proyectos DPI2005-02456 y CICYT DPI2007-62948. Los autores desean también mostrar su agradecimiento a Dr. James A. Yurko.

### Referencias bibliográficas

- [1] Flemings M.C., Martinez-Ayers R.A., de Figueredo A.M., Yurko J.A. (2002). US Patent. N° 20020096231 [SSRTM].
- [2] A. Forn, S. Menargues, E. Martín and J. A. Picas (2008, 7 de julio). Sub Liquidus Casting technology for the production of high integrity component. Solid State. Phenomena, Vol. 141-143, pp. 283-288.
- [3] M. Campillo, M. T. Baile, E. Martín, and A. Forn (2008, enero). Heat treatments effect on the EN AC-46500 alloy produced by SSR. International Journal of Material Forming, Vol. 1, Supplement 1, pp. 993-996.
- [4] A. Forn, S. Menargues, E. Martín, L. Chiarmetta (2005). Simulation of thixocasting processes in automotive component. Materials Science Forum Vols. 480-481, pp.361-366.
- [5] M. Campillo, M. T. Baile, S. Menargues, and A. Forn (2010, abril). The effect of injection conditions on the structural integrity of the components produced by Semi-Solid Rheocasting. International Journal of Material Forming, Vol. 3, Suplemento 1, pp. 751-754.
- [6] Narayanan L. A., Samuel F. H., Gruzleski J. E. (1995). Dissolution of iron intermetallics in Al-Si alloys through non equilibrium, Metallurgical and Material Trans. A, 26A, 8, pp. 2161-2173.



**FUNDI**  
FOSCO ALBERGHO  
DE FUNDICION

**MOLD**  
¿Puede hacer los límites?

**SURFAS**  
gls

**TRATER**  
Pujos

**Nueva WEB**  
[www.pedeca.es](http://www.pedeca.es)

Síguenos en  



## SE VENDE

### GRANALLADORA DE GANCHO DE OCASION

- Marca: ALJU.
- Modelo: Regina 161-A.
- Interior todo de manganeso.
- Totalmente revisada y garantizada.

**GranallaTECNIC S.L.**

Teléf.: 93 715 00 00 - Fax: 93 715 11 52

Email: [juan@granallatecnic.com](mailto:juan@granallatecnic.com)

[www.granallatecnic.com](http://www.granallatecnic.com)