

ESTIMACIÓN VÍA EXPERIMENTAL DE LA FORMABILIDAD DE LÁMINAS DE ALUMINIO DE PUREZA COMERCIAL

Jhon E. Barbosa ^{1*}, Ismael H. García ¹, José J. Fuentes ^{2*}

1: Universidad Francisco de Paula Santander, Grupo de Investigación Diseño Mecánico y Mantenimiento, Avda. Gran Colombia, N° 12E-96, Apdo. 1055, Cúcuta, Colombia.

2: Universidad Nacional Experimental del Táchira, Dpto. Ing. Mecánica, Avda. Universidad, s/n, Apdo. 436, San Cristóbal, Venezuela.

*E-mail: jhebar@hotmail.com; jfuentes@unet.edu.ve

Recibido: Nov-2008; Revisado: 22-Jul-2009; Aceptado: 23-Jul-2009

Publicado On-Line: 21-Dic-2009

Disponible en: www.rlmm.mt.usb.ve

Trabajo presentado en el congreso "X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008; y seleccionado para ser remitido a la *RLMM* para su arbitraje reglamentario y publicación.

Resumen

En este trabajo se investigó por vía experimental la formabilidad de láminas de aluminio de pureza comercial designado AA-1100-O de 0,6 y 0,7 mm de espesor. Se trabajó con muestras de láminas, tal y como son fabricadas, efectuándosele a las mismas estudios de laboratorio tales como: análisis químico, ensayo de tracción, ensayo de altura de copa y ensayo con punzón hemisférico. De esta manera, se determinaron la resistencia a la tracción, el límite elástico convencional, el porcentaje de alargamiento hasta fractura, el coeficiente de endurecimiento por deformación, la altura de copa y la curva límite de formado; factores todos que ayudan a pronosticar la formabilidad de la lámina. En concreto, se encontró que la facilidad de conformación mecánica de la lámina mejora con el aumento de su espesor. Asimismo, se determinó que existe una correlación apropiada entre la formabilidad, el espesor, el porcentaje de alargamiento hasta fractura en tracción, la altura de copa y las curvas límites de formado.

Palabras Claves: *Formabilidad, Altura de Copa, Curva límite de formado.*

Abstract

This paper presents an experimental study of the formability of commercially pure aluminum sheets, with 0.6 and 0.7 mm thickness, designated AA-1100-O. In this research several laboratory tests were conducted, such as: chemical analysis, tensile test, ball punch deformation test and hemispherical punch method. The tested parameters with direct or indirect influence in the aluminum sheet formability were: ultimate tensile strength, yield strength, total elongation, the strain hardening exponent, cup height and forming limit diagrams, which were determined by testing samples cut from the sheet, as received. The results of these tests allowed to establish that the aluminum sheet formability increased with thickness. In addition, good correlations were obtained between formability, thickness, total elongation, cup height and forming limit diagrams.

Keywords: *Formability, Cup height, Forming limit curve.*

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de conformación mecánica de la lámina metálica –p.ej., embutido profundo, estirado– tiene especial importancia en la fabricación de componentes estructurales en la industria del automóvil, aeronáutica y otros sectores [1]. Los metales más usados para tal propósito son aceros, aleaciones de aluminio y aleaciones de titanio [2]. El éxito de dicha tecnología depende de la formabilidad de la lámina, que está relacionada con la optimización y control de calidad del producto final [3]. La formabilidad puede definirse

como una medida de la cantidad de deformación que un material puede experimentar en un proceso de formado sin que falle, tal como adelgazamiento localizado o fractura [4]. La formabilidad varía con las propiedades del material y las condiciones de deformación [5]. Por otra lado, el campo de esfuerzos y deformaciones son tan diversos durante un proceso de formado que un sólo ensayo no sirve para predecir la formabilidad de los materiales en todas las situaciones [6].

La formabilidad puede ser explorada a partir de diversos parámetros que se obtienen del ensayo de

tracción estándar (alargamiento hasta fractura, coeficiente de endurecimiento por deformación, relación de deformación plástica y otros) [7], pero, no son suficientes, ya que, la formabilidad depende de la habilidad del metal para distribuir la deformación por toda la superficie de la lámina, que a su vez depende de las condiciones de frontera como la fricción [5].

Otros ensayos fueron diseñados para simular condiciones comúnmente encontradas en procesos industriales de deformación mecánica, como estado de esfuerzos biaxiales y, así, estimar la formabilidad [8]. Un primer desarrollo fue el ensayo de copa Olsen/Erichsen el cual comprende el embutido profundo de una pequeña copa. Este ensayo fue cuestionado por Hecker [9], quien le atribuyó fallos por enfatizar el doblado, debido al pequeño tamaño de la copa. Él introdujo un punzón hemisférico más grande de 100 mm de diámetro, junto con un reborde de apriete cerca del agujero de la matriz para reducir el doblado e imponer estirado. Luego, Ghosh [10] introdujo el uso de diversos anchos de tira y condiciones de lubricación para producir un amplio intervalo de estados de deformación, usando la geometría básica del equipo de Hecker. La altura mínima del punzón observada para una variedad de condiciones fue la medida de la formabilidad. Estos desarrollos fueron luego formalizados como el ensayo de altura de domo límite (LDH, siglas en inglés).

Posteriormente, Keeler y Backofen [11] y Goodwin [12] introdujeron el concepto de diagramas límites de formado (FLD, siglas en inglés). Esto tuvo un impacto significativo tanto en la academia como en la industria, al presentar una metodología de cómo determinar la deformación máxima que un material puede desarrollar durante un proceso de formado. En un FLD, la curva límite de formado (FLC, siglas en inglés) define la deformación máxima que puede ser obtenida por una lámina antes de que tenga lugar el adelgazamiento, y, es expresada en términos de la deformación principal mayor frente a la deformación principal menor. Los métodos experimentales para determinar los FLDs son bien conocidos, como el estirado sobre un punzón hemisférico [13] o punzón circular con fondo plano en los ensayos de copa de Marciniak [14] y Tadros y Mellor [15].

En el presente trabajo se estudia la formabilidad por vía experimental de láminas de aluminio de 0,6 y 0,7 mm de espesor, que utiliza la empresa

colombiana Aluminios ONAVA, ubicada en Cúcuta, en la fabricación de utensilios de cocina. El material fabricado en la misma empresa, primero, es fundido y, luego, sometido a laminado en varias etapas de reducción porcentual, según diversas orientaciones, que, al final es recocido a 380°C. El propósito final de este trabajo es que los resultados puedan ser transferidos a la empresa para el control de su producción.

2. PARTE EXPERIMENTAL

En la fase metodológica de este trabajo se recogieron muestras representativas de aluminio fundido y laminado. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a diversos ensayos de laboratorio para determinar su composición química, propiedades mecánicas y tecnológicas.

2.1 Análisis Químico del Aluminio Utilizado

La determinación cuantitativa de los elementos químicos presentes en el aluminio fundido solidificado –no laminado– se obtuvo mediante espectrometría de emisión óptica, a través de un espectrómetro marca SHIMADZU, modelo 5500. En la Tabla 1 se refleja la proporción en porcentaje en peso de los elementos químicos.

Tabla 1: Composición química promedio del aluminio utilizado

<i>Elemento</i>	<i>% (en peso)</i>
Fe	0,38
Cu	0,07
Mg	0,03
Al	Balance

Como se observa en la Tabla 1, se trata de un aluminio comercialmente puro, que se designa como AA-1100-O [16]. La letra O de la designación señala que el material fue sometido en fábrica a recocido de recristalización a 380°C.

La principal impureza del aluminio es el hierro, normalmente, presente en la forma de partículas insolubles de aluminuro de hierro, FeAl₃, que tienen una gran influencia en la fractura de la lámina durante la deformación mecánica [17].

2.2 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción se llevó a cabo en una máquina universal de ensayos SHIMADZU AG 250, conforme al método descrito en la norma ASTM E8M. La velocidad del ensayo se fijó en

2,5 mm/min. Se emplearon tres probetas planas para cada una de las orientaciones investigadas, respecto a la dirección de laminación de la chapa, a saber: 0, 45 y 90°; y, para cada espesor de lámina estudiado (0,6 y 0,7 mm). Los detalles morfológicos y dimensionales de las probetas son los prescritos en dicha norma. Las propiedades mecánicas a tracción medidas fueron: Resistencia a la tracción, σ_u , límite elástico convencional del 0,2 por 100, $\sigma_{y(0,2\%)}$, y porcentaje de alargamiento hasta fractura sobre 50 mm de longitud calibrada, A_{50} .

Para la medida del coeficiente de endurecimiento por deformación, n , se siguió las directrices establecidas en la norma ASTM E646.

2.3 Ensayos Simulativos

Con respecto a los ensayos simulativos se emplearon dos métodos de gran uso industrial para pronosticar la formabilidad de la lámina metálica [18]. Ellos son: El ensayo de deformación con punzón de bola, o como se le conoce también ensayo de copa Olsen [19], y el ensayo de domo hemisférico, o ensayo de severidad.

La altura de copa fue medida usando un equipo para deformación mecánica con punzón de bola, cuyo diámetro es de 22,22 mm (Figura 1), diseñado y construido en nuestros laboratorios, según especificaciones dadas en la norma ASTM E643.



Figura 1. Detalles del diseño del equipo para el ensayo de altura de copa.

El equipo para deformación mecánica con punzón de bola fue entonces acoplado a una máquina de tracción-compresión HOYTOM *HM-D100*. Dicha máquina permite medir el desplazamiento del cabezal móvil y la carga aplicada. El ensayo consistió en someter individualmente discos planos de aluminio a estirado biaxial, los cuales se aprisionan circunferencialmente entre dos matrices planas circulares que componen el equipo. La velocidad de deformación se fijó en 4,8 mm/min. Durante el ensayo la superficie libre del disco adopta la forma de un domo. El criterio para el final del ensayo que se aplicó fue el de caída de un 5% de la carga aplicada desde el valor máximo. Esto se asocia al encuellamiento localizado que se produce en el domo formado, previo a la fisuración.

Por su parte, el ensayo con punzón hemisférico de diámetro 101,6 mm (o ensayo de severidad) ha permitido obtener la curva límite de formado, CLF, para cada espesor de lámina. El equipo (Figura 2), también fue construido en nuestra Universidad conforme a datos que se indican en la norma ASTM E 2218.



Figura 2. Equipo usado para determinar la curva límite de formabilidad.

El ensayo consistió en someter a estirado biaxial siete tiras rectangulares de aluminio de 175 mm de largo y anchos desde 25 a 175 mm, con incrementos de 25 mm, para cada espesor de lámina. Las tiras se obtuvieron de una muestra de lámina, sobre la que

fue impreso –vía fotograbado– un patrón repetitivo de círculos de 2,5 mm de diámetro, formando grupos de cuatro dentro de una cuadrícula de 7 mm de lado (Figura 3), según uno de los modelos propuestos en la norma antes mencionada. Al igual que en el ensayo de copa, la velocidad se fijó en 4,8 mm/min, y el criterio para el final del ensayo fue el de adelgazamiento localizado, que se produce con una caída del 5% de la carga aplicada.

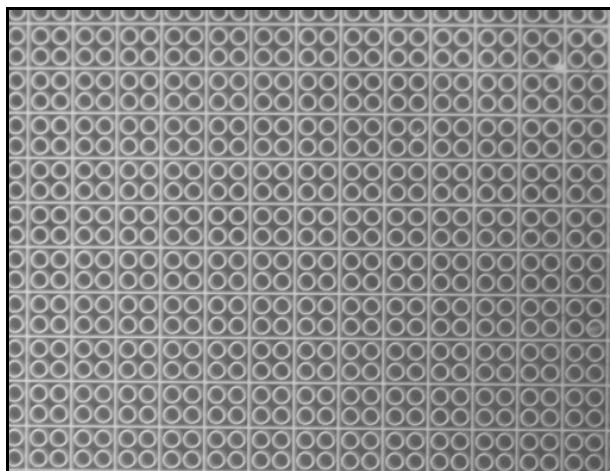


Figura 3. Patrón de círculos usado para la medida de deformaciones.

Durante el ensayo los círculos se deforman a elipses. Los ejes mayor y menor de una elipse representan las direcciones de deformación principales. La deformación en estas dos direcciones fue entonces medida como el cambio porcentual en las longitudes de los ejes mayor y menor (e_1 y e_2), usando para ello una cinta transparente graduada –regla Mylar– [20]. Estas deformaciones en las regiones proclives al fallo, en cada tira metálica ensayada, permitieron construir la curva límite de formado, CLF, para cada uno de los espesores de lámina de aluminio, siguiendo las directrices dadas en la norma ASTM E 2218.

En este trabajo, el fallo se produce cuando es visible el encuellamiento, o dicho también, adelgazamiento localizado. Las áreas inmediatamente adyacentes al fallo son de particular interés en la evaluación de la capacidad de conformación de la lámina. La localización de combinaciones de deformación que producen fallos definen la curva límite de formabilidad. El área debajo de esta curva abarca todas las combinaciones de deformación (e_1 y e_2) que el metal puede resistir con seguridad [19]. Así, la curva límite de formado, CLF, es uno de los

métodos preferidos en la industria transformadora de la lámina para examinar fallos potenciales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Propiedades Tensiles

En la Figura 4 se presentan los valores promedio de la resistencia a la tracción, σ_u , y porcentaje de alargamiento hasta fractura sobre 50 mm de longitud calibrada, A_{50} , de probetas orientadas a 0, 45 y 90° respecto a la dirección de laminación.

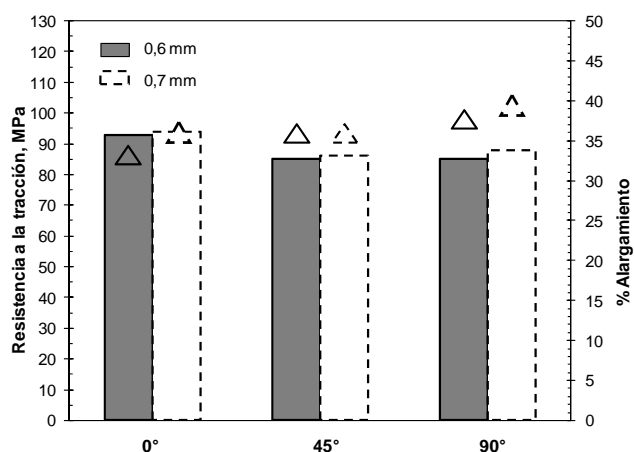


Figura 4. Resistencia y alargamiento de probetas orientadas a 0, 45 y 90° respecto a la dirección de laminación.

En la Figura 4 las barras de color gris oscuro y blanco dan cuenta de la resistencia mecánica de las láminas de 0,6 y 0,7 mm de espesor, respectivamente, mientras que, los triángulos de línea continua y segmentada señalan el porcentaje de alargamiento, correspondientemente.

Para cada espesor de lámina, se observa, que, la resistencia y el alargamiento, parecen variar poco con la orientación de ensayo, ya que el intervalo de valores tiene una dispersión pequeña, en torno a 3,5 MPa y 1,7%, respectivamente. Asimismo, el límite elástico y el coeficiente de endurecimiento por deformación, no indicados en la figura, parecen poco sensibles a la dirección en que se miden. Esto, en principio, resulta de la condición como son fabricadas las láminas, que incluye un recocido a 380°C. Los valores promedio globales de σ_u , $\sigma_y(0.2\%)$ y A_{50} (88,5 MPa, 40,5 MPa y 36,13%, respectivamente) están dentro de los límites establecidos por la norma ASTM B209 para láminas de aluminio AA-1100-O (σ_u : 75-105 MPa, $\sigma_y(0.2\%)$: 25 MPa –min–, A_{50} : 15-28 % –min–).

En cuanto a la relación de las propiedades mecánicas con el espesor de la lámina, la ductilidad, A_{50} , fue la más favorecida al incrementarse en 3,4% con un aumento en 0,1 mm del espesor.

3.2 Altura de Copa

La Figura 5 muestra la configuración geométrica experimental que adopta el disco de aluminio debido a la deformación impuesta por el punzón de bola de 22,22 mm. La flecha de la figura señala el adelgazamiento localizado circunferencial en el domo o copa, que se desarrolla hacia el final del ensayo. El reborde exterior en alto relieve, que se observa, se produce al sujetar la muestra al equipo para impedir su deslizamiento con relación a las superficies de la matriz durante el ensayo.

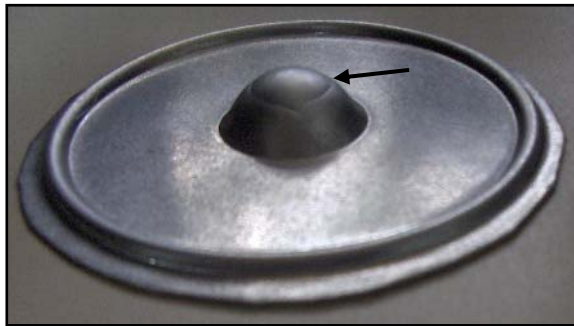


Figura 5. Morfología de la chapa de aluminio de 0,7 mm de espesor producida tras el ensayo.

En lo que concierne a los resultados numéricos, la Figura 6 muestra valores de la carga aplicada (en N) frente al desplazamiento del punzón (en mm), que se obtuvieron de ensayos de altura de copa. En la Figura 6 se recogen dos curvas representativas carga-desplazamiento de los espesores de lámina investigados, a saber: línea continua y línea segmentada que reflejan el comportamiento mecánico de las láminas de 0,7 y 0,6 mm, respectivamente.

La altura de copa promedio, en el punto de máxima carga, para la lámina de aluminio de 0,6 mm es de $8,7 \pm 0,4$ mm, mientras que, para la lámina de aluminio de 0,7 mm resultó ser de $9,5 \pm 0,2$ mm. Según esto, puede decirse, que la respuesta frente a deformación plástica de la lámina del aluminio estudiado mejora ~ 10% al aumentar en 0,1 mm su espesor.

Por otro lado, al compararse las Figuras 4 y 6, se pone de manifiesto, que, la altura de copa y el

porcentaje de alargamiento hasta fractura se correlacionan en algún grado.

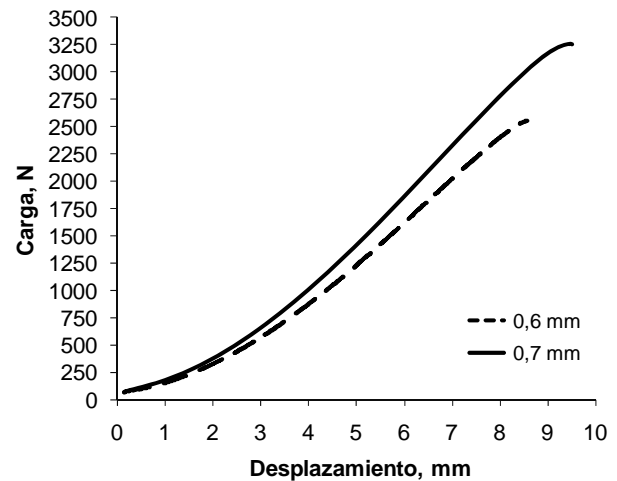


Figura 6. Curvas carga vs. desplazamiento representativas de muestras de Al de 0,6 y 0,7 mm de espesor.

La altura de copa de las láminas del aluminio investigado (8,7 y 9,5 mm para espesores de 0,6 y 0,7 mm, respectivamente, de Al AA-1110-0) resultó ser más alto que el de aleaciones de aluminio comercial (p.ej. 6,7; 7,0 y 7,7 mm para espesores de 0,89 mm de Al-AA-3003-0, 0,86 mm de Al-AA-5052-0 y 2,36 mm de Al AA-7021-0, respectivamente) reportados en la literatura [19] para condiciones similares de ensayo.

3.3 Curva Límite de Formado

La Figura 7 muestra la forma que adopta una tira rectangular plana de aluminio de 150 mm de ancho tras someterse a deformación mecánica en el equipo para ensayo de severidad (Figura 2). A título comparativo, la Figura 8 señala la configuración geométrica final de una tira de aluminio de 25 mm de ancho y del mismo espesor.

En ambas figuras se contemplan diversos grados de deformación plástica en el patrón de círculos impreso sobre la superficie de las láminas. En las tiras más anchas (Figura 8), los círculos se ensancharon, tendiendo a una condición de estirado biaxial, mientras que, en las más estrechas, los círculos individuales pasaron a ser elipses alargadas, predominando un estado de deformación uniaxial, como se prevé que lo hagan [21].

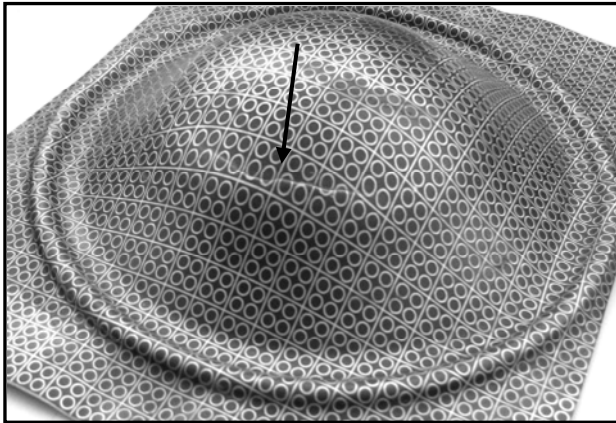


Figura 7. Configuración geométrica de una tira de aluminio de 150 mm de ancho y 0,7 mm de espesor producida tras el ensayo de severidad.

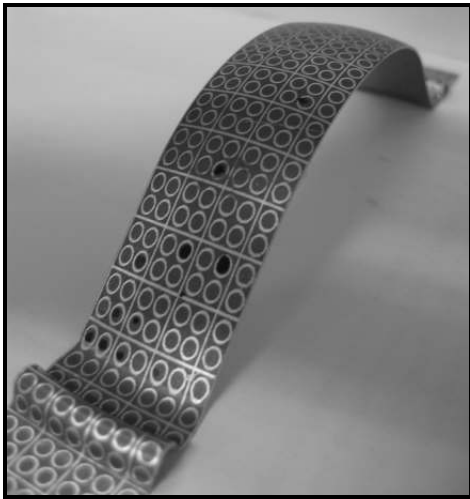


Figura 8. Configuración geométrica de una tira de aluminio de 25 mm de ancho y 0,7 mm de espesor producida tras el ensayo de severidad.

Por otro lado, en la Figura 7 es visible el encuellamiento (ver flecha) que se inicia en torno al plano medio del domo y en dirección transversa, como se presume debe ser el comportamiento correcto del material [18]. En ninguna de las tiras ensayadas el adelgazamiento localizado tuvo lugar en la vecindad del borde de la matriz.

Por su lado, las Figuras 9 y 10 ilustran sendas representaciones del porcentaje de deformación mayor ($\%e_1$) frente al porcentaje de deformación menor ($\%e_2$) para la lámina de aluminio de 0,6 y 0,7 mm, respectivamente.

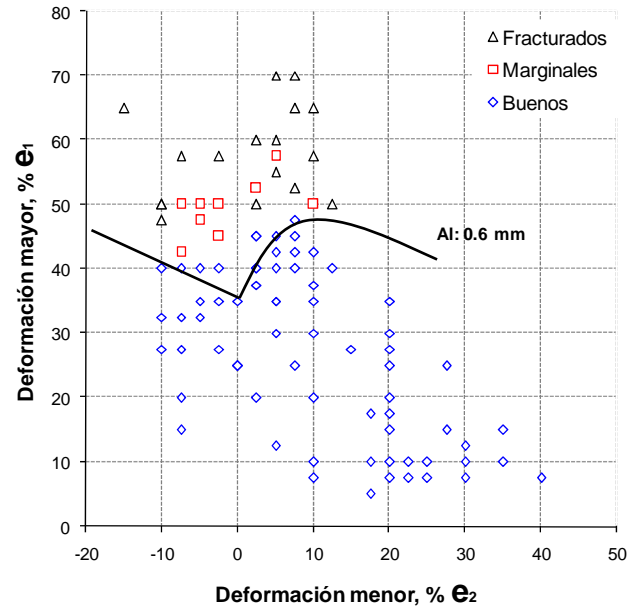


Figura 9. CLF experimental de la lámina de aluminio de 0,6 mm de espesor.

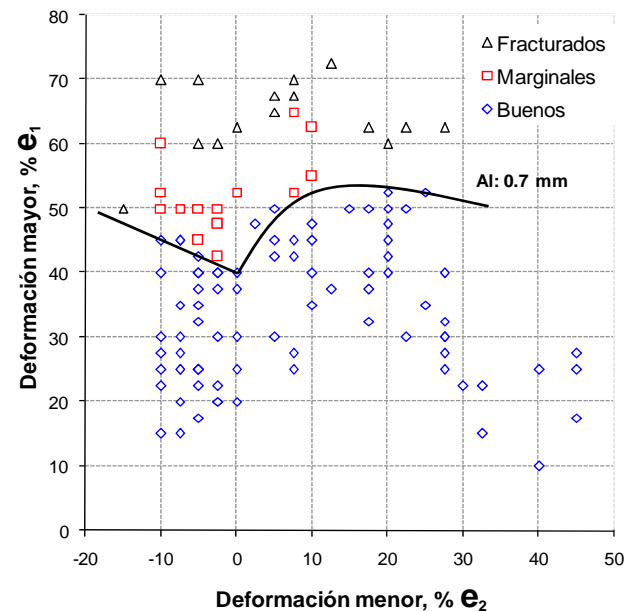


Figura 10. CLF experimental de la lámina de aluminio de 0,7 mm de espesor.

Las curvas límites de formado, CLFs, tanto de la lámina de 0,6 mm como la de 0,7 mm son las típicas para aleaciones de aluminio [13], y se componen de un punto inferior que corresponde a 0% de la deformación e_2 , un segmento lineal ascendente hacia la izquierda de este punto y de un segmento curvo hacia la derecha. También, en la Figura 9 como en la Figura 10 puede observarse, que, la deformación límite en la condición de deformación plana $-0\%e_2$ y en las regiones vecinas, de la lámina de 0,6 mm es

más pequeña comparada con la lámina de 0,7 mm (35% e_1 frente a 40% e_1). En general, la CLF de la lámina de aluminio de 0,7 mm alcanza un nivel más alto que la CLF de la lámina de 0,6 mm, siendo, por tanto, mejor su formabilidad. Asimismo, el nivel más alto de la CLF de la lámina de 0,7 mm está de algún modo relacionada con su mayor porcentaje de alargamiento hasta fractura (ver Apartado 3.1) y su mayor altura de copa (ver Apartado 3.2).

4. CONCLUSIONES

Habida cuenta de los resultados y discusiones presentados en las secciones precedentes se ha llegado a la siguiente conclusión:

La lámina de aluminio AA-1100-O de 0,7 mm de espesor tiene una deformación límite más alta que la de 0,6 mm. Para este material existe una correlación apropiada entre el porcentaje de alargamiento hasta fractura en tracción, la altura de copa y las curvas límites de formado. Asimismo, el Al AA-1100 recocido a 380°C exhibe unas propiedades mecánicas a tracción que varían poco con la orientación respecto a la dirección de laminación.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER, Cúcuta, Colombia, a la UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DEL TÁCHIRA, San Cristóbal, Venezuela, y a la empresa CINSA, Cúcuta, por los recursos de laboratorio brindados para la preparación de este trabajo.

6. REFERENCIAS

- [1] Chow CL, Yu LG, Demeri MY, *J. Eng. Mater. Technol.* 1997; **119** (4): 346-353.
- [2] Wilson D, *J. Mech. Work Technol.* 1988, **16** (3): 257-277.
- [3] Jahromi S, Nazarboland A, Mansouri E, Abbasi S, *Iran J. Sci. Technol. B* 2006; **30** (B3): 377-385.
- [4] Gedney R, *Adv. Mater. Process.* 2002; **160** (8): 33-36.
- [5] Wagoner RH, Wang W, Sriram S, *J. Mater. Process. Technol.* 1994; **45** (1-4): 13-18.
- [6] Gedney R, *Qual* 2005; **44**(1): 46-54.
- [7] Miles MP, Siles JL, Wagoner RH, Narasimhan K, *Metall. Trans. A* 1993; **24A** (5): 1143-1151.
- [8] Demeri MY, *J. Appl. Metalwork.* 1983; **2**(4): 288-292.
- [9] Hecker S, *Met. Eng. Quart.* 1974; **14** (4): 30-36.
- [10] Ghosh A. K, *Met. Eng. Quart.* 1975; **15** (3): 53-64.
- [11] Keeler SP, Backofen WA, *ASM Trans. Quart.* 1964; **56** (1): 25-48.
- [12] Goodwin GM, "Application of Strain Analysis to Sheet-Metal Forming Problems in the Press Shop", *SAE Technical Paper No. 680093*, 1968: 380-387.
- [13] Hecker SS, "A Simple Forming Limit Curve Technique and Results on Aluminum Alloys". En: *Proceedings del 7th Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group*. Amsterdam (The Netherlands): International Deep Drawing Research Group IDDRG, 1972, p. 5.1-5.8.
- [14] Marciniak Z, Kuczynski K, *Int. J. Mech. Sci.* 1967; **9** (9): 609-620.
- [15] Tadros A, Mellor P, *Int. J. Mech. Sci.* 1978; **20** (2): 121-134.
- [16] *ASM Handbook, vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*, 9th Ed. Materials Park, Ohio (USA): ASM International, 1988, p. 65-66.
- [17] King F, *El Aluminio y sus Aleaciones*, 1ra Ed. México D.F. (México): Limusa, Grupo Noriega Editores, 1992, p. 81-94.
- [18] Kalpakjian S, Schmid S, *Manufacturing Engineering and Technology*, 4th Ed. New Jersey (USA): Prentice-Hall, Inc., 2002, p. 404-407.
- [19] *ASM Handbook, vol. 14: Forming and Forging*, 9th Ed., Davis JR, Semiatin SL (eds.). Materials Park, Ohio (USA): ASM International, 1988, p. 877-899.
- [20] Spence AD, Chan H-L, Mitchell JP, Capson DW, *Comput.-Aided Des. Appl.* 2005; **2** (1-2): 135-144.
- [21] Hecker SS, *Met. Eng. Quart.* 1973; **13**(3): 42-48.