

## Microfisuración en el proceso de repujado de aluminio

Oldani, C.<sup>I</sup>; Aguirre, L.<sup>II</sup>; Mancini, R.<sup>II</sup>

<sup>I</sup> Departamento de Materiales y Tecnología – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba – Vélez Sarsfield 1611 (X5016GCA) Córdoba, Argentina

e-mail: [coldani@efn.uncor.edu](mailto:coldani@efn.uncor.edu), [aeroing@arnet.com.ar](mailto:aeroing@arnet.com.ar)

<sup>II</sup> Instituto Nacional de Tecnología Industrial – Córdoba – Vélez Sarsfield 1561 (X5016GCA) Córdoba - Argentina

e-mail: [rmancini@inti.gov.ar](mailto:rmancini@inti.gov.ar)

---

### RESUMEN

El repujado de aleaciones de aluminio es un proceso muy antiguo, pero muy poco estudiado, quizá debido al bajo tonelaje procesado por este método, lo que lo hace poco relevante frente a otros procesos de deformación plástica. Sin embargo, es un método económicamente competitivo para la fabricación de recipientes de presión livianos, consistentes en un *liner* de aleación de aluminio reforzado con fibra de vidrio.

Este proceso presenta el inconveniente de la formación de microfisuras que sirven como concentradores de tensión y provocan la fractura del recipiente durante la carga cíclica. Se encontró que esto sucede aún con longitudes de grieta muy inferiores a las predichas en la bibliografía para la aleación AA6061.

Se estudió la formación de las microfisuras y la influencia de dos variables de proceso, temperatura de calentamiento y velocidad de deformación plástica, sobre las características de las mismas. Las experiencias muestran que temperaturas más altas y menores velocidades de conformación reducen la formación de microfisuras.

**Palabras claves:** aluminio, aleación AA6061, repujado, microfisuración.

---

## Microcracks in the aluminum spinning process

### ABSTRACT

The aluminum alloys spinning process is a very old process but very little studied, perhaps due to the low tonnage processed by this method, which makes it less relevant than other processes of plastic deformation. Nevertheless, it is an economically competitive method for the manufacture of light pressure vessels, consisting of a liner of aluminum alloy reinforced with fiber glass.

This process presents the disadvantage of the formation of microcracks that serve as stress risers and cause the fracture of the container during the cyclical load. This happens with crack sizes much smaller than the ones predicted in the bibliography for the alloy AA6061.

The formation and the characteristics of the microcracks were studied by analysing process variables such as heating temperature and plastic deformation velocity. The experiments showed that higher temperatures and smaller forming velocities reduced the formation of microcracks.

**Keywords:** aluminum, AA6061 alloy, spinning, microcracks.

---

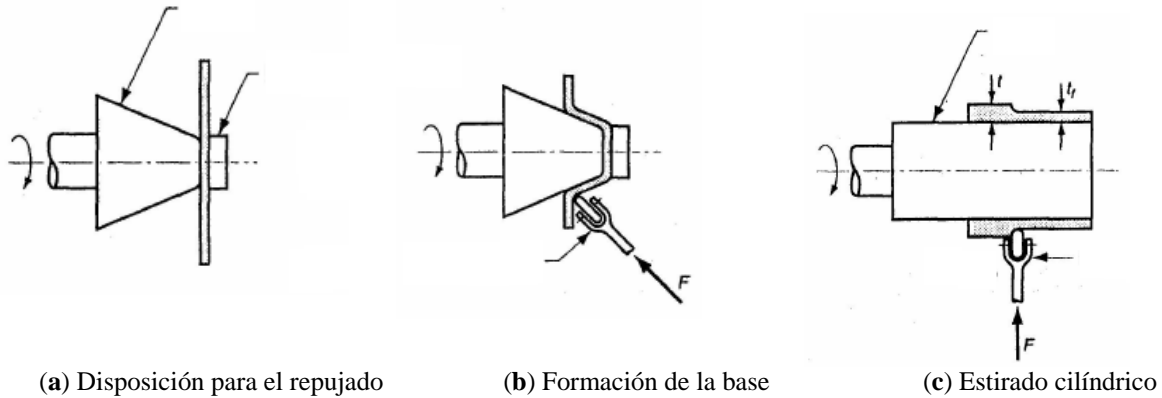
## 1 INTRODUCCIÓN

Una de las variantes para la confección de cilindros livianos para contención de gases a presión consiste en un *liner* de aluminio envuelto con PRFV (plástico reforzado con fibra de vidrio). La ventaja competitiva de este sistema está en su bajo peso [1 - 5].

El proceso de fabricación del *liner* consta de las siguientes etapas [6, 7]:

- 1) Corte de un disco a partir de una planchuela de  $1 \times 1 \times 0,01 \text{ m}^3$
- 2) Calentamiento del disco hasta  $400 \text{ }^\circ\text{C}$
- 3) Volteo por repujado, con la que se obtiene un recipiente cilíndrico (500 mm de largo) cerrado en la base (centro del disco), de un espesor de 7,5 mm. (Esquema 1)

- 4) Calentamiento del cilindro a 400 °C
- 5) Estirado por repujado mediante la cual se estira la altura del cilindro con el consiguiente adelgazamiento de la pared
- 6) Cierre del extremo abierto, dejando una abertura para la ubicación de la válvula
- 7) Tratamiento térmico de envejecido.



**Esquema 1:** Proceso de repujado

Durante los ensayos para homologación de estos cilindros livianos han acontecido varios casos de fisuración de los mismos, en los que la rotura está relacionada con las microfisuras producidas durante la fabricación del *liner*. Estas fisuras son inherentes al proceso de fabricación, apareciendo ya durante la primera etapa de volteo.

El proceso de repujado utilizado para la fabricación de los cilindros provoca la deformación plástica necesaria para adquirir la forma requerida. Sin embargo, este proceso origina microfisuras en la cara interna del *liner*. Estos defectos tienen influencia en la resistencia a la fatiga del material [8] durante los ensayos hidráulicos de ciclado ( $10^4$  ciclos entre 0 y 20 MPa, seguido de 30 ciclos a una presión máxima de 33,3 MPa), que prescribe la norma CAN / CSA – B 339 para su homologación.

En este trabajo se siguen las etapas de aparición de las microgrietas durante el repujado de la etapa de volteo. El estudio fue realizado en una empresa de nuestro medio y se analiza la influencia de las variables de proceso, temperatura de calentamiento y velocidad de deformación plástica, en la formación de estos defectos.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL

Se utilizó una chapa de aleación de aluminio AA 6061, cuya composición química es la mostrada en la Tabla 1.

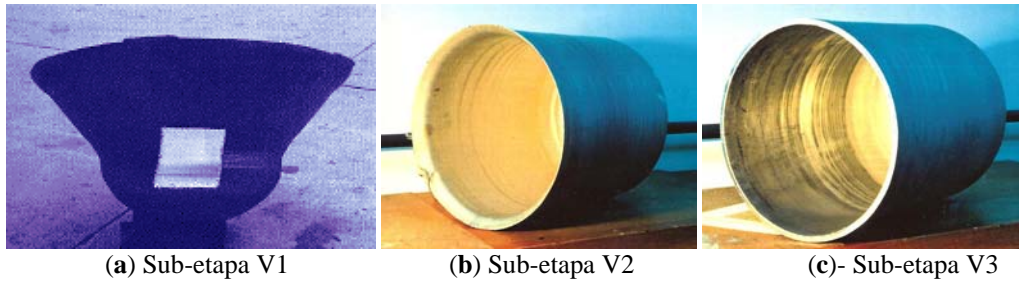
**Tabla 1:** Composición química de la aleación estudiada

%Si	%Mg	%Fe	%Cu	%Mn	%Zn	%Ni	%Cr	%Ti	%Sn
0,6	0,95	0,5	0,25	0,03	0,01	0,005	0,18	0,03	---

Se observaron defectos superficiales en la cara interna del *liner*, en la etapa de volteo, y se realizó un seguimiento del proceso de formación de las microfisuras. Para ello, se dividió la etapa de volteo en tres sub-etapas, que llamaremos V1, V2 y V3, correspondientes a tres configuraciones distintas, tal como se muestra en la Figura 1a, 1b y 1c, respectivamente. En la Figura 1a (etapa mostrada en el Esquema 1b) se muestra el lugar de extracción de material para el estudio metalográfico.

Se analizó el proceso de repujado con parámetros convencionales (los tradicionalmente utilizados por la empresa) y también se estudió lo que sucedía cambiando algunas de las variables del proceso. Los parámetros de velocidad y temperatura de calentamiento de la etapa de volteo, se ven en la Tabla 2.

El análisis de las microfisuras se realizó por microscopía óptica en cortes perpendiculares al eje del *liner* y con microscopía electrónica de barrido (MEB). Se midió la longitud de estos defectos en las tres sub-etapas de volteo.



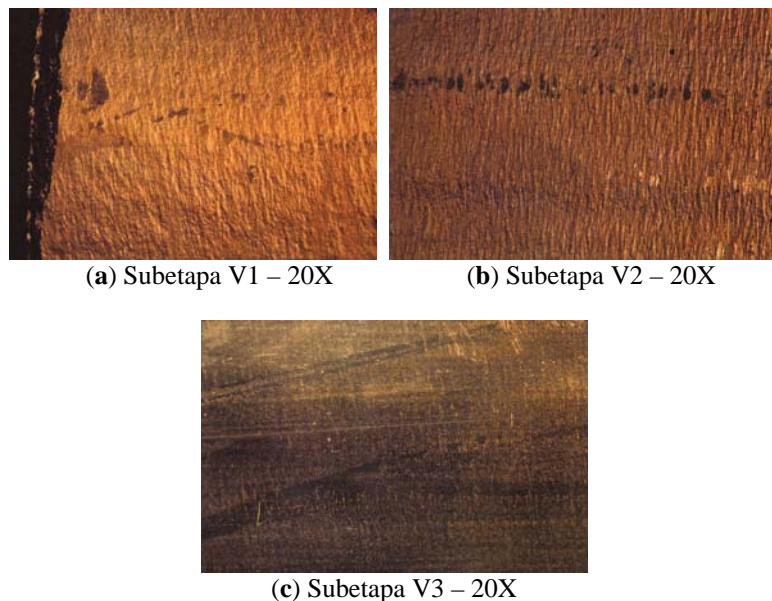
**Figura 1:** Configuración del liner en las sub-etapas de volteo

**Tabla 2:** Parámetros estudiados de la etapa de volteo

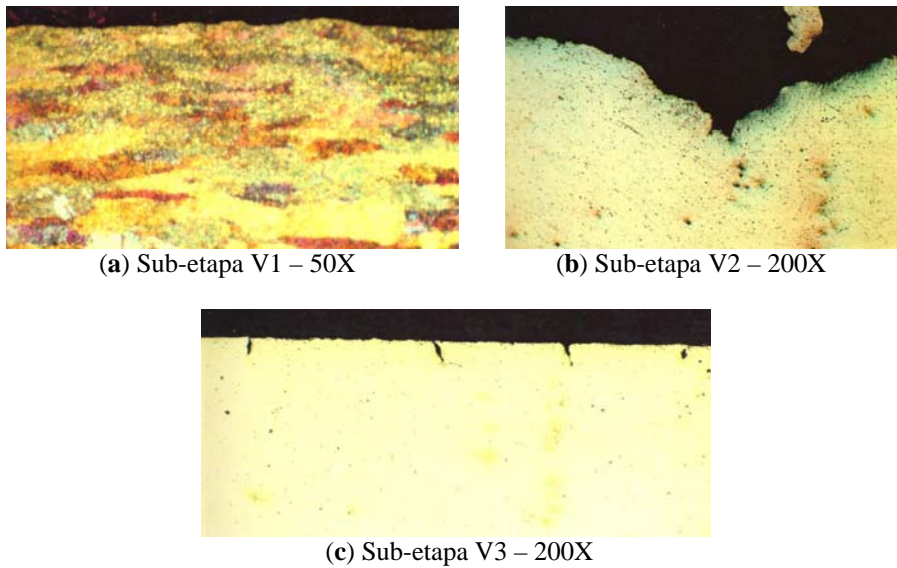
	Temperatura de calentamiento Inicial (°C)	Velocidad de rotación en la etapa de volteo
Repujado convencional (RC)	400	----
Modificación 1 (M1)	520	----
Modificación 2 (M2)	400	mitad que los dos casos anteriores

### 3 RESULTADOS

Como se ve en la Figura 2a, 2b y 2c, la rugosidad de la superficie interna del *liner* RC, va cambiando en las diferentes sub-etapas. La observación microscópica de cortes perpendiculares al eje del *liner* muestra que es recién en la sub-etapa V2, donde aparecen pliegues muy abiertos (comparar Figura 3a y 3b). Las discontinuidades abiertas en la sub-etapa V2 comienzan a cerrarse en la sub-etapa V3 (Figura 3c).



**Figura 2:** Rugosidad de la superficie interna del *liner* en las sub-etapas de volteo correspondientes al *liner* RC



**Figura 3:** Discontinuidades de la superficie interna del *liner* en las sub-etapas de volteo correspondientes al *liner* RC

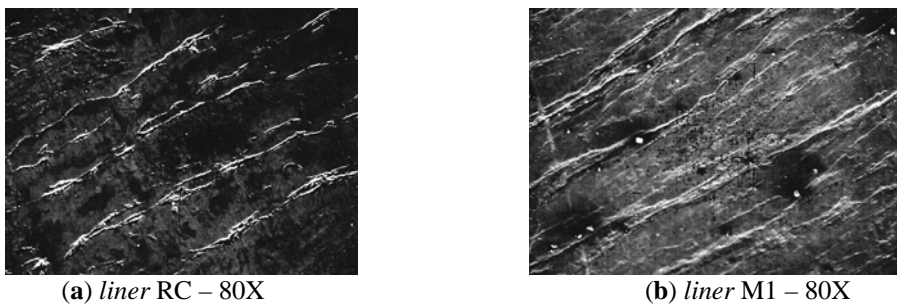
En el *liner* M1, usando una temperatura de calentamiento de 520 °C, las discontinuidades están más cerradas (comparar Figura 3c con Figura 4). Este aspecto se visualiza también en la observación con MEB. En las Figuras 5a y 5b se muestra la superficie interna del *liner* RC y M1, en la sub-etapa V3, respectivamente.

En el *liner* M2 procesado a menor velocidad de volteo, se observan discontinuidades redondeadas (Figura 6).

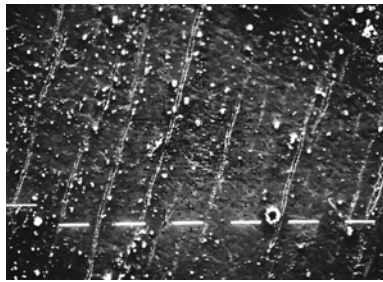
Se llevó a cabo la medición de las longitudes de fisura que aparecen en la cara interna de los *liners*. En la Figura 7, se muestra la comparación entre las longitudes de fisura para las tres etapas de volteo (V1, V2 y V3), donde se observa el incremento de dicha longitud con el aumento del grado de deformación. Para monitorear el efecto de la temperatura de deformación sobre la longitud y ancho de las fisuras, en la Figura 7, también se pueden comparar los resultados obtenidos en las muestras RC y M1. Como se aprecia, las fisuras son más angostas y largas en el material procesado a baja temperatura, lo que constituye un factor importante de concentración de tensiones.



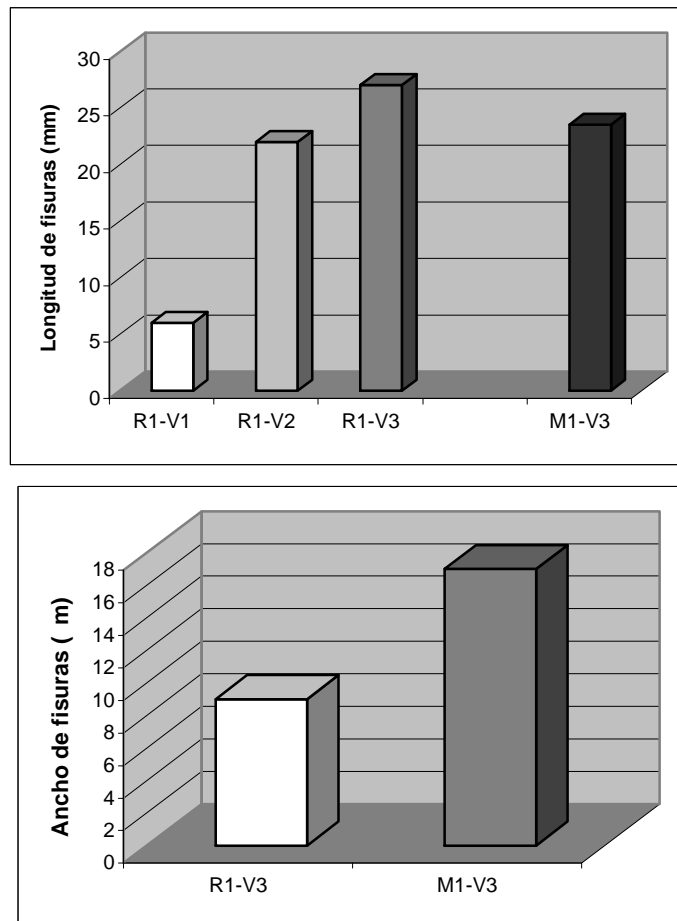
**Figura 4:** Discontinuidades del *liner* M1 procesado a 520 °C – 500X



**Figura 5:** Microscopía MEB de las fisuras (sub-etapa V3)



**Figura 6:** Discontinuidades del *liner* procesado a menor velocidad de volteo (M2) – 80X



**Figura 7:** Comparación entre las longitudes y anchos de fisura en las tres sub-etapas de volteo (RC) y en el *liner* precalentado a 520 °C (M1)

#### 4 DISCUSIÓN

La rotura producida en los cilindros durante los ensayos de ciclado está ligada al grado de concentración de tensiones que produce la presencia de discontinuidades muy agudas. Cuando el material presenta fisuras de longitud significativa, la fractura se desarrolla a partir de las mismas. La vida en fatiga se vería disminuida en por lo menos 10 veces con respecto a la vida útil del material, ya que la rotura durante la aplicación de esfuerzos cíclicos se puede iniciar con mayor facilidad en las microfisuras existentes en la superficie interna del los *liners*.

Según Bhunyam y Carter [9], la aleación AA 6061 T6 no es susceptible a la propagación de grietas bajo cargas sostenidas (SLC: Sustained-Load-Cracking). En consecuencia, el material podría presentar grietas con una longitud de hasta el 5% del espesor, sin que éstas se conviertan en grietas críticas luego de 10700 cargas. En nuestro caso, los valores de longitud de grieta máximos medidos para los *liner* RC y M1 fueron de 0,085 y 0,063 mm, respectivamente, valores que están muy por debajo del 5% del espesor y sin embargo, se produce la fractura del material a partir de estos defectos.

El aumento de la temperatura de deformación en la etapa de volteo, así como la disminución de la velocidad de rotación del *liner* durante la misma etapa, mejoran las características de las fisuras presentes en la superficie interna en cuanto a su condición de concentradores de tensión.

Para analizar la causa de aparición de las microfisuras en la etapa de volteo, se relevaron las temperaturas durante el proceso de repujado de un *liner* RC. Los resultados muestran que, a pesar de que el material es calentado externamente y que el aluminio tiene una gran transferencia térmica, el efecto de enfriamiento del molde es importante. Esto hace que la superficie interna de material esté siendo deformada en frío con el consiguiente endurecimiento por acritud y disminución de las posibilidades plásticas del material.

## 5 CONCLUSIONES

De este trabajo se puede concluir que

- No hay información detallada en la bibliografía sobre el proceso de repujado para las aleaciones AA 6061, a pesar de la antigüedad del método.
- A pesar de la estrecha relación entre las microfisuras en la pared interna del *liner* y las roturas por fatiga del mismo, la presencia de las mismas es inherente al proceso de deformación. Por lo tanto se debe intentar disminuir su efecto como concentradores de tensión.
- Se analizaron dos posibles soluciones: a) aumentar la temperatura de calentamiento y b) disminuir la velocidad de deformación plástica. De las dos maneras se disminuyen la agudeza del defecto (microfisuras)
- En base a la medición de longitud de fisura se ve como más conveniente disminuir la velocidad de giro del *liner* durante la etapa de volteo.

En lo referido a la temperatura de precalentamiento, se reconoce como más importante la mejora del sistema de calentamiento para mantener dicha temperatura en la pared interior del *liner*.

## 6 REFERENCIAS

- [1] *ASM Specialty Handbook - Aluminum and aluminum alloys*, 1 ed, ASM International, New York, USA 1994.
- [2] HARDIN, A., “Aluminium transformation technology and applications”, In: *ASM International Symposium*, pp. 152-156, Puerto Madryn, Argentina, October 1978.
- [3] “Gas Cylinders – High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas fuel for automotive vehicles”, In: *International Standard ISO 11439*, 1 ed., 2000.
- [4] “Low-cost, Low-weight GNC cylinder development”, In: *Institute of Gas Technology – GRI-99/0211*, September 1999.
- [5] “Compressed natural gas storage optimization for natural gas vehicles”, In: *Powertech Labs Inc., Canada V3W 7R7*, December 1966
- [6] *Spinning, forming and forging*, In: *Metals Handbook*, 9 ed., v. 14, pp. 599-604, ASM International, New York, 1988.
- [7] “Spinning”, In: Aluminum Company of America (ALCOA) (eds), *Forming Alcoa Aluminium, Chapter 7, Forming ALCOA Aluminum, Pennsylvania, 1995*.
- [8] STALEY, J., “Properties related to fracture toughness”, *ASTM STP 605*, pp. 71-96, Philadelphia, 1976.
- [9] BHUYAN, G.S., CARTER, D.H., “Sustained-load-cracking characteristics of aluminum-lined NGV cylinders”, *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, v. 60, n. 2, pp. 183-192, 1994.