

## ESTABILIDAD TÉRMICA DE ALEACIONES DE ALUMINIO PROCESADAS POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSP)

T. Dieguez <sup>(1)</sup> y H. G. Svoboda <sup>(1,3,4)</sup>

- (1) Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.  
(2) Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, ARGENTINA  
(3) Laboratorio de Materiales y Estructuras, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.  
(4) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA.

E-mail (autor de contacto): [hsvobod@fi.uba.ar](mailto:hsvobod@fi.uba.ar)

### RESUMEN

*El conformado superplástico (SPF) se ha constituido en el último tiempo como un proceso tecnológico de gran potencial basado en el comportamiento superplástico que evidencian diversas aleaciones en aplicaciones para diversos tipos de industrias entre las que se encuentra la aeroespacial y automotriz. Este comportamiento permite alcanzar deformaciones superiores al 200% y de hasta 8000%, debido al mecanismo de deslizamiento de bordes de grano (GBS). En el caso de superplasticidad por estructuras finas (FSS), la disminución del tamaño de grano favorece la ocurrencia del mencionado mecanismo de deformación. La modificación superficial de materiales mediante el proceso de Fricción-Agitación (FSP) es un tema de reciente desarrollo y deviene del proceso de soldadura por Fricción-Agitación (FSW). En este proceso el material es procesado mediante una herramienta rotante que en contacto con el material produce calor por fricción y genera un flujo plástico del material, produciendo un fuerte refinamiento de grano. Un a de los requerimientos principales para una aleación superplástica, además de una estructura de grano fino, es la estabilidad de dicha estructura fina con la temperatura. En este sentido son escasos los estudios sistemáticos realizados sobre la estabilidad térmica de las microestructuras obtenidas mediante FSP. El objetivo del presente trabajo es evaluar la estabilidad térmica de aleaciones de aluminio procesadas por FSP a fin de analizar su aplicabilidad como aleaciones superplásticas. Se procesaron con una y dos pasadas probetas de aluminio AA5052, AA5088 y AA7075, de 4 y 5 mm de espesor, bajo distintas condiciones de procesamiento. Se analizaron velocidades de rotación entre 388 y 680 rpm y velocidades de avance entre 35 y 146 mm/min. Las probetas obtenidas fueron caracterizadas microestructuralmente mediante microscopía óptica y se evaluó la presencia de defectos. Posteriormente se extrajeron muestras a las que se aplicaron diversos ciclos térmicos a temperaturas ente 310 y 550 C, analizando la estabilidad térmica de la microestructura obtenida. Se determinaron las temperaturas y tiempos críticos para el inicio de la recristalización de la microestructura procesada para las distintas aleaciones. Se observó una fuerte influencia de los parámetros de procesamiento, aumentando la estabilidad a medida que disminuye el índice de velocidades por debajo de 5 rev/mm.*

**Tópico:** 2

**Palabras clave:** FSP, aluminio, estabilidad térmica, recristalización, tamaño de grano

### 1. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento superplástico de aleaciones metálicas ha sido un campo de gran interés y desarrollo en los últimos tiempos, debido al lugar de importancia tecnológica que ha alcanzado el proceso de conformado superplástico de componentes de geometrías complejas [1]. La superplasticidad (SP) es uno de los varios micromecanismos de deformación a elevada temperatura, que está caracterizado por una extensa deformación plástica previa a la fractura [1], siendo en el modo de superplasticidad por Estructura Fina (FSS), el Deslizamiento de Fronteras de Grano (GBS) el mecanismo que controla la deformación superplástica [2]. La activación de este mecanismo está determinada fundamentalmente por la temperatura, la velocidad de deformación y el tamaño de grano (TG) [3]. Se ha reportado superplasticidad en materiales con una estructura fina y estable, que son deformados en el rango de velocidades de deformación entre  $10^{-5}$  y

$10^{-2}$  y temperaturas usualmente superiores a  $0,5T_m$ , siendo  $T_m$  la temperatura de fusión absoluta. El refinamiento del tamaño de grano presenta una fuerte influencia sobre la velocidad de deformación óptima para obtener FSS, aumentando dicha velocidad de deformación y disminuyendo la temperatura con la disminución del TG [1]. La estabilidad térmica de la microestructura fin del material es un aspecto crítico en la aplicabilidad de una aleación para superplasticidad.

El procesamiento de materiales mediante fricción agitación (FSP) ha sido recientemente desarrollado y presenta un gran potencial como técnica para refinamiento de grano, habiéndose reportado la activación del comportamiento superplástico en aleaciones procesadas por FSP [4]. Sin embargo son escasos los estudios sistemáticos sobre la estabilidad térmica de la microestructura obtenida mediante FSP en aleaciones de aluminio y la influencia de los parámetros del procesamiento.

El objetivo del presente trabajo evaluar la estabilidad térmica de diversas aleaciones de aluminio procesadas por fricción agitación (FSP), bajo distintas condiciones, a fin de analizar su aplicabilidad como aleación superplástica y la influencia de la condiciones de proceso sobre dicha estabilidad.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A fin de alcanzar los objetivos propuestos se procesaron mediante FSP probetas de aluminio AA5052, AA5088 y AA7075, mediante diferentes condiciones de procesamiento. Se trabajo con muestras de chapas laminadas de 3 mm para 5052 y de 4 mm para 7075 y 5088, cortadas a 150x75 mm. En la Tabla 1 se muestran las condiciones de procesamiento analizadas, así como el índice velocidades.

**Tabla 1.** Condiciones de procesamiento FSP analizadas para los distintos materiales.

Identificación	Nº Pasadas	Material	V rot (rpm)	Vav (mm/min)	Iv (rev/mm)
5052-A5	2	5052	680	146	4,7
5088-A3	2	5088	514	73	7,1
5088-A1	1	5088	514	35	14,7
5088-A2	1	5088	514	51	10,1
5088-A4	1	5088	514	98	5,2
5088-B2	1	5088	388	51	7,6
5088-B3	1	5088	388	73	5,3
5088-B4	1	5088	388	98	4,0
7075-A2	1	7075	514	51	10,1
7075-B2	1	7075	388	51	7,6

Para el 5052 se empleó una herramienta con pin cónico, de 3 mm de diámetro mínimo y un ángulo de  $15^\circ$ . En el 5088 y 7075 se empleó una herramienta con pin cuadrado de 2,5 mm entre caras y de 2,8 mm de longitud. Ambas herramientas presentaban hombro cóncavo de 12 mm de diámetro. El ángulo de inclinación de la herramienta utilizado fue de  $1,5^\circ$  en todos los casos. Asimismo, se muestra en la tabla el índice de velocidades que es una medida del aporte de calor introducido en el material [4].

**Tabla 2.** Temperaturas y tiempos de calentamiento analizados.

Material	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
5052	310	15
5052	350	15
5052	400	15
5088	350	15
5088	400	15
5088	450	15
5088	500	15
5088	550	15
7075	350	15
7075	400	15
7075	450	15
7075	500	15

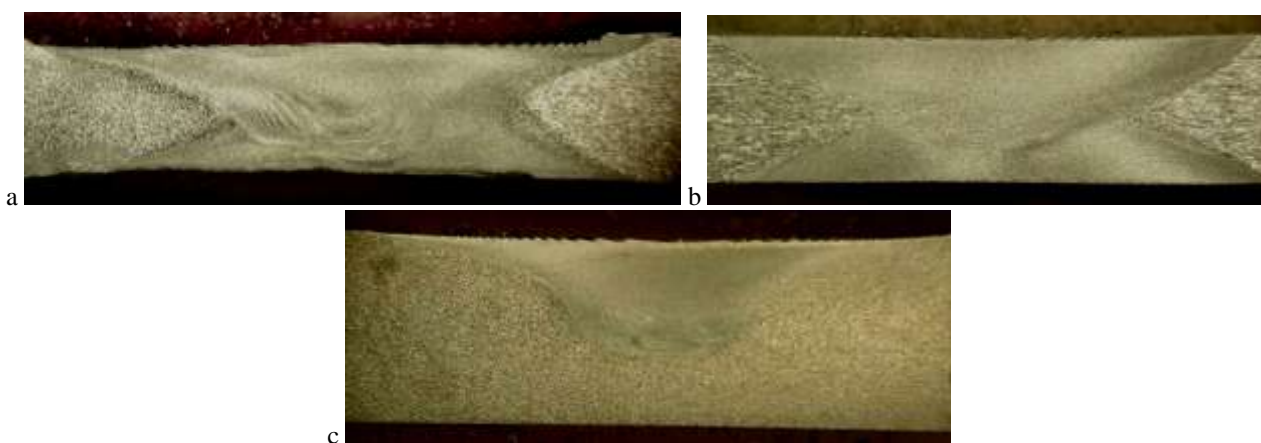
A fin de evaluar el efecto una sucesión de pasadas durante el FSP y de aumentar el área procesada, para ciertas configuraciones se procesaron probetas con 2 pasadas. La segunda pasada se realizó del lado opuesto de la chapa, coincidente en posición con la primera pasada, obteniéndose cierto grado de superposición entre ambas.

A partir de las muestras procesadas en las distintas condiciones se realizaron recocidos a distintas temperaturas. El ciclo de calentamiento, el horno y el tiempo de permanencia se definieron de modo de reproducir las condiciones en las que se realizarán los ensayos de superplasticidad. En la Tabla 2 se observan las temperaturas y tiempos analizados, cada material con las distintas condiciones de procesamiento. Las muestras se introdujeron con el horno a temperatura y el tiempo indicado en la Tabla 1 se considera desde la introducción de las muestras al horno hasta que se alcanza la temperatura deseada. Luego las muestras fueron extraídas y enfriadas en agua.

De las muestras sometidas a los diferentes ciclos térmicos se extrajeron cortes transversales que fueron preparadas para observación metalográfica mediante microscopía óptica (LM) analizándose la estabilidad de la microestructura a través del crecimiento anormal de grano.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se muestran las macrográficas de los diferentes materiales procesados mediante FSP.

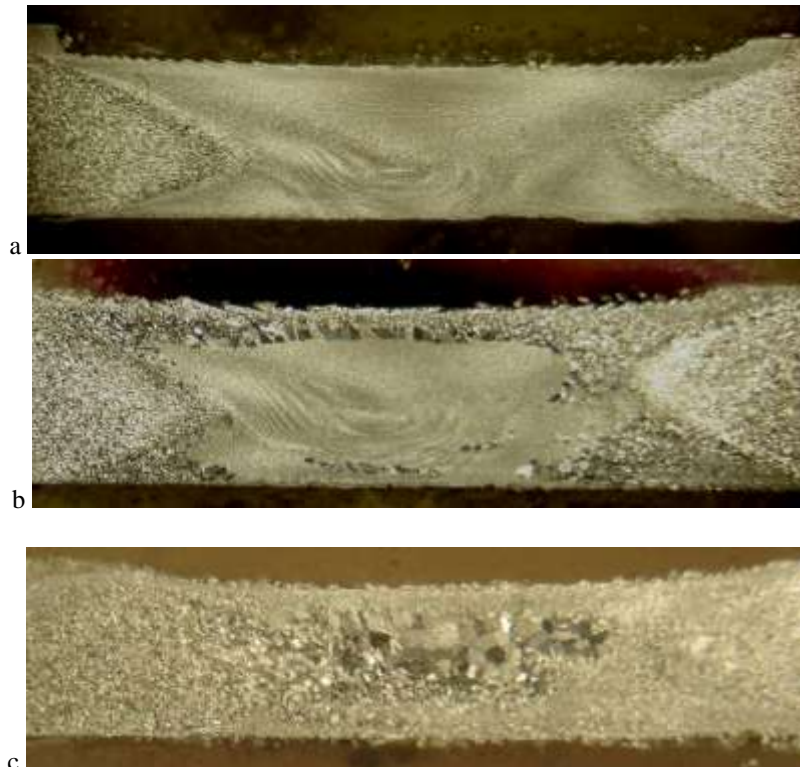


**Figura 1.** Macrográficas de probetas procesadas por FSP: a- 5052-1 (2 pas.), b-5088- (2 pas.) y c-7075 (1 pas.).

Como puede verse, en la zona del *nugget* (WN) se obtuvo un fuerte refinamiento de grano, respecto de la condición original (metal base). Asimismo se ve una excelente homogeneidad obtenida en la zona procesada, sin presencia de defectos. Para el 5052 y el 5088, la segunda pasada corresponde a la que se ubica en la parte superior de la imagen, ubicándose el lado de avance del lado izquierdo de las imágenes.

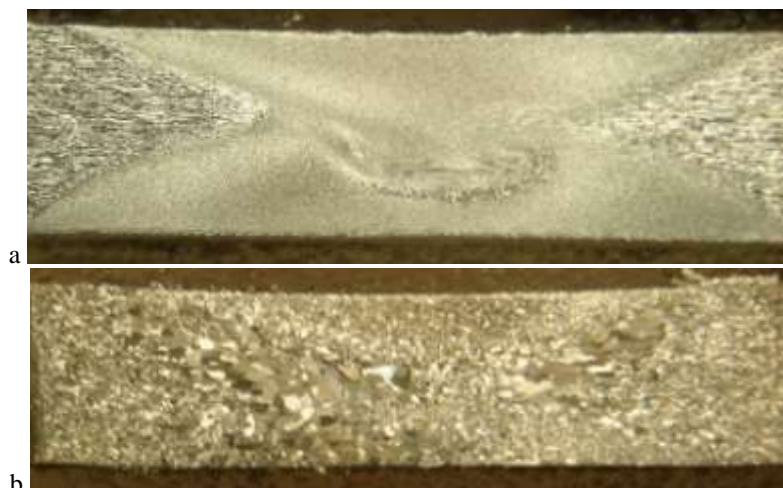
En las figuras 2 y 3 se analizan los resultados obtenidos para probetas de 5052 y 5088 procesados con dos pasadas, de acuerdo al procedimiento enunciado anteriormente, luego de los recocidos a distintas temperaturas. En la Figura 2 se observan las microestructuras de la probeta 5052-A5 procesada con dos pasadas, luego de recocidos a distintas temperaturas.

Como puede verse en la Figura 2a, la aleación 5052 a 310°C mantiene la estructura de grano fino obtenida mediante FSP sin observarse variaciones. Para 350°C (Figura 2b) se observa una recristalización parcial en las zonas superficiales, tanto de la primera como de la segunda pasada, con una mayor extensión y crecimiento de grano en la zona correspondiente a la segunda. En la parte central del WN se observa que se conserva la estructura refinada original. A su vez, puede observarse una recristalización incipiente en el material ubicado por debajo del pin en la segunda pasada. Para 400°C (Figura 2c) se observa una recristalización que abarca prácticamente toda la sección procesada, así como crecimiento anormal de grano en la zona central correspondiente a la segunda pasada. En este sentido, puede indicarse que la temperatura límite para este material con las condiciones de procesamiento empleadas se encuentra en 310°C, teniendo en cuenta un tiempo de 20 minutos. Desde el punto de vista del comportamiento superplástico de estas aleaciones, en ese rango de temperaturas, las velocidades de deformación necesarias para obtener superplasticidad son bajas ( $<10^{-4}$  1/seg) [4], requiriéndose tiempos mayores a los disponibles, por lo que la posibilidad de lograr deformaciones superplásticas es baja.



**Figura 2.** Macrograffías de 5052-A recocida: a- 310°C, b- 350°C y c-400°C,

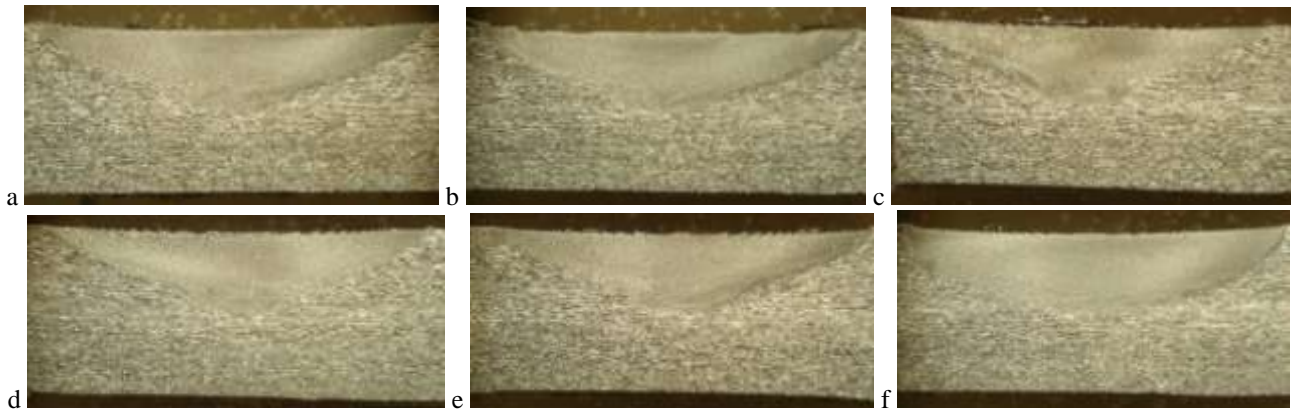
En la Figura 3 se observan las microestructuras de la probeta 5088-A3, procesada con 2 pasadas, luego recocidos a distintas temperaturas.



**Figura 3.** Macrograffías de 5088-A3 y recocida: a- 350°C y b-550°C.

Para 350°C (Figura 3a) se conserva la estructura de grano fina prácticamente en toda la sección procesada, excepto por una pequeña zona de material ubicado debajo del pin de la herramienta correspondiente a la segunda pasada, donde se observa una incipiente recrystalización. Para 550°C (Figura 3b) puede verse una recrystalización en toda la sección procesada, observándose en algunas zonas crecimiento anormal de grano, hasta tamaños mayores que el del material base. Para este material con estas condiciones de procesamiento la temperatura límite se encuentra cerca a los 350°C.

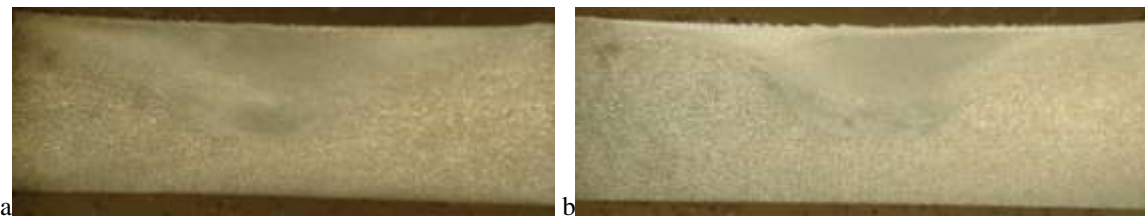
En las Figuras 4 a 11 se muestran los resultados obtenidos para las probetas de 5088 y 7075, procesadas con solo 1 pasada y diferentes parámetros de FSP, luego de recocidos a temperaturas entre 350°C y 500°C. En la Figura 4 se observan las microestructuras obtenidas para probetas de 5088 procesadas con distintos parámetros y recocidas a 350°C.



**Figura 4.** Muestras procesadas de AA5088 a 350°C: a- A1, b- A2, c- A4, d- B2, e- B3, f- B4.

Como puede verse a 350 °C, la microestructura fue térmicamente estable para las distintas condiciones de procesamiento analizadas para este material.

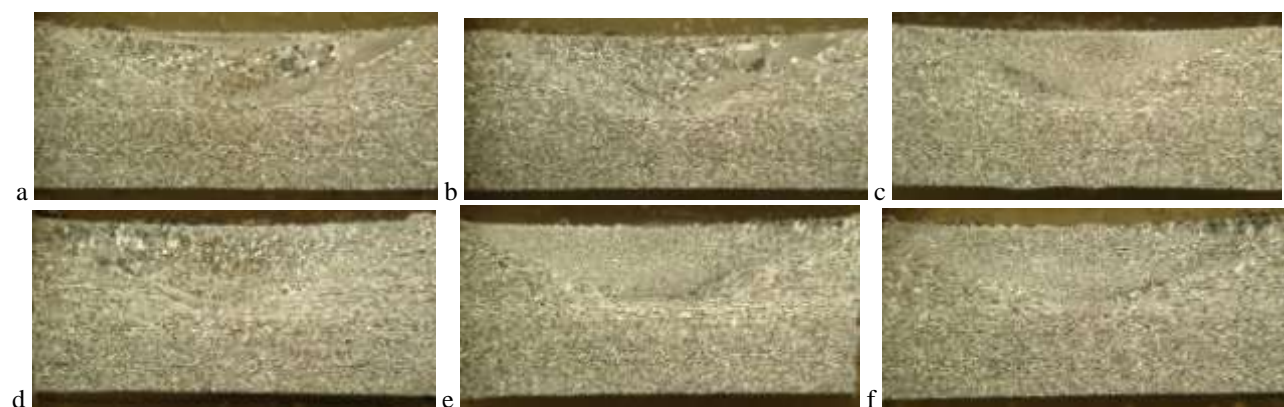
En la Figura 5 se observan las microestructuras obtenidas para probetas de 7075 procesadas con distintos parámetros y recocidas a 350°C.



**Figura 5.** Muestras procesadas de AA7075 a 350°C: a- A2, b- B2.

Del mismo modo que para el 5088, el 7075 procesado se mantuvo estable a 350 °C para ambas condiciones de procesamiento.

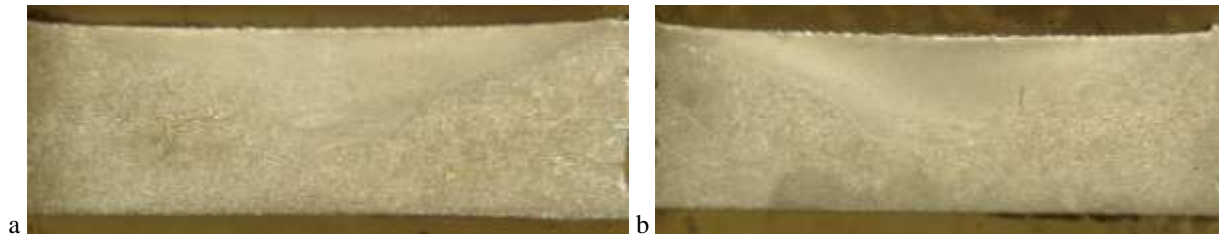
En la Figura 6 se observan las microestructuras obtenidas para probetas de 5088 procesadas con distintos parámetros y recocidas a 400°C.



**Figura 6.** Muestras procesadas de AA5088 a 400°C: a- A1, b- A2, c- A4, d- B2, e- B3, f- B4.

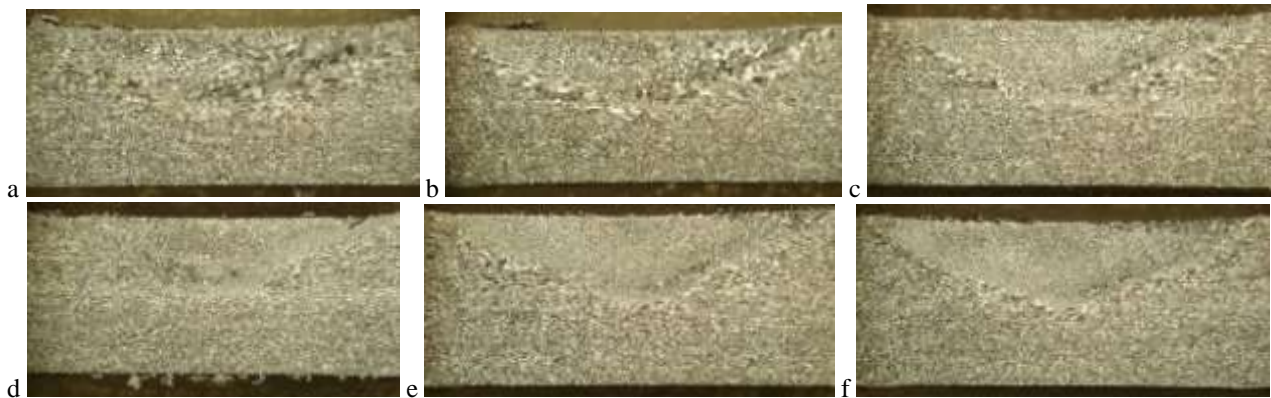
Puede verse que para 400 °C, a 514 rpm para las menores velocidades de avance se produce recristalización, mientras que para 98 mm/min la microestructura se mantiene estable. Para 388 rpm, la estabilidad térmica se logra para 51 y 98 mm/min.

En la Figura 7 se observan las microestructuras obtenidas para probetas de 7075 procesadas con distintos parámetros y recocidas a 400 °C. Puede verse que para estas condiciones de procesamiento la microestructura se mantiene estable sin observarse recristalización.



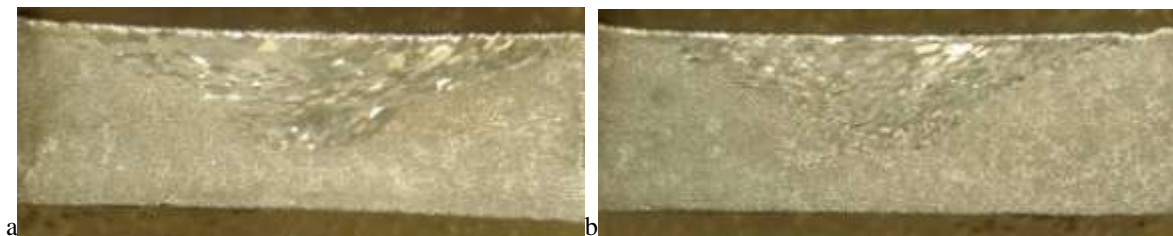
**Figura 7.** Muestras procesadas de AA7075 a 400°C: a- A2, b- B2.

En la Figura 8 se observan las microestructuras obtenidas para probetas de 5088 procesadas con distintos parámetros y recocidas a 450 °C. De la misma forma que para 400 °C, las condiciones A4, B3 y B4 no evidenciaron recristalización, mientras que las A1, A2 y B2 presentaron recristalización parcial.



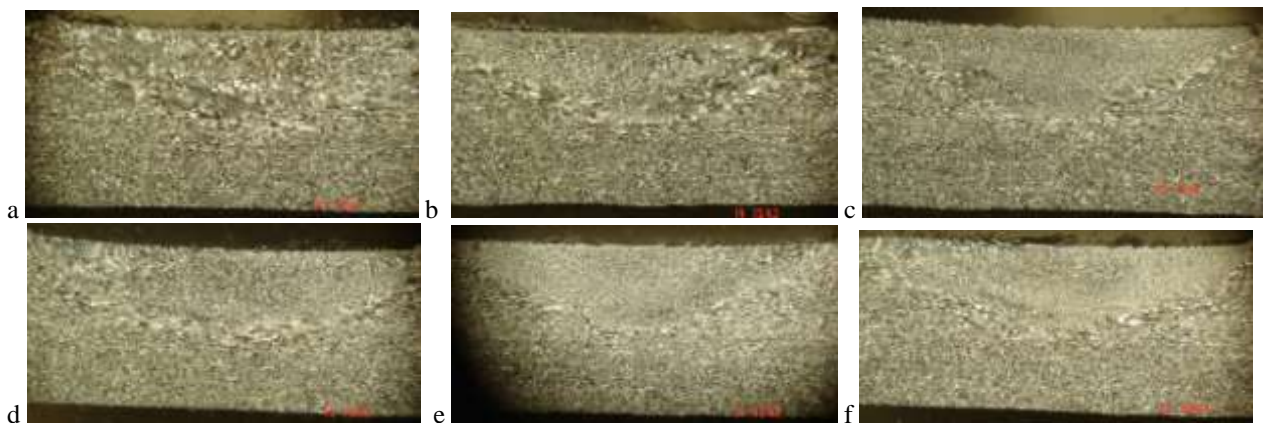
**Figura 8.** Muestras procesadas de AA5088 a 450°C: a- A1, b- A2, c- A4, d- B2, e- B3, f- B4.

En la Figura 9 se observan las microestructuras obtenidas para probetas de 7075 procesadas con distintos parámetros y recocidas a 450°C.



**Figura 9.** Muestras procesadas de AA7075 a 450°C: a- A2, b- B2.

Como puede verse a esta temperatura ambas condiciones fueron inestables térmicamente, perdiéndose la estructura de grano fina en la zona del WN.

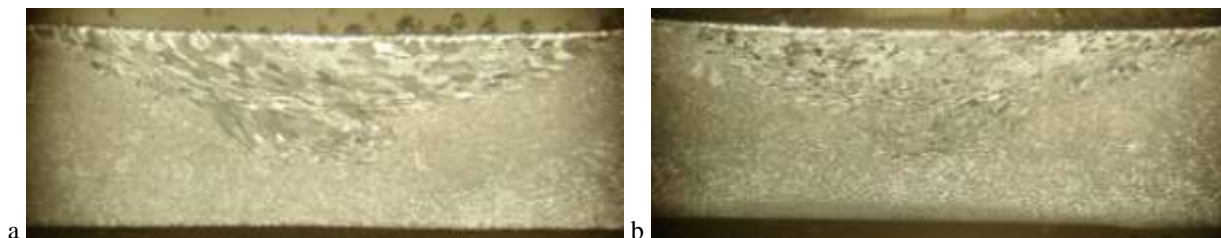


**Figura 10.** Muestras procesadas de AA5088 a 500°C: a- A1, b- A2, c- A4, d- B2, e- B3, f- B4.

En la Figura 10 se observan las microestructuras obtenidas para probetas de 5088 procesadas con distintos parámetros y recocidas a 500°C.

Nuevamente, la microestructura se mantiene estable para las condiciones A4, B3 y B4, sin evidenciar recristalización.

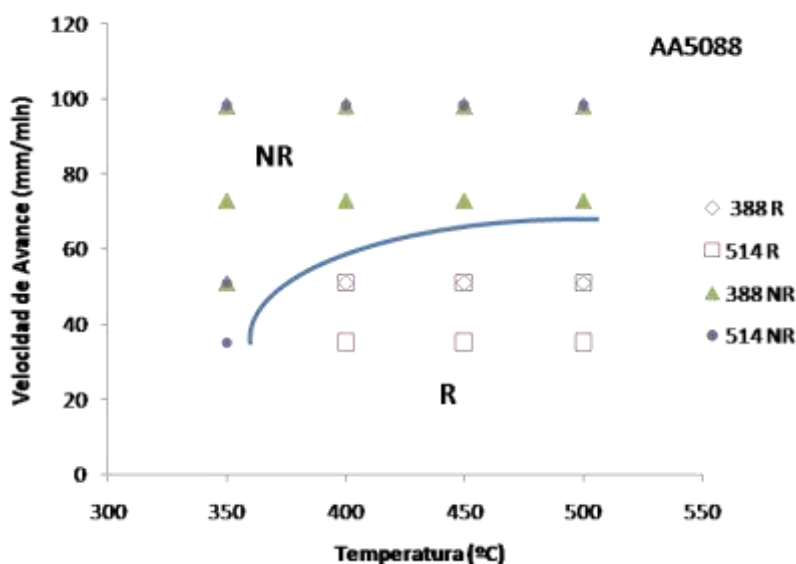
En la Figura 11 se observan las microestructuras obtenidas para probetas de 7075 procesadas con distintos parámetros y recocidas a 500°C.



**Figura 11.** Muestras procesadas de AA7075 a 500°C: a- A2, b- B2.

De acuerdo con lo observado para 450 °C, a esta temperatura ambas condiciones fueron también inestables térmicamente, perdiéndose la estructura de grano fina en la zona del WN.

En la Figura 12 se puede ver el efecto de los parámetros de procesamiento sobre la recristalización sobre la aleación AA5088.



**Figura 12.** Efecto de los parámetros de procesamiento FSP sobre la estabilidad térmica de la estructura de la aleación AA5088, en función de la temperatura de recocido.

Como puede verse, este material procesado con una pasada, no evidenció recristalización al ser procesado con las menores velocidades de rotación y las mayores velocidades de avance, o sea, un menor índice de velocidades. Esto implica un conjunto de parámetros que minimice el calor aportado al material, por lo que la deformación introducida durante el procesamiento se produce a menor temperatura [4]. En término de las temperaturas límite para el conformado superplástico, este material se mostró estable hasta 500°C al emplear condiciones de procesamiento de con un índice de velocidades menor que 5,3 rev/mm. Para el 7075 el límite de estabilidad se encontró en 400 °C, mientras que para el 5052 estuvo en 310 °C.

Estas observaciones también son aplicables a los otros materiales analizados. En general en la recristalización se observó en primer lugar en el lado de avance, y en ciertos casos en la zona superior y en la zona de material ubicado debajo del pin. Esto estaría asociado a la distribución de deformaciones producida durante el FSP en el volumen de material.

La utilización de dos pasadas acelera el proceso recristalización de la microestructura, disminuyendo su estabilidad.

#### 4. CONCLUSIONES

Se procesaron mediante FSP muestras de aleaciones de aluminio AA5052, AA5088 y AA7075 para su aplicación en conformado superplástico, empleando distintos parámetros de procesamiento. Sobre las muestras procesadas se evaluó la influencia del material y de los parámetros de procesamiento sobre la estabilidad térmica de la estructura fina obtenida a temperaturas entre 310 y 550°C. Se observó una fuerte influencia de los parámetros de procesamiento sobre la estabilidad térmica de la microestructura. En este sentido, las muestras procesadas menor velocidad de rotación y mayor velocidad de avance (índice de velocidades menor que 5,3 rev/mn) fueron las que produjeron una estructura fina con mayor estabilidad térmica, para todos los materiales. Asimismo, el AA5088 presentó una estructura estable hasta 500°C cuando fue procesada con una pasada, 388 rpm de velocidad de rotación de la herramienta y 98 mm/min de velocidad de avance. A su vez el AA 5052 procesado con dos pasadas presentó estabilidad térmica hasta 310°C y el AA 7075 procesado con una pasada hasta 400°C, con los parámetros de procedimiento empleados en el presente trabajo. Estas temperaturas mencionadas para los distintos materiales analizados se constituyen en los límites superiores para la temperatura de conformado superplástico.

#### 5. REFERENCIAS

1. T. Ha and Y. Chang, "An internal variable approach to grain size effect on superplasticity of a Pb-Sn eutectic alloy"; Scripta Materialia, Vol. 41 (1999), pp 103-108.
2. Sherby and J. Wadsworth, "Superplasticity – Recent advances and future directions"; Progress in Materials Science, Vol. 33 (1989), p. 169-221.
3. A. Mukherjee, "An examination of the constitutive equation for elevated temperature plasticity"; Materials Science and Engineering A, Vol. 322 (2002), p. 1-220.
4. Friction Stir Welding and Processing, Eds. R. Mishra and M. Mahoney, ASM, (2007), 360 p.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad de Buenos Aires por el apoyo económico prestado para el desarrollo del presente trabajo y al personal del Laboratorio de Materiales y Estructuras de la FIUBA por su colaboración.