

## CAMBIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ALUMINIO AA-1100 DEFORMADO USANDO UN DISPOSITIVO ECASE

*Daniel Peláez<sup>1</sup>, Patricia Fernández-Morales<sup>2</sup>, Emigdio Mendoza<sup>1\*</sup>, Cesar Isaza<sup>3</sup>*

1: Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

2: Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

3: Facultad de Minas, Escuela de Materiales y Minerales, Universidad Nacional de Colombia

\*Contacto: emigdio.mendoza@upb.edu.co

### RESUMEN

La deformación plástica severa (SPD) es una técnica de conformado de metales, la cual consiste en aplicar grandes deformaciones sin cambios dimensionales significativos, lo que promueve el refinamiento de grano e incrementa las propiedades mecánicas del material deformado. El presente trabajo analizó el cambio de propiedades mecánicas de una lámina de aleación de aluminio AA-1100 de 3mm de espesor, la cual fue deformada plásticamente aplicando esfuerzos de cizalla a un ángulo de 135°, por medio de un dispositivo ECASE. Se estudió el efecto de múltiples pasos de la lámina de aluminio (1, 2, 3, 4 y 5 pasos) y se caracterizó el comportamiento mecánico y el cambio microestructural de la aleación de aluminio, contrastándolo con el proceso de laminación por reducción de área, para ello se evaluó el cambio en la dureza, la ductilidad y la resistencia de la aleación de aluminio luego de cada uno de los procesos. Con el proceso SPD se logró incrementar las propiedades mecánicas de las láminas estudiadas, con respecto a las obtenidas por laminación tradicional, sin apreciar, luego de la cizalla un cambio significativo en las características microestructurales de dicha aleación.

**Palabras Clave:** *SPD, ECASE, Deformación, Cizalladura, Aluminio*

### ABSTRACT

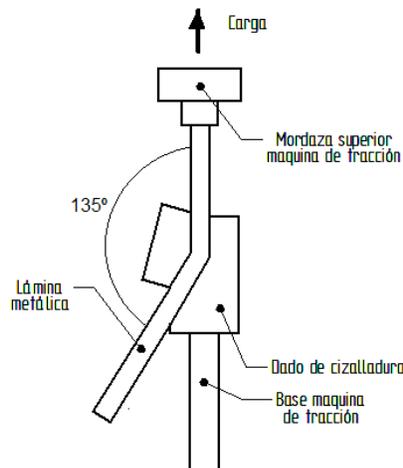
The severe plastic deformation (SPD, for its acronym in English) is a metal forming technique, which consist to apply large deformations without significant dimensional changes, allowing for grain refinement and increase of the mechanical properties over the deformed material. This study analyzed the change of mechanical properties of a sheet of aluminum alloy AA-1100 in 3mm thickness, which was plastically deformed by applying shear forces at an angle of 135°, by means of an ECASE device. The effect of multiple passes of the aluminum sheets (1 to 5 steps) and characterized the mechanical and microstructural change of the aluminum alloy, contrasting with the rolling process by reduction of area, it was evaluated for the change in hardness, ductility and strength of the aluminum alloy after each processes. SPD process was able to increase the mechanical properties of the sheets tested, compared to those obtained by conventional lamination without appreciate significant change in the microstructural characteristics of the alloy after the shear stress application.

**Key words:** *SPD, ECASE, Deformation, Shear stress, Aluminum*

## 1 INTRODUCCIÓN

La deformación plástica severa (SPD por sus siglas en inglés) es considerada como una técnica de conformado, usada para inducir grandes cantidades de deformación sin mayores cambios dimensionales [1], con el objetivo de producir piezas con alta resistencia mecánica para la industria automotriz y aeronáutica [2, 3]. Estas técnicas de deformación han captado ampliamente el interés de la comunidad científica en los últimos 10 años debido a las características físicas y mecánicas que se logran obtener en metales [4-6]. Los procesos SPD se fundamentan en una deformación plástica severa que induce una alteración de la microestructura y un refinamiento de grano llegando a niveles micrométricos, o incluso nanométricos [7-8].

El ECASE (*equal-channel angular sheet extrusion*) es una variación del ECAP (*equal-channel angular pressing*) desarrollada por Seagal en 1977 en la URSS [9]. El ECASE es una técnica de deformación que permite aplicar en forma continua esfuerzos cortantes en láminas metálicas delgadas. Es un proceso que aún se encuentra en desarrollo para implementación a nivel industrial [10], y en general, consiste en hacer pasar una lámina por un dado que aplica esfuerzos cortantes sobre la lámina, este dado consta de dos canales con sección transversal similar, los cuales se interceptan en un ángulo donde se produce la cizalladura [11]. Generalmente los dados son fabricados con ángulos entre  $90^\circ$  y  $135^\circ$ , ya que ángulos más agudos tienden a producir una componente de fuerza en tensión que supera a la cizalladura aplicada [12]. En la Figura 1 se observa un esquema del dado y el proceso de deformación realizado.



**Figura 1.** Esquema del proceso ECASE

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para la experimentación se usó una aleación de aluminio AA-1100 con un espesor de 3mm, un ancho de 50mm y una longitud de 200mm. El dado usado fue fabricado en acero de herramientas D1 con un ángulo de  $135^\circ$ , como se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Las láminas fueron inicialmente prensadas con el dado, doblándolas y ajustando la abertura del dado al espesor de la lámina. Posteriormente, se montó el sistema en una máquina de ensayo universal

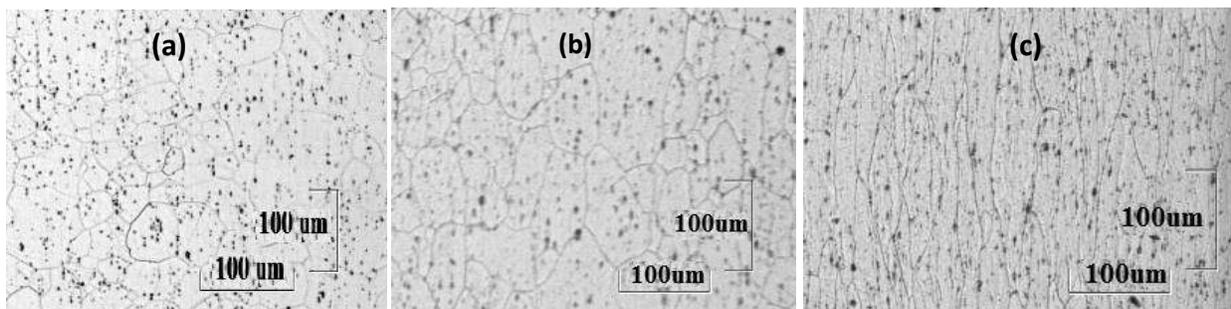
INSTRON 5582 para hacer pasar la lámina a una velocidad de 30mm/min a temperatura ambiente.

Para el procesado por cizalladura se conservó la orientación de la lámina luego de cada paso 1, 2, 3, 4 y 5 designados en el transcurso del trabajo como P1, P2, P3, P4 y P5, respectivamente [9, 13]. Mientras que las láminas deformadas por laminación tradicional (reducción de área), fueron trabajadas en frío 25%, 40%, 73%, 80% y 91%, y designadas como A125, A140, A173, A180 y A191, respectivamente. Posteriormente, se realizó la caracterización mecánica y microestructural de cada una de las muestras deformadas. Para evaluar microestructura, las probetas fueron montadas en una resina acrílica y posteriormente pulidas hasta alcanzar pulido espejo, las muestras fueron atacadas usando hidróxido de sodio 2% wt. disuelto en agua destilada, para revelar su microestructura, las imágenes de las distintas microestructuras fueron obtenidas por medio de un microscopio óptico marca Nikon serie Lv 100 con cámara digital marca Nikon.

Las medidas de durezas se realizaron sobre todas las muestras en estado inicial y luego de la deformación. Para ello, se utilizó un durómetro Universal marca Wolpert, con una carga de 10 kg fuerza en escala Vickers, mientras que las pruebas de tracción se realizaron en una máquina universal INSTRON 558 de acuerdo a la norma ASTM E-8, sobre de las probetas: una en estado inicial, sobre las cizalladas P1, P2 y P4 y sobre las laminadas A173, A1 80 y A191,

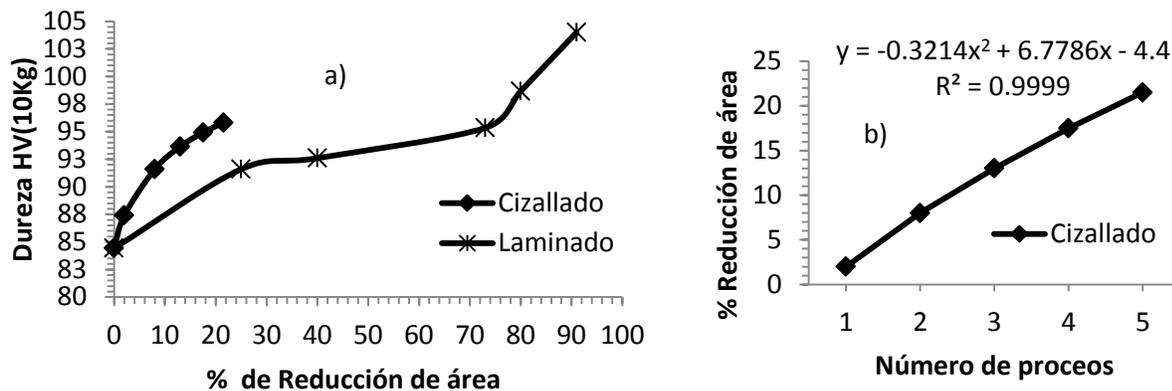
### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra los cambios que exhibió la microestructura de la aleación de aluminio AA-1100. Antes de la deformación, los granos no mostraban una orientación definida, lo que indica que el material se encontraba en estado recocido o con muy bajo nivel de deformación (Figura 2a). Después de aplicar cuatro pasos de cizalladura a 135° se aprecia que los granos adquieren una orientación, dado que además de la cizalladura existe una deformación por tensión que genera un 20% de reducción de área y un alargamiento de los granos (Figura 2b), cuando la deformación se aplicó completamente por reducción de área, se observa que los granos experimentan un completo alargamiento al aplicar un 73% de deformación (Figura 2c). De las microestructuras mostradas se observa que existe una gran diferencia en las características microestructurales para los procesos de laminado y cizallado, que por ser menos anisotrópica la microestructura generada mediante la cizalla, se pueden obtener valores altos de resistencia con mayores niveles de ductilidad.



**Figura 2.** a) Microestructura de la lámina estado inicial, b) Microestructura después de 4 pasos de cizalla a 135° y c) Microestructura con un 73% de deformación por reducción de área.

Al evaluar la dureza para cada uno de los procesos realizados, se observó un aumento de la dureza a medida que incrementa el porcentaje de trabajo en frío por cizalladura y por reducción de área como lo muestra la Figura 3a. Hay que resaltar que al aplicar cuatro pasos de cizalladura, se genera solo un 20% de reducción de área, permitiendo alcanzar la misma dureza que el material que ha sido trabajado en frío un 73% por reducción de área. Estos resultados corroboran lo observado microestructuralmente como se discutió en párrafos anteriores. En la Figura 3b, se muestra como varía el porcentaje de reducción de área en función del número de pasos para el cizallado, allí se nota que la reducción de área conserva una tendencia cuadrática en la cual durante cada paso no varía significativamente el porcentaje de reducción.

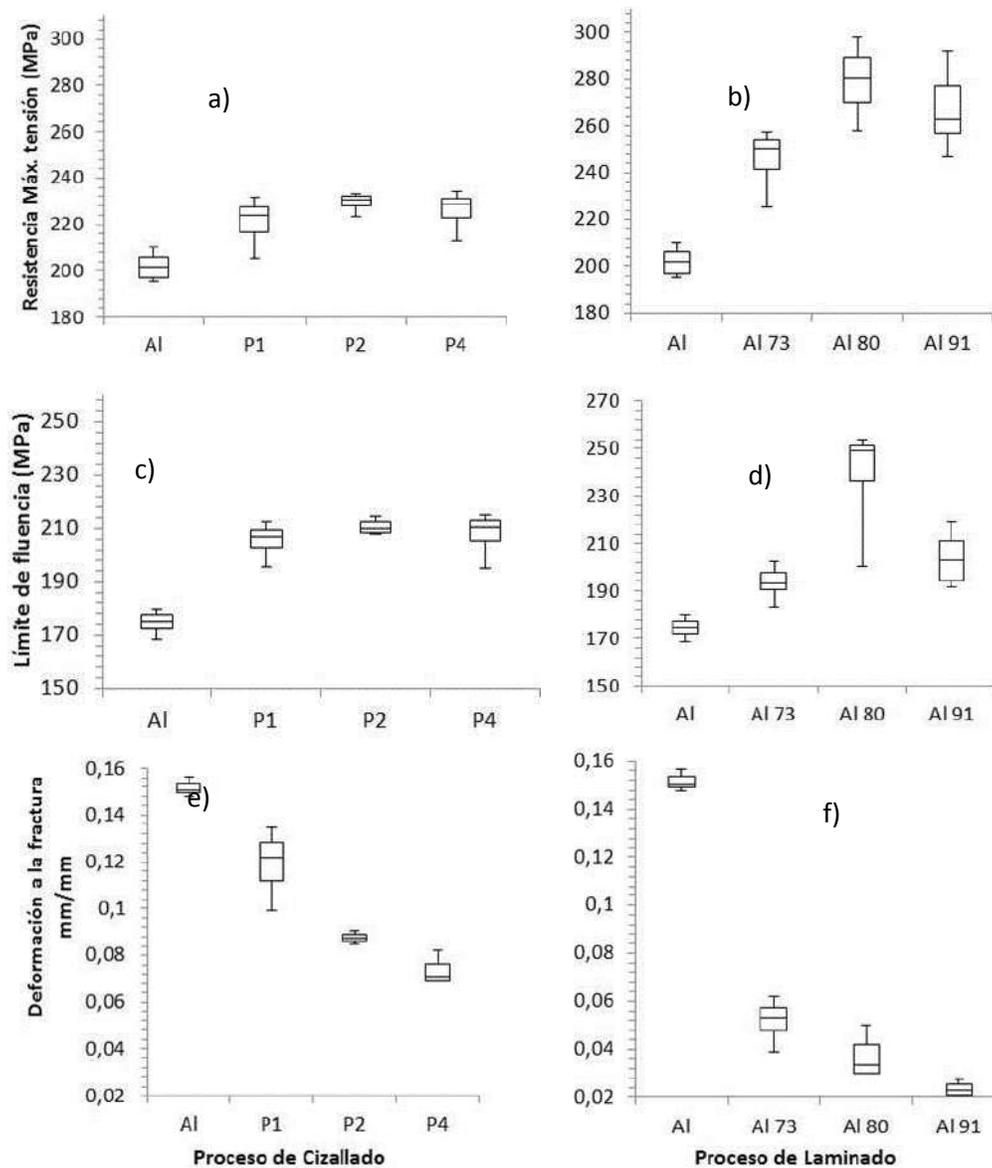


**Figura 3.** a) Durezas en función del porcentaje de reducción de área para los procesos de cizalladura y laminado y b) reducción del área en función del número de pasos en el cizallado.

Las Figura 4a y 4b muestran como varían los valores de resistencia a la tensión máxima, para cada uno de los procesos de cizalladura y laminado, respectivamente. Allí se observa que los valores de resistencia obtenidos para los procesos de cizalladura (Figura 4 a) tuvieron aumentos sucesivos hasta alcanzar en el cuarto paso de cizalla una resistencia de 230 MPa, mientras que al aplicar deformaciones por reducción de área de un 80% se alcanzó un mayor valor de resistencia llegando a los 290 MPa. Además, se puede estimar que cuatro pasos de cizalla equivalen a aproximadamente un 70% trabajo en frío por reducción de área, visto desde el incremento de la resistencia máxima. Al analizar como varía la resistencia a la fluencia, se encontró que a diferencia de lo que ocurre con la resistencia máxima, es más significativo el incremento en la resistencia a la cedencia en las muestras cizalladas que en las muestras laminadas. Luego de cuatro pasos de cizalla se logró alcanzar aproximadamente 210 MPa de resistencia a la cedencia, cuyo valor es superior al alcanzado al deformar por laminación más de un 73% la lámina de aluminio.

Finalmente, se determinó como fue la variación de ductilidad de estos materiales obtenidos por cizallado y laminado, como se muestra en las Figuras 4e y 4f, encontrándose que antes de la fractura, las muestras cizalladas conservaban aún después de los 4 pasos de cizalla un 8% de elongación, mientras que las laminadas al aplicar el 73% de laminación la elongación bajo a valores entre 5% y 6%. Correlacionando estos valores de elongación con los valores obtenidos de resistencia, se puede decir, que en los procesos de cizalla y laminado se incrementan los valores de resistencia al aumentar los niveles de deformación generados al pasar la lámina metálica por el dado de cizalla o por los rodillos de laminación, pero se conserva en mayor medida la ductilidad

de la aleación de aluminio en los procesos de cizalla comparado con los valores obtenidos para procesos de laminado.



**Figura 4.** Resistencia máxima, Resistencia a la fluencia y elongación a la fractura: a), c) y e) material cizallado y, b), d) y f) material laminado

#### 4 CONCLUSIONES

Los procesos de deformación por cizalladura permiten controlar los valores de dureza, resistencia y ductilidad, por medio de la aplicación de deformación plástica que no genera un cambio significativo en las características microestructurales de las láminas de aluminio AA-1100 estudiadas, además, conserva en estas láminas un carácter más isotrópico del material en comparación con la orientación y alargamiento de los granos generados durante por procesos de laminación convencional. Este tipo de procesos abre la posibilidad del desarrollo de nuevos

proceso de manufactura, que permitan el control específico de propiedades mecánicas en materiales laminados usados en procesos de estampado y embutido, utilizados en la fabricación de piezas aeronáutica y automotriz con altas prestaciones.

## **5 AGRADECIMIENTOS**

Los autores manifiestan sus agradecimientos al CIDI-UPB por la financiación del proyecto, Rad. N°925A-01/12-18 y a COLCIENCIAS, CIDI-UPB y UN, por el apoyo al proyecto titulado, “*Desarrollo de aleaciones de magnesio con comportamiento superplástico para aplicaciones aeronáuticas y automotrices*” Rad. código No. 111B-04/13-18.

## **6 REFERENCIAS**

1. Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D., Micari, F., Lahoti, G. D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A. and Yanagida, A., “Severe plastic deformation (SPD) processes for metals”, *Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 2, pp. 716–735, 2008.
2. Saravanan, M., Pillai, R. M., Pai, B. C., Brahmakumar, M., Ravi, K. R., “Development of ultrafine grain aluminium–graphite metal matrix composite by equal channel angular pressing”, *Indian Academy of Sciences*, Vol. 29, No. 7, pp. 679–684, 2006.
3. Watazu, A., “Recent trends in Processing And Degradation of Aluminum Alloys”, UK, InTech 2011.
4. Werenskiold, J. C., “Equal Channel Angular Pressing (ECAP) of AA6082: Mechanical Properties, Texture and Microstructural Development”, *Norwegian University of Science and Technology*, Noruega, 2004.
5. Zrník, J., and Dobatkin, S. V., “Processing of metals by severe plastic deformation (SPD) – structure and mechanical properties respond. *Metalurgija*, Vol. 47, No. 3, pp. 211–216, 2008.
6. Verlinden, B., and Leuven, K. U., “Severe plastic deformation of metals”, *Metalurgija- Journal of metallurgy*, pp 165-181, 2004.
7. Horita, Z., Fujinami, T., and Langdon, T. G., “Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal-channel angular pressing”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 318, No. 1–2, pp. 34–41, 2001.
8. Chowdhury, S. G., Mondal, A., Gubicza, J., Krállics G., Fodor, Á. “Evolution of microstructure and texture in an ultrafine-grained Al6082 alloy during severe plastic deformation”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 490, pp. 335-342, 2008.
9. Adedokun, S. T., “A Review on Equal Channel Angular Extrusion as a Deformation and Grain”, *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2, No. 2, pp. 360–363, 2011.

10. Chakkingal, U., Suriadi, A. B., and Thomson, P. F., “The development of microstructure and the influence of processing route during equal channel angular drawing of pure aluminum” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 266, No. 2, pp. 241–249, 1999.
11. Kim, H. S.; Pham, Q.; Seo, M. H.; Hong, S. I. ; Baik, K. H., Lee, H. R. ; Nghiep, D. M., “Process modelling of equal channel angular pressing for ultrafine grained materials” *Materials Transactions*, Vol. 45, No. 7, pp. 2172–2176, 2004.
12. Zisman, A. A., Rybin, V. V., Van Boxel, S., Seefeldt, M., Verlinden, B. “Equal channel angular drawing of aluminium sheet”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 427, No. 1, pp. 123–129, 2006.
13. Cabibbo, M., A TEM Kikuchi pattern study of ECAP AA1200 via routes A, C, BC, *Materials Characterization*, Vol. 61, No. 6, pp. 613–625, 2010.