

## Efectos del tratamiento de Homogeneizado en la extrudabilidad de la aleación

### AA – 6063

Echarri Juan Manuel<sup>a</sup>; Jodra, Sebastián; Culcasi, J. Daniel<sup>a</sup>; Echarri, Tomás<sup>b</sup>

- Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física (LIMF), Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata 1900, Argentina.
- Unidad de Investigación y Desarrollo DISIM, “Diseño e innovación de sistemas Mecánicos”, Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata 1900, Argentina.

E-mail: juanecharri@yahoo.com.ar

**Palabras claves:** Aleación AA6063, barrote, fase AlFeSi, fase SiMg<sub>2</sub>, homogeneizado-solubilizado.

#### RESUMEN.

Los procesos de plantas industriales son el único modelo que reproduce de forma exacta las transformaciones que sufre el material a lo largo de la cadena de producción, es común entonces encontrarnos con la afirmación: “El mejor laboratorio que reproduce las condiciones de proceso es la planta misma”. En el proceso de fabricación de productos de extrusión de Aluminio se parte del barrote colado y se busca a través de un proceso de homogeneizado-solubilizado romper la estructura de colada y optimizar la microestructura de cara al proceso de extrusión. Las distintas estructuras de colada encontradas en los barrotos producto de los gradientes térmicos inherentes al proceso industrial, junto con la dispersión en los ciclos de homogeneizado-solubilizado dieron como resultado una amplia variabilidad en las microestructuras observadas. Se caracterizó y estudió la microestructura de los barrotos, tamaño de grano, fases AlFeSi y SiMg<sub>2</sub> presentes, en dos condiciones: a) En bruto de colada y b) luego del homogeneizado-solubilizado. Se relacionó lo observado con la calidad superficial del producto terminado. En el presente trabajo se encuentra una marcada consistencia entre el la calidad superficial de los perfiles de extrusión y el criterio de extrudabilidad que se desprende del estudio de la microestructura. Se concluye finalmente que luego del homogeneizado-solubilizado, es el grado de transformación  $\beta \rightarrow \alpha$ -AlFeSi, su fragmentación y esferoidización, lo que define la calidad superficial del producto.

#### INTRODUCCIÓN.

La aleación de aluminio AA6063 es una de las más utilizadas para extrusión. Posee como principales elementos aleantes Mg, Si y Fe. La tabla 1 muestra la composición [1].

Tabla 1. Composición química según Aluminum para la aleación AA6063.

REGISTERED INTERNATIONAL DESIGNATION												OTHERS		ALUMINUM
No.	DATE	BY	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Each	Total	Minimum	
6063	1954-07-01	USA	0.20-0.6	0.35	0.10	0.10	0.45-0.9	0.10	0.10	0.10	0.05	0.15	Remainder	

El grado AA6063 es endurecible por precipitación: partiendo de la estructura de colada, el solubilizado se realiza durante el ciclo térmico de homogeneizado-solubilizado (575 y 590 °C con un mantenimiento de 6 horas), a la salida de la prensa se realiza un enfriamiento brusco (mediante ventiladores a una velocidad mínima de 250 °C/hora hasta alcanzar los 250 °C), buscándose luego el temple T-6 (envejecido artificial) mediante hornos de envejecido.

La microestructura de los barrotos en bruto de colada y de los tochos en estado homogeneizado-solubilizado juega un papel de suma relevancia en el proceso de extrusión, impactando en el desempeño de la prensa, en términos de productividad, calidad del producto final y complejidad de la forma a elaborar. Se definen las características de una estructura de colada aceptable como [2,3]: 1) Libre de fisuras internas y porosidad, 2) Capa cortical de un máximo de 3 mm de espesor, 3) Las fases con contenido de hierro deberían estar en un 100% como  $\beta$ -AlFeSi en forma de agujas; no debería estar la fase  $\alpha$ -AlFeSi precipitada en forma de escritura china, ni en intermetálicos gruesos, 4) Los tamaños de partícula (dimensión mayor) no deberá exceder los 15  $\mu\text{m}$ . De la misma forma los propósitos del homogeneizado se describen como: 1) Reducción de los gradientes de Mg y Si, 2) Disolución de las partículas de  $\text{Mg}_2\text{Si}$  precipitadas durante la solidificación. 3) Transformación de la fase  $\beta$ -AlFeSi en  $\alpha$ -AlFeSi. 4) Fragmentación y esferoidización de la fase  $\alpha$ -AlFeSi. El tamaño de los precipitados que quiere lograrse en esta instancia es aproximadamente 0,5  $\mu\text{m}$  [3].

La aleación AA6063 además de los aleantes mayoritarios, Mg, Si, presenta contenidos significativos de Fe debido a que durante el proceso de colada el Fe se encuentra presente en el baño. Al final del proceso de colada se forman intermetálicos ricos en Fe, Al y Si (AlFeSi) caracterizados como  $\alpha$ -AlFeSi y  $\beta$ -AlFeSi y precipita el intermetálico  $\text{FeAl}_3$  además del siliciuro de magnesio ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) ya mencionado. Las cinco fases presentes en una aleación AA6063 son:  $\text{FeAl}_3$ ,  $\alpha$ -AlFeSi,  $\beta$ -AlFeSi,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , hAlMgFeSi. Se describen a continuación, aquellas que toman relevancia en el presente trabajo [4,5].

**$\alpha$ -AlFeSi:** Durante la solidificación, esta fase precipita en los espacios interdendríticos como el eutéctico  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  [2] presentándose con morfología irregular tipo “escritura china”, o como partículas aisladas alargadas de alrededor de 10  $\mu\text{m}$  de longitud y 0,5  $\mu\text{m}$  de ancho. Durante el homogeneizado, las fases  $\text{FeAl}_3$ ,  $\beta$ -AlFeSi y hAlMgFeSi se transforman a la fase  $\alpha$ -AlFeSi, y, también tiene lugar la formación de la fase  $\alpha$ -AlFeSi como precipitados sub-microscópicos a partir de sus elementos constituyentes partiendo de su estado en solución.

**$\beta$ -AlFeSi:** El enfriamiento rápido durante la solidificación promueve la formación de esta fase, constituyéndose en el intermetálico de mayor presencia en las estructuras de bruto de colada por el método de colada directa semicontinua. Se encuentra en los espacios interdendríticos. El  $\beta$ -AlFeSi se ve como agujas, usualmente de lados paralelos y extremos regulares, precipitadas de forma aislada. El largo de estas partículas es algo menor al de los  $\alpha$ -AlFeSi, mientras que se las puede diferenciar claramente por el ancho marcadamente menor (de alrededor 0,1  $\mu\text{m}$ ). Durante el homogeneizado, las partículas de  $\beta$ -AlFeSi transforman a  $\alpha$ -AlFeSi pero conservan en gran parte su forma original. El aluminio se separa de la fase  $\beta$ -AlFeSi durante la transformación  $\beta \rightarrow \alpha$ , y a altas magnificaciones, puede identificarse como zonas blancas sobre los platos o agujas.

**$\text{Mg}_2\text{Si}$ :** En la estructura de bruto de colada esta fase está presente como partículas de forma irregular y del tipo “escritura china”. Usualmente se pueden encontrar cerca de las agujas de  $\beta$ -AlFeSi. La fase  $\text{Mg}_2\text{Si}$  puede coalescer y disolverse completamente durante el calentamiento y es la responsable del endurecimiento por precipitación.

Samaras y colaboradores [6] mostraron la evolución de la microestructura en una aleación AA6061 (de la misma familia a la del presente trabajo), mediante microscopía óptica estándar, durante el tratamiento térmico de homogeneizado-solubilizado a 580 °C durante distintos intervalos de tiempo. Dichas microestructuras se muestran en la Figura 1.

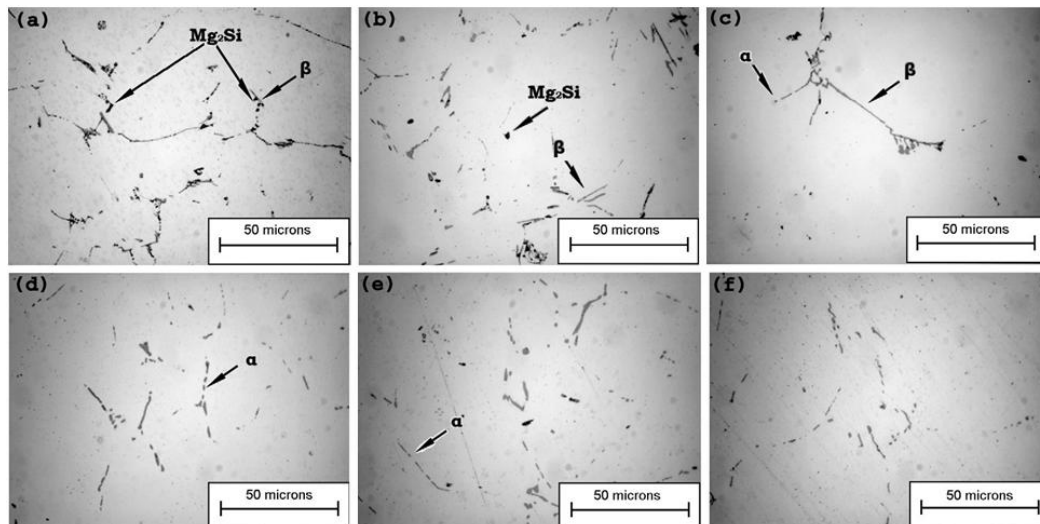


Fig. 1. Evolución microestructural para distintos tiempos de homogeneizado a 580 °C, X1000, reactivo de ataque 0,5% HF, tiempo de ataque 5 s: (a) en bruto de colada, (b) 40 min, (c) 2 h, (d) 4 h, (e) 8 h y (f) 10 h [6].

Rivas y colaboradores [2] estudiaron los efectos de la microestructura sobre las propiedades mecánicas y calidad superficial de una aleación AA6063 para extrusión en barros de dimensiones similares a las del presente trabajo. Propusieron 3 ciclos distintos basados en una misma temperatura de calentamiento (560 °C) con mantenimientos de 4, 6 y 8 horas. Encontraron que superadas las 6 horas de mantenimiento, la transformación, fragmentación y esferoidización se completaba de forma óptima. Las conclusiones formuladas tienen respaldo en los trabajos de Hidalgo y Samaras [4,6]. Estas conclusiones se basaron en la observación de la microestructura y en los resultados favorables de ensayos de tracción y mediciones de dureza, además de la observación de la calidad superficial del producto final para distintos tiempos de homogeneizado.

En este trabajo se caracteriza y estudia la microestructura de los barros, tamaño de grano, fases  $AlFeSi$  y  $SiMg_2$  presentes, en dos condiciones: a) En bruto de colada y b) luego del homogeneizado-solubilizado. Se relaciona lo observado a lo largo del proceso de extrusión en planta con la calidad superficial del producto terminado. El trabajo tiene como principal objetivo estudiar la extrudabilidad de una aleación AA6063 analizando las implicancias de las microestructuras obtenidas a través de distintos ciclos de homogeneizado/solubilizado. Sobre el producto terminado se evalúa calidad superficial, tipo y cantidad de defectos.

#### PARTE EXPERIMENTAL.

La prueba se realizó en planta utilizando barros de 200 mm de diámetro por 825 mm de longitud. Se seleccionaron 4 barros en diferentes zonas del horno de homogeneizado de forma de obtener ciclos marcadamente distintos. Se definió como punta de barra al extremo contra el lado frío del horno (puerta) y como cola de barra al extremo del lado caliente del horno (fondo). El ciclo de homogeneizado constó de un rango de 575 y 590 °C con mantenimiento de 6 hs. Los ciclos se relevaron con termocuplas sobre la carga en los extremos de los barros. A la salida de la prensa el enfriamiento controlado se realizó mediante *spray* y ventiladores a una velocidad mínima de 250 °C/hora hasta alcanzar los 250 °C.

Luego del homogeneizado el barra se cortó en dos tochos. Se extrajeron muestras de ambos extremos de los 4 barros sobre los que se realizó el seguimiento. Los tochos se nombraron según el orden de prensado como: Tocho 1 (barra 3 cola), Tocho 2 (barra 2 punta), Tocho 3 (barra 2 cola), Tocho 4 (barra 1 punta), Tocho 5 (barra 1 cola), Tocho 6 (barra 4 punta), Tocho 7 (barra 4 cola), Tocho 8 (barra 3 punta).

Para la caracterización de las muestras se realizaron: Macrografías (reactivo Tucker), medición de dureza Brinell (según norma ASTM E10), micrografías para el estudio de fases  $\text{AlFeSi}$  y  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (preparación por electropulido + ataque con ácido fluorhídrico al 0,5% en volumen), medición del tamaño máximo de precipitados, distribución de partículas y medición de tamaño de grano. De cada tocho prensado se cortan 10 tiras de 3570 mm de longitud del perfil en cuestión, se selecciona la tira número 5 de cada tocho para cuantificar la cantidad de defectos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La medición de tamaño de grano en bruto de colada mostró que la mayor diferencia existe entre el tocho 2 (tamaño de grano promedio igual a  $87 \mu\text{m}$ ) y el tocho 6 (tamaño de grano promedio igual a  $125 \mu\text{m}$ ) en buen acuerdo con los reportados en la bibliografía [3]. Tanto el tamaño de grano como el espaciado interdendrítico finos favorecen la cinética durante el proceso de homogeneizado.

La presencia de siliciuros de magnesio en la condición de bruto de colada es fácilmente reducida gracias a la alta difusividad de estos elementos en el aluminio, esto se pudo apreciar en todas las micrografías (ver Figura 2 a y b) para los distintos tiempos de homogeneizado. En base a lo anterior y a trabajos consultados [4,5] es la cinética de la transformación  $\beta \rightarrow \alpha$  ( $\text{AlFeSi}$ ), el estrangulamiento y esferoidización de las partículas de  $\alpha\text{-AlFeSi}$ , cuya cinética es lenta, la que define el tratamiento térmico.

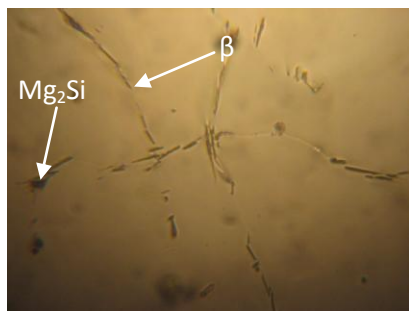


Fig. 2a. Estructura de colada. 500x. Presencia de  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (oscuros) y los  $\beta\text{-AlFeSi}$  en forma de bastón.



Fig. 2b. Estructura refinada luego del homogeneizado-solubilizado. Se aprecia la fase  $\alpha\text{-AlFeSi}$  fragmentada.

En la Figura 3 se observa la dificultad para fragmentar y globulizar la fase  $\alpha\text{-AlFeSi}$  precipitada como escritura china. Debido a las altas temperaturas requeridas para su fragmentación [3] esta fase no es deseada en las estructuras de colada.

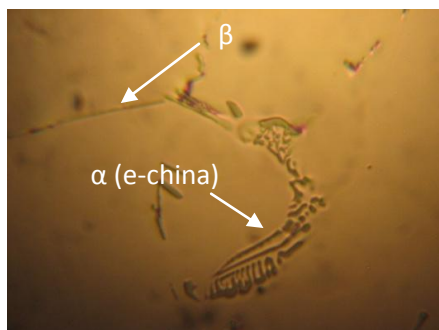


Fig. 3a. Estructura de colada.  $\alpha\text{-AlFeSi}$  de escritura china. 1000x.

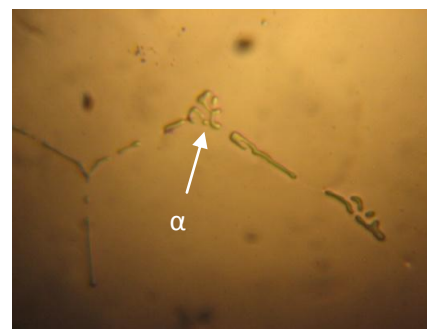


Fig. 3b. Estructura obtenida luego del homogeneizado-solubilizado. 1000x.

La fase  $\alpha\text{-AlFeSi}$  es la que predomina en la estructura del material homogeneizado. Todos los ciclos experimentados por el material de prueba son suficientes a los efectos de cumplir con los objetivos del homogeneizado según la bibliografía [2]. No obstante, se verá a continuación, que

los resultados obtenidos evidenciaron que para las condiciones de prensado no todos respondieron de igual manera. Esta variación en el comportamiento puede ser explicada en la dispersión de la estructura de colada y su bajo grado de refinamiento, constituyéndose en el principal limitante para los resultados del homogeneizado.

Del análisis de los tochos 1 y 4 en condición bruto de colada se determinó que el tocho 4 presentó una microestructura más refinada que el tocho 1. La distribución de tamaños en la microestructura de colada nos indica que las partículas deseables (dimensión mayor por debajo de los 15  $\mu\text{m}$ ), comprenden un 94% de las partículas en el tocho 4 y un 88% en el tocho 1. Se vio que el homogeneizado invirtió el grado de dispersión de partículas encontradas en las muestras, logrando situar la distribución del tocho 1 en un 79,3% de partículas en el rango deseado ( $< 4 \mu\text{m}$ ) contra un 73,5% para el tocho 4.

De la observación de las muestras se realizó una valoración del material analizado en la cual se expondrán en orden creciente de extrudabilidad (grado de refinamiento) las distintas microestructuras de los tochos que posteriormente fueron extruidos para estudiar la calidad superficial del producto final. Por la paridad de resultados se elige no hacer referencia a la estructura de colada en esta etapa y partir del homogeneizado-solubilizado. No obstante se debe tener presente que los dos extremos en cuanto a condición de bruto de colada son el tocho 1 (menor grado de refinamiento) y el tocho 4 (mayor grado de refinamiento). La Figura 4 muestra los daños relevados visualmente y en la Tabla 2 se vuelcan los resultados de este análisis.

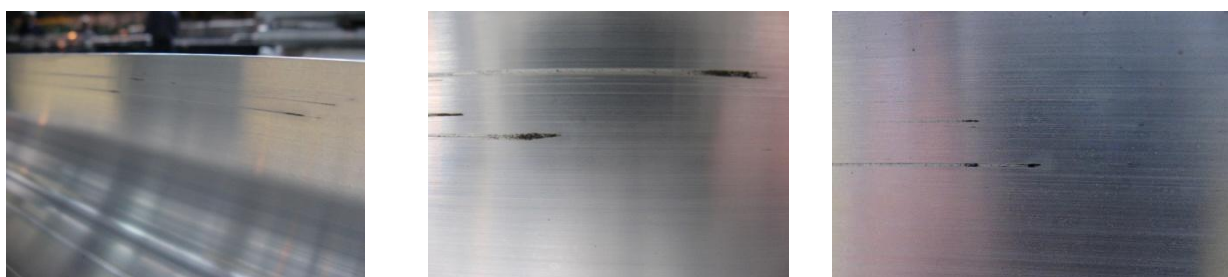


Fig. 4. Visualización cercana de los daños ocasionado por el defecto.

Tabla 2. Resultado de la observación superficial

Microestructura	Calidad Superficial		Tocho N°	Homogeneizado/Solubiliz. (575 a 590°C, mant. 6 hs)
	Rayas/metro	Tamaño de defecto[cm]		
1	>30	>5	8	7:30 hs calentamiento 5:10 hs mantenimiento
2	>30	$\leq 5$	6	5:10 hs calentamiento 7:29 hs de mantenimiento
3	17	$\leq 5$	5	6:00 hs calentamiento 6:30 hs mantenimiento
4	26	$\leq 5$	2	8:08 hs calentamiento 4:31 hs mantenimiento
5	6	$\leq 5$	4	6:00 hs calentamiento 5:00 hs a 570°C
6	5	$\leq 1$	7	3:36 hs calentamiento 9:03 hs mantenimiento
7	4	$\leq 1$	3	4:44 hs calentamiento 7:50 hs mantenimiento
8	0	-	1	2:49 hs calentamiento 9:50 mantenimiento

## CONCLUSIONES.

Se puede observar la importancia del control de la dispersión térmica del horno de homogeneizado ya que una de las peores microestructuras en bruto de colada (Tocho 1) pasó a ser, una de las mejores estructuras previas al prensado, mientras que el tocho 4 (de mejores condiciones en bruto de colada), luego del homogeneizado adquirió un grado de refinamiento de la microestructura inferior al del tocho 1 (ver tabla 2).

Se pudo ver que la calidad superficial del producto depende directamente del grado de refinamiento de la estructura. Siendo consistente el análisis de la calidad superficial de los perfiles con el criterio de extrudabilidad asociado a la microestructura.

Se encontró como principal dificultad, a la hora de analizar los resultados, el grado de dispersión y las limitaciones de control del proceso a escala industrial. Para el avance en el estudio de la temática se propone como acciones futuras abordar el estudio de las transformaciones procurando un mayor control de las variables pudiendo lograrse mediante prácticas de laboratorio, nutriendo el estudio con técnicas microscopía electrónica y difracción de rayos-X aplicadas al proceso de transformación  $\beta \rightarrow \alpha\text{-AlFeSi}$ .

## REFERENCIAS.

- [1]. Aluminum Standards and Data SI, "Aluminium Association", 2006.
- [2]. A. L. Rivas, "Efecto de la microestructura en las propiedades mecánicas y acabado superficial de un aluminio extrudado AA-6063"; Dpto. de Ciencias de los Materiales, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 1999. p. 21-23.
- [3]. A. J. Bryant, F. R. Philipson, "Extrusion Ingot Metallurgy for AA6063 and Related Alloys"; Alcan International, Quebec, Canada, 1990.
- [4]. B. Hidalgo, "Microscopía de Fase Transformaciones en Aleaciones Comerciales de Aluminio"; Depto. de Ciencia de los Materiales, Laboratorio de Caracterización de Materiales, Venezuela, 2007.
- [5]. N.C.W. Kuijpers, y col., "Assessment of different techniques for quantification of  $\alpha\text{-Al(FeMn)Si}$  and  $\beta\text{-AlFeSi}$  intermetallics in AA 6xxx alloys"; Netherlands Institute for Metals Research, Netherlands, 2003. p. 413-418.
- [6]. S. N. Samaras, G. N. Haidemenopoulos, "Modelling of microsegregation and homogenization of 6061 extrudable Al-alloy"; Laboratory of Materials, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Thessaly, Greece, 2007. p. 66-68.