

# TRATAMIENTOS TERMICOS



la revista de los profesionales de los tratamientos térmicos

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

**ENERO-FEBRERO 2013 • N.º 135**



[www.soloswiss.es](http://www.soloswiss.es)

Instalaciones de tratamientos térmicos con atmósfera controlada



Hornos continuos SOLO Swiss tipo 322



Hornos de campana tipo Profitherm 300



SOLO Swiss Group



Instalaciones de tratamiento térmico  
[www.soloswiss.com](http://www.soloswiss.com)



Mantenimiento  
[www.thermic-service.com](http://www.thermic-service.com)



Hornos y Estufas  
[www.borel.eu](http://www.borel.eu)



Control de procesos  
[www.axron.com](http://www.axron.com)



## APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS T5 Y T6 A LA ALEACIÓN L-2630 CONFORMADA POR SSR

M. Campillo <sup>(1)</sup>, M. T. Baile <sup>(1)</sup>, E. Martín<sup>(1)</sup>, A. Forn <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro de Diseño de Aleaciones Ligeras y Tratamientos de Superficies, Universitat Politècnica de Catalunya, España

### RESUMEN:

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos al aplicar tratamientos térmicos T5 y T6, a componentes de aluminio L-2630, conformados por Semi-Solid Rheocasting (SSR). El estudio de los efectos de la temperatura y el tiempo de puesta en solución, y de las condiciones de temple y envejecimiento artificial, ha permitido optimizar las propiedades mecánicas del componente. La experimentación se ha realizado mediante ensayos de dureza Brinell, ensayos de tracción y microscopía óptica y electrónica. Las propiedades mecánicas de los componentes producidos por SSR alcanzan valores análogos a los obtenidos por colada en coquilla y sometidos a los mismos tratamientos térmicos.

### ABSTRACT:

This work demonstrates the possibility to apply T5 and T6 heat treatments to L-2630 aluminium components conformed by Semi-Solid Rheocasting (SSR). The study of temperature and time effect in annealing, tempering and artificial aging conditions, has permitted to optimize the mechanical properties of the component. The experimentation has been accomplished by means of hardness Brinell tests, tensile tests and optic and electronic microscopy. The mechanical properties obtained in SSR

components reach analogous values to the ones obtained by die cast components and submitted to the same heat treatments.

### 1. Introducción

Los procesos de conformado en estado del semisólido (SSM) son procesos híbridos entre las técnicas de forja y de moldeo. El interés en estas técnicas reside en la necesidad de producir componentes con menos defectos y con un coste que podría competir con los procesos convencionales [1].

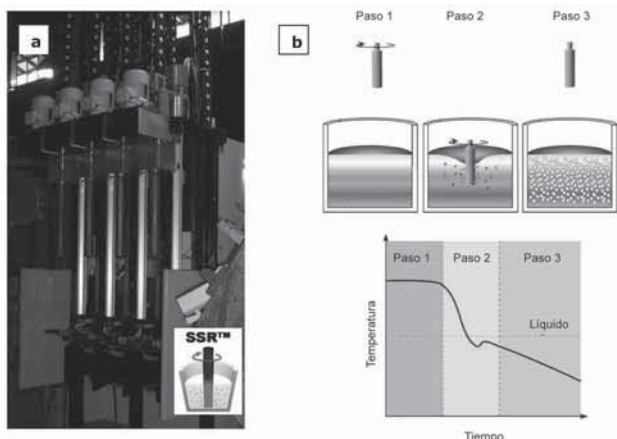
Una de las ventajas que ofrecen los procesos SSM es la disminución de gas atrapado y de porosidad debido a la reducción de la turbulencia durante el proceso de inyección, lo que permite obtener piezas susceptibles de ser tratadas térmicamente. El rango de fracción sólida en el ataque del molde se encuentra entre el 20 y el 50%; esto implica una viscosidad alta y una reducción de la contracción durante el proceso de solidificación [2].

La técnica de fabricación se basa en la inyección a alta presión del lodo semisólido, obtenido previamente en una estación agitadora SSR (Fig.1a). La estación SSR enfría el metal lo que produce una pequeña fracción sólida (Fig.1b) [3].

El principio general del proceso SSR puede ser descrito de la siguiente manera [1]:

- Paso 1: El aluminio fundido se mantiene por encima de la temperatura de fusión (líquidus) (Fig.1b).
- Paso 2: Una barra de refrigeración de grafito se introduce dentro del metal y lo enfría agitándolo vigorosamente a una temperatura inferior a la de líquidus. La barra se mantiene en el caldo durante intervalos de tiempo muy cortos, y la velocidad de agitación no debe superar las 60 rpm. La parte más crítica del proceso está en la obtención del primer 1% en volumen de fracción sólida no dendrítica y es necesario un cuidadoso control de la velocidad de enfriamiento durante la agitación (0,3 a 3 °C·s<sup>-1</sup>) (Fig.1b).
- Paso 3: Después de un breve período de agitación, se extrae la barra de grafito dejando un lodo que contiene bajas proporciones de fracción sólida (<20%) y se introduce en la máquina de inyección (Fig.1b).

El objetivo de este trabajo ha sido la optimización de los tratamientos térmicos de envejecimiento T5 y T6 en la aleación L-2630 (EN AC-46500), conformada mediante el proceso de inyección en estado semisólido Semi Solid Rheocasting (SSR).



Al	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	Ni	Cr	Pb
base	8,7	0,15	2,5	0,7	0,25	0,5	0,05	0,06	0,03	0,08

Tabla 1. Composición en % peso de la aleación L-2630 (EN AC-46500).

## 2. Procedimiento experimental

Para realizar este trabajo se han utilizado piezas de aluminio L-2630 conformadas por SSR (Figs.2 y 3) y de estas piezas se han extraído probetas planas de sección rectangular (30x20x4mm).

Los tratamientos térmicos T5 y T6 se han efectuado mediante la utilización de un horno Hoberhall HCV-125, con enfriamiento controlado y circulación forzada de aire, con una precisión de ±1 °C.

Los ensayos de durezas Brinell en todos los tratamientos efectuados se ha llevado a cabo según la norma UNE-EN

ISO 6506-1, utilizando en todos los casos una carga de 62.5 Kg y un diámetro de bola de 2.5 mm.

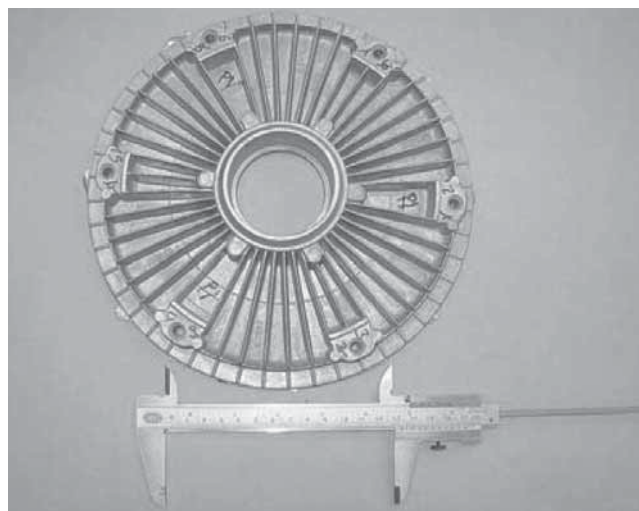


Fig.2. Componente de la aleación L-2630 conformado por SSR.

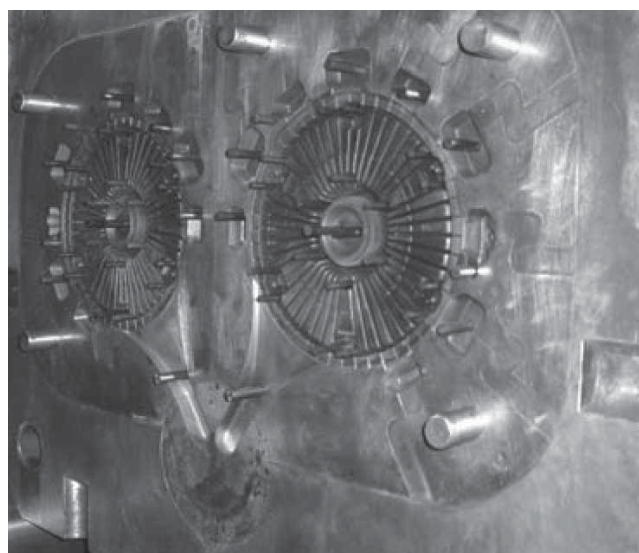


Fig.3. Molde del componente para el proceso SSR.

En la etapa de puesta en solución de un tratamiento T6 se producen varios fenómenos: disolución de los precipitados intermetálicos Mg<sub>2</sub>Si y CuAl<sub>2</sub>, homogeneización de la solución sólida, y fragmentación, esferoidización y crecimiento del silicio eutéctico [2].

En las figuras 4 y 5 se presentan los esquemas de los tratamientos térmicos T6 y T5 efectuados, donde pueden observarse las diferentes etapas de los mismos.

En la tabla 2 se observan las diferentes combinaciones de temperaturas y tiempos de solubilización y de envejecimiento que se han utilizado para la realización de este trabajo.

Como no se dispone de información sobre el tratamiento térmico de la aleación L-2630 se han tomado como referencia los tratamientos T5 y T6 de la aleación A333, la cual sólo difiere con la aleación L-2630 en el porcentaje de cobre (Tabla 3). El efecto de los tratamientos térmicos se ha realizado mediante medidas de dureza en las dife-

rentes condiciones de envejecimiento descritas en la Tabla 2.

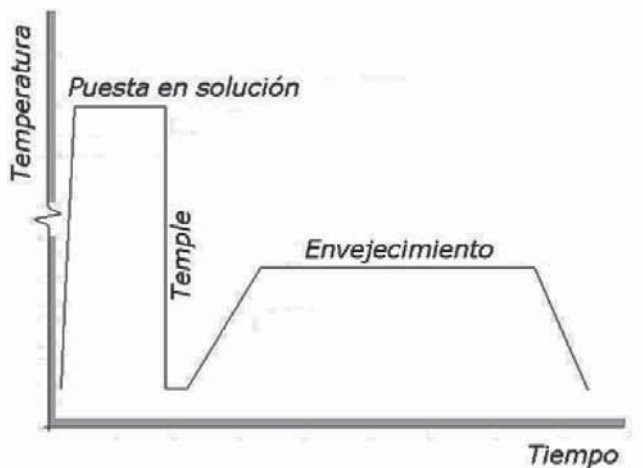


Fig.4. Esquema del tratamiento T6.

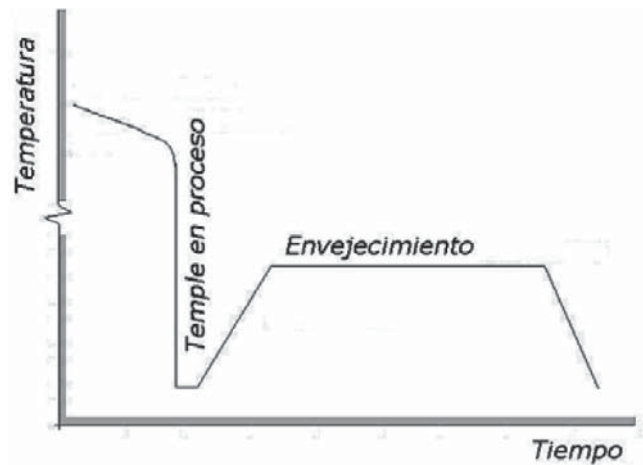


Fig.5. Esquema del tratamiento T5.

Tratamiento térmico	T6	T5
T de puesta en solución / °C	500, 505, 510, 515	-
t de puesta en solución / h	5, 6, 7, 8	-
Temple	Agua a 25 °C	Agua a 25 °C
T de envejecimiento / °C	155, 160, 165, 170	180, 190, 200, 205
t de envejecimiento / h	1, 3, 6, 12	1, 4, 5, 6, 7

Tabla 2. Condiciones de los tratamientos efectuados.

La norma de ASTM [4], establece que en la aleación A333 T5 el envejecimiento se realice a 205 °C durante 7-9 horas, y en la A333 T6 la puesta en solución sea a 505 °C durante 5-12 horas y el envejecimiento a 155 °C durante 2-5 horas.

	Al	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	Ni	Cr	Pb
L-2630 base	8,7	0,15	2,5	0,7	0,25	0,5	0,05	0,06	0,03	0,08	
A333 base	8-10	0,05-0,5	3-4	<1	<0,5	<1	<0,25	<0,5	-	-	

Tabla 3. Composiciones de las aleaciones L-2630 y A333.

### 3. Análisis de resultados

La microestructura de la aleación L-2630 en estado bruto de colada consiste en granos primarios de solución sólida  $\alpha$  (Fig.6).

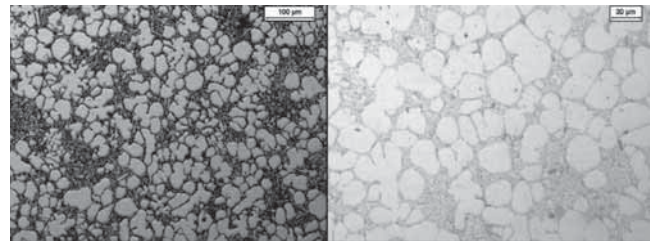


Fig. 6. Micrografías de la aleación L-2630 conformada por SSR, en estado bruto de colada.

En las figuras 7 y 8 se muestra la evolución de la microestructura con los tratamientos T6 y T5 realizados. En dichas micrografías puede verse el crecimiento considerable del silicio eutéctico, respecto al del material en bruto de colada (Fig.4), debido a un proceso de fragmentación y crecimiento [5].

La fase  $\alpha$  está rodeada de eutéctico muy fino, en el que se detectan compuestos intermetálicos. Mediante análisis por EDS se ha determinado que son compuestos del tipo Al(Si,Fe,Mn,Cu), Al(Si,Fe,Mn,Cu,Cr),  $\alpha$ -AlFeSi, Mg<sub>2</sub>Si y CuAl<sub>2</sub>. No se observa microconstituyente eutéctico ocluido en el interior de los granos como sucede en el proceso Thixocasting.

Los mayores valores de dureza, en la etapa de puesta en solución, se obtienen a las 8h a todas las temperaturas, excepto a 505 °C que requieren 7h. Para tiempos de puesta en solución inferiores a 4h los valores de dureza son bajos, a las temperaturas experimentadas.

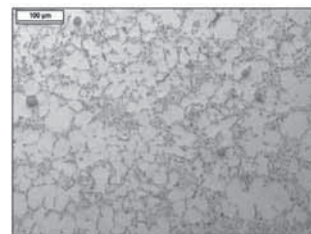


Fig. 7. Micrografía de la aleación L-2630 T6 conformada por SSR.

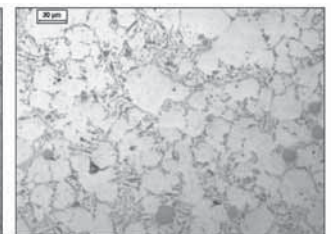


Fig. 8. Micrografía de la aleación L-2630 T5 conformada por SSR.

En la figura 9 se puede ver el efecto del tiempo de puesta en solución en la dureza final. Cuanto menor es la dureza después del temple mayor es el pico de dureza a las 12 horas de envejecimiento.

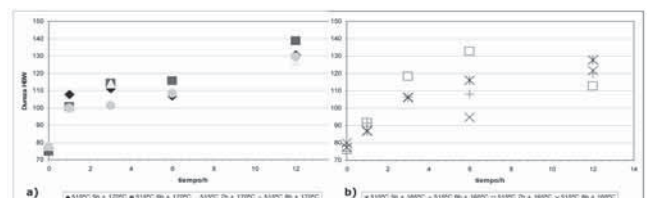


Fig. 9. Tratamientos T6. Evolución de la dureza en función del tiempo de envejecimiento a temperaturas de puesta en solución constantes y temperaturas de envejecimiento de 170°C (a) y de 165°C (b).

Los mayores valores de dureza Brinell se obtienen con el tratamiento de solubilización a 515 °C durante 6 horas seguido de envejecimiento a 170 °C durante 12 horas, llegando a 139 HBW y partiendo de una dureza del bruto de colada de 90 HBW.

En la figura 10, se describe la influencia de la temperatura de puesta en solución en la dureza del material envejecido a 170 y 160°C. Los valores de dureza no varían notablemente con la temperatura de puesta en solución, excepto en los casos de envejecimiento durante 6 horas. La figura 11 describe el efecto de la temperatura de envejecimiento. La dureza se incrementa al prolongar el tiempo de envejecimiento.

En las figuras 9, 10 y 11 se intuyen dos picos de dureza, el primero en el intervalo de 1 a 4 horas de envejecimiento debido a los precipitados  $\beta'$  y  $\beta''$ . Después las durezas presentan una caída debida al sobre-envejecimiento por precipitación de  $Mg_2Si$ . El segundo pico después de 6 horas de envejecimiento se debe a la formación de precipitados coherentes  $\theta'$  y  $\theta''$ .

En la mayoría de experimentos la máxima dureza se adquiere a las 12 horas de envejecimiento. Estos valores de dureza podrían verse incrementados optimizando los tiempos de envejecimiento. Sin embargo, a las 6 horas ya se obtiene un notable endurecimiento. La presencia de precipitados intermetálicos del tipo Al(Si,Fe,Mn,Cr,Cu), cuya disolución es difícil, puede contribuir a reducir la capacidad de endurecimiento.

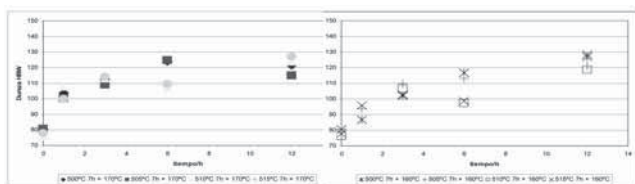


Fig. 10. Tratamientos T6. Evolución de la dureza en función del tiempo de envejecimiento para temperaturas de envejecimiento de 170 (a) y 160°C (b).

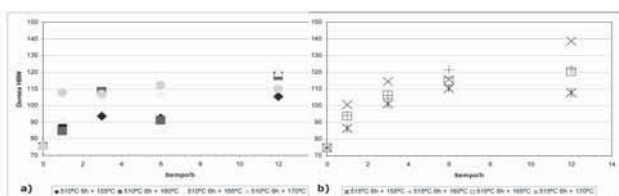


Fig. 11. Tratamientos T6. Evolución de la dureza en función del tiempo de envejecimiento a tiempos y temperaturas de puesta en solución constantes. Solubilización: (a) 510°C y (b) 515°C.

Los valores de dureza de la aleación L-2630 SSR T6 (máx. 139 HBW) son mayores que los de la aleación A333 T6 (115 HBW).

Los mayores valores de dureza Brinell con el tratamiento T5 se obtienen con el envejecimiento a 190 °C durante 4 horas (105 HBW). Teniendo en cuenta que la dureza del material bruto de colada es de 90 HBW, el incremento de dureza del tratamiento T5 es limitado. Podrían obtenerse mejores resultados aumentando la temperatura de la pieza a la salida del molde y optimizando el temple. Estos valores son semejantes a los del mismo tratamiento para la aleación A333 T5 [4].

#### 4. Conclusiones

Es posible aplicar tratamientos térmicos T6 a componentes conformados por SSR con la aleación de segunda fu-

sión L-2630, obteniendo incrementos de dureza de hasta el 100%. La aleación A330 de composición similar conformada por moldeo por gravedad alcanza valores mucho más bajos.

Los buenos resultados del tratamiento térmico T6 permiten prever la mejora de resultados en el tratamiento térmico T5 si la temperatura de desmoldeo aumenta. Al aumentar el tiempo de puesta en solución aumenta la dureza después del temple en todos los casos estudiados, llegando hasta valores de 82 HBW. Sin embargo al aumentar el tiempo de puesta en solución se obtienen menores durezas al final del envejecimiento, debido al crecimiento del silicio eutéctico.

En el tratamiento térmico T6, el máximo endurecimiento de la aleación L-2630 (139 HBW), se ha obtenido para una puesta en solución de 6 horas a 515 °C, y 12 horas de envejecimiento a 170 °C. Este valor de dureza es mayor que el de la aleación A333 T6 cuya dureza alcanza los 115 HBW.

En el tratamiento térmico T5, el máximo endurecimiento de la aleación L-2630 (105 HBW), se ha obtenido a las 4 horas y a una temperatura de envejecimiento de 190 °C. Estos valores son semejantes a los de la aleación A333 T5. Un incremento de la temperatura del desmoldeo puede proporcionar mejores resultados.

#### 5. Referencias.

- [1] A. Forn, E. Martín, M. T. Baile, S. Menargues y M. Campillo. Propiedades mecánicas y análisis fractográfico de componentes de aluminio conformados en estado semisólido. Anales de Mecánica de la Fractura. Vol. 1, pp 93-98, Burgos (España). Marzo (2007).
- [2] A. Forn, E. Martín, M. T. Baile, M. Punset y S. Menargues. Optimización de las propiedades mecánicas a diferentes temperaturas de componentes conformados por Sub Liquidus Casting (SLC) con los tratamientos térmicos. IX Congreso Nacional de Materiales, Vigo (España). 20-21 Junio (2006).
- [3] Flemings M.C., Martinez-Ayers R.A., de Figueredo A.M., Yurko J.A., US Patent. N° 20020096231 [SSRTM], 2002.
- [4] ASM HandBook Heat Treating, Vol. 4, Heat Treating of Aluminium Alloys, pág. 1861-1960, 1991.
- [5] Forn A., Baile M. T., Martín E., Rupérez E., Effect of heat treatments in the silicon eutectic crystal evolution in Al-Si alloys, Material Science and Engineering A 413-414, pág. 186-191, 2005.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la ayuda recibida a través de los proyectos CICYT DPI2005-02456 y CICYT DPI2007-62948, así como al Doctor James A. Yurko.