

## TRATAMIENTO TÉRMICO DE HOMOGENIZADO EN LÁMINAS DE ALUMINIO 3003 PRODUCIDA POR COLADA CONTINUA DEL DOBLE RODILLO PARTE 2 : LAMINACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Azócar Luis<sup>1</sup>, Hidalgo Benjamin<sup>1</sup>, Chon Siechun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IIBCAUDO, Universidad de Oriente

<sup>2</sup>Gerencia Técnica ALCASA

azocarluisalberto@hotmail.com; hidalgoben@gmail.com; siechungchong@gmail.com

Recibido (24/05/17), aceptado (15/02/18)

**Resumen:** Las dos bobinas de aleación de aluminio 3003 obtenidas vía colada continua de doble rodillo, que fueron sometidas a tratamiento de homogeneizado a 550°C-2 horas determinado en la primera parte del presente trabajo, fueron laminadas en frío, una con tres pases antes del recocido y la otra con dos, pero ambas bajo condiciones de reducción de espesor más exigentes respecto a idéntica aleación sin tratamiento. La bobina con tres pases fue caracterizada mediante ensayo de tracción en cada uno de ellos, incluyendo el espesor inicial 5,6 mm y el final 0,53 mm H14. Este último fue sometido a ensayo de embutición profunda. Los resultados de laminación fueron favorables al eliminarse dos pases, respecto a la aleación 3003 sin tratamiento y los ensayos de tracción, en el espesor inicial arrojaron incrementos en los parámetros que más influencia tienen en las propiedades plásticas de un material: 31,8% en esfuerzo de fluencia; 116,7% en deformación hasta la rotura; 58,6% en el exponente de endurecimiento. La embutición profunda resultó con 4 copas Swift sin fallas de agrietamiento y orejamiento de 1,4 %. Estos resultados permiten concluir que el material 3003 con tratamiento térmico es posible de embutir y obtener recipientes con paredes de bajo espesor.

**Palabras Clave:** Aleación AA3003. Colada de doble rodillo. Embutición profunda. Laminación en Frío

## INTRODUCCIÓN

En la parte 1 de esta investigación [Tratamiento térmico de homogeneizado en láminas de aluminio 3003 producida por Colada Continua de Doble Rodillo. XIV Jornadas de Investigación, Unexpo 2016] se diseñó un tratamiento térmico de homogeneizado (TTH), 550°C - 2horas de calentamiento isotérmico y se aplicó industrialmente a dos bobinas de aleación de aluminio 3003 obtenidas vía colada continua de doble rodillo (CCDR) con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas de plasticidad para eliminar al menos un pase de laminación y su embutición profunda, lo que es importante no solo por el incremento de productividad asociada, sino también por el potencial uso en productos de muy bajo espesor como recipientes de bebidas. En el presente trabajo, Parte II, los objetivos son laminar en frío a nivel industrial las dos bobinas, bajo condiciones más exigentes que las aplicadas a láminas de idéntico material sin TTH, una de ellas a 87,3% y la otra a 83,3% antes de la etapa de recocido y caracterizar mecánicamente la bobina más exigida en cada espesor logrado en los diferentes pases de laminación, además someter a ensayo de embutición profunda la lámina de menor espesor obtenida en el último pase después del recocido, con temper H14. El logro de estos objetivos se encuentra fuertemente asociados a las respuestas de los materiales ante esfuerzos externos, que a su vez se relacionan en lo interno del material con las probabilidades de movimiento de las dislocaciones a través de los diferentes sistemas cristalino de la estructura que lo constituye y que en el caso del aluminio es cúbica centrada en las caras con doce sistemas de deslizamiento (s) [1], [2] y según la condición de von Mises [3], es necesario para su deformación, la activación simultánea de cinco de ellos (r), lo que permite calcular mediante (1) [4], la cantidad de posibles respuestas de este material ante los esfuerzos mecánicos:

$$\left[ \begin{matrix} S \\ r \end{matrix} \right] = \frac{s!}{r!(s-r)!} \quad (1)$$

$$\left[ \begin{matrix} 12 \\ 5 \end{matrix} \right] = \frac{12!}{5!(12-5)!} = 792$$

Este resultado coincide con el enunciado en [5]. En el caso de ser necesario solo tres sistemas de deslizamiento el número de posibilidades descendería hasta 220 [6]. En cualquiera de los casos es grande la cantidad de posibles respuestas de deformación en el material poli cristalino y desde el punto de vista termodinámico, la situación se complica porque la deformación del material no es una propiedad de estado [7], por lo

cual dependerá de su historia termo mecánica. Estas razones, aunada a las diferencias entre un mismo tipo de procesos y al hecho de estar los materiales constituidos de gran cantidad de átomos que pueden considerarse como sistemas caóticos sensibles a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales, hace interesante el estudio de las respuesta de los materiales ante procesos de conformado, en especial el caso de la aleación 3003 obtenida vía CCDR donde hay muy pocas investigaciones referentes a su embutición profunda.

En el presente trabajo se considera el plan de laminación, la elaboración de probetas, la ejecución de ensayos mecánicos de tracción y de embutición profunda.

## II. DESARROLLO

### Métodos y Materiales

Esta investigación se realizó con diseño experimental a nivel industrial, en la cual dos bobinas de aleación 3003 de CCDR y cuyo análisis químico se incluyó en Parte 1, fueron laminadas en frío a diferentes pases de laminación, siendo la bobina 81126 más exigida que la 81314 al planificarse un espesor final de 0,50 mm, razón por que fue caracterizada. En la dirección de laminación de cada pase se tomaron dos muestras para ensayos de tracción y en los ensayos de embutibilidad, muestras en la lámina de menor espesor.

### A. Secuencias planificada de pases de laminación

En la Tabla I, se establece la cantidad de pases de laminación y el espesor a lograr en las bobinas 3003 -CCDR con TTH y su comparación con las del mismo material sin TTH, laminada rutinariamente.

**TABLA I. PLAN DE LAMINACIÓN DE BOBINAS 3003-CCDR CON TTH, COMPARADA CON LA 3003 SIN TTH.**

Pases laminación	81126	81314	Bobina sin TTH
Espesor inicial (mm)	6	6	6
Primer	2,2	2,2	3,8
Segundo	1,2	1,0	2,8
tercer	0,76	-----	1,9
% Reducc. Acumulado	87,3	83,3	68
Recocido: 400°C-3 horas	0,76	1,0	1,9
Primer pase después del recocido	0,50 (H14)	0,70 (H14)	1,56
%Reducción	34	30	18

En el plan se destaca la mayor reducción, antes de la etapa de recocido, a la cual será sometida la bobina 81126 con TTH. 550°C – 2 horas.

### B. Obtención de probetas

La fabricación de las probetas “huesitos”, se realizó según la norma ASTM E8M-04 y B557M-02 a. Para los ensayos de embutibilidad, se cortaron las puntas de la lámina en pedazos de 5,6 x 1,3 m y estos en siete pedazos de 0,8 m de ancho, para luego tomar dos pedazos también de 0,8 m de ancho y largo 1,3 m, para de ahí elaborar una probeta de 510x110 mm<sup>2</sup> y obtener 4 discos de diámetro 58 mm para el ensayo Swift.

### C. Ensayos mecánicos

En la obtención de las curvas de ingeniería, para determinar los parámetros mecánicos: esfuerzo de fluencia (Sf), tracción (St), deformación a la rotura (er) y exponente (n) de endurecimiento, se utilizó el servicio de la Unexpo, en la cual existe la máquina de ensayos Marca Zwick/Roel, modelo Z050, con capacidad de 50 KN. En la determinación de n se aplicó la norma ASTM E646-00, a las curvas de ingeniería resultante en cada espesor, incluyendo el inicial. Para conocer la respuesta de deformación del material ante el proceso de embutición profunda, se punzonó la lámina para obtener la copa Swift [7], utilizando el siguiente equipo y material: máquina de ensayos Marca Tenius-Olsen Automatic, modelo BP-612; Troqueladora hidráulica; punzón de diámetro 34 mm, y matriz de diámetro 35 mm, lubricados con aceite de coco. Para medir el porcentaje de orejamiento, se utilizó un instrumento comparador marca Starret, modelo 655-441 de una pulgada de apertura y apreciación de 0,001, junto a la práctica Alcasa, E20-147.

## III. RESULTADOS

### A. Laminación en frío.

En la Tabla II, se recogen los resultados de espesor y porcentaje de deformación después de cada pase de laminación de la aleación de aluminio 3003, con TTH a 550°C y 2 horas de calentamiento isotérmico, cuyas velocidades de laminación estuvieron en el mismo orden de velocidad máxima hasta 294 m/min de la 3003 sin TTH.

**TABLA II. RESULTADOS DE APLICACIÓN DEL PLAN DE LAMINACIÓN EN FRÍO**

Pases laminación	81126	81314	Observaciones
Espesor inicial (mm)	5,6	5,6	Bobina real
Primer	2,0	2,0	Se mejoró el plan en 0,2 mm
Segundo	1,2	1,0	Se cumplió
tercer	0,76	-----	Se cumplió
% Reducc. Acumulado	86,4	82,1	Se cumplió
Recocido: 400°C-3 horas	0,76	1,0	-----
Primer pase después del recocido	0,53 (H14)	0,69 (H14)	Se cumplió
%Reducción	30,3	31,0	Se cumplió

Ambas bobinas soportaron las demandas del plan de laminación, y en el primer pase se eliminaron dos de los tres pases rutinariamente realizados durante la laminación en frío del mismo material AA 3003 sin tratamiento previo de homogeneizado; y un pase respecto al material AA 3105 obtenido vía tradicional de laminación en caliente hasta los 6,0 mm y luego en frío hasta 0,33 mm para su embutición profunda [8], ambas aleaciones fabricadas en Alcasa. La reducción de espesor desde 5,6 hasta 2,0 mm, medida en la etapa neta de laminación, sin el montaje de la bobina, tuvo una productividad de 0,9 ton/min, permitiendo una mejora del 200,0 %, respecto a 0,30 ton/min para idéntica aleación sin TTH., en el mismo rango de espesores. Referente a la comparación de costos considerando la inclusión del TTH, en julio del 2008 anterior a la presente investigación, la Superintendencia Ingeniería Industrial de Alcasa, estimó una disminución de costos mínima del 20%, en caso de utilizarse un TTH con más de cuatro horas de calentamiento isotérmico.

### B. Propiedades mecánicas

#### B.1. Ensayo de tracción

En la Tabla III, se observan los resultados extraídos de las curvas de ingeniería generada por cada probeta ensayada a tracción en cada pase de laminación correspondiente a la bobina 81126.

**TABLA III. PARÁMETROS MECÁNICOS POR PASE DE LAMINACIÓN EN BOBINA 81126**

Espesor (mm)	Etapas	S <sub>f</sub> (Kgf/mm <sup>2</sup> )	S <sub>t</sub> (Kgf/mm <sup>2</sup> )	e <sub>r</sub> (%)
5,6	Homog.	7,5	12,0	52
2,0	1º pase	11,6	13,0	6,4
1,2	2º pase	11,8	12,6	4,8
0,76	3º pase	13,8	16,0	6,3
0,76	Recocido o 400C- 3h	5	11,5	44
0,53	pase H14	15	18,3	5,5

Los bajos valores de fluencia (S<sub>f</sub>) y tracción (S<sub>t</sub>), y la alta deformación (e<sub>r</sub>) obtenidos en el espesor 5,6 mm, de la aleación de aluminio 3003 sometida a homogeneización de 550 °C y 2 horas de retención, son propios de un material muy dúctil. Se resaltan las pocas variaciones en el esfuerzo de fluencia (S<sub>f</sub>) y deformación a la rotura (e<sub>r</sub>) entre los espesores 2,0 y 0,76 mm antes del recocido, por cuanto el material no presenta tendencia a endurecer, a pesar de haber recibido dos pases de laminación, para una reducción del 62%. La Tabla IV, contiene los parámetros mecánicos del mismo material, 5,6 mm de espesor sin tratamiento de homogeneización.

**TABLA IV. PARÁMETROS MECÁNICOS DE ALEACIÓN 3003 CCDD SIN T T H**

Espesor (mm)	Etapas	S <sub>f</sub> (Kgf/mm <sup>2</sup> )	S <sub>t</sub> (Kgf/mm <sup>2</sup> )	e <sub>r</sub> (%)
5,6	Sin homogeniz.	11,0	16,2	24

Fuente: [9]

Comparando estos resultados con los de la Tabla III, la aleación 3003 con TTH, resulta con mejoras en todos los valores que favorecen la ductilidad del material: 31,8% en disminución del S<sub>f</sub>; 13,5% en disminución de S<sub>t</sub>-S<sub>f</sub>; 116,7% en aumento de e<sub>r</sub>, por lo que se puede inferir que el tratamiento de homogeneizado produjo cambios en el material experimental que favorecieron sus propiedades de ductilidad.

## B.2. Exponente (n) de endurecimiento

Los valores verdaderos de esfuerzos y deformación superiores a los de fluencia son los tomados en cuenta para determinar la respuesta de un material al proceso

de embutición profunda y entre los modelos matemáticos propuestos para representar la curva de plasticidad, el de Hollomon [10], representado por (2) es el que mejor se adapta.

$$\sigma = K \varepsilon^n, \quad (2)$$

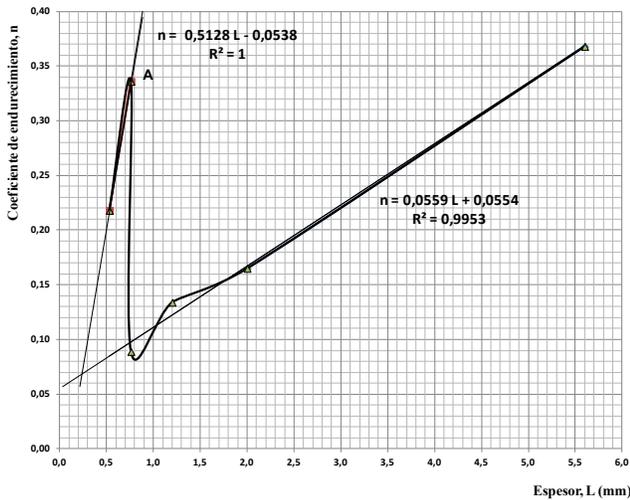
$\sigma$ : esfuerzo real; K: coeficiente de endurecimiento, su valor es igual o mayor al esfuerzo de fluencia; n: exponente de endurecimiento. A valores mayores de n, más embutible será el material, razón por la que se considera uno de los dos mejores parámetros para determinar la embutibilidad de un material [11].

En la Tabla V se indican los resultados de los exponentes de endurecimiento obtenidos en cada uno de los espesores ensayados a tracción.

**TABLA V. VALORES DEL EXPONENTE (n) DE ENDURECIMIENTO DE LA ALEACIÓN AA3003 CCDD CON TTH**

Espesor L (mm)	n
5,6	0,368
2,0	0,165
1,2	0,134
0,76	0,089
0,76 Recocido	0,336
0,53	0,218

En la Fig. 1 se grafican estos resultados y se visualiza una relación lineal entre el exponente de endurecimiento (n) y la disminución de espesor (L), de manera que al aumentar la deformación disminuye el exponente. Mediante software Excel se obtuvieron las ecuaciones de las líneas, con elevado valor del coeficiente de regresión R<sup>2</sup> indicativo de la fuerte correlación existente entre n y L en la reducción desde 5,6 mm hasta 0,76 mm, antes del recocido. La línea que se inicia en el espesor recocido (A) se intercepta con la anterior en el espesor 0,25 mm, lo cual se puede interpretar como el espesor mínimo a obtener en este material.



**Figura 1. Relación empírica entre el exponente de endurecimiento ( $n$ ) y el espesor de laminación ( $L$ ), en la aleación 3003-CCDR, con TTH**

El exponente de endurecimiento ( $n$ ), en términos generales satisface la teoría de endurecimiento por deformación plástica, al disminuir en la medida que el material es sometido a procesos de deformación, pues es conocido que aumenta sus propiedades de resistencia en detrimento de las de ductilidad [12] y es más sensible al incrementarse la tasa de deformación, como es el caso de la laminación en frío que ocurre a elevadas velocidades de banda [7]. Esta tendencia a la baja del exponente de endurecimiento al aumentarse la deformación fue reportada por [13], en acero micro aleado laminado en frío con porcentajes de deformación del 10, 20 y 30%. En el espesor 5,6 mm homogeneizado,  $n$  tiene un valor elevado (0,368), siendo superior al valor 0,224 de la lámina virgen sin TTH, obtenido por [9], con lo cual se obtiene una mejora del 58,6% favorable al material 3003 con TTH. Después del recocido, a temperatura de 400°C, el material se recupera de la deformación previa y  $n$  vuelve a crecer (0,336), a un valor más bajo que el correspondiente al del homogeneizado, y se asocia a una menor redistribución de las dislocaciones en arreglo de baja energía. El valor de  $n = 0,218$  en el espesor 0,53 mm, H14, se corresponde con el valor de 0,25 reportado por [14], donde se utilizó la 3003 H14; sin embargo esta muy alejado del 0,44 registrado en [15] usando la 3003 H16, lo que parece contradictorio por cuanto el H16 representa una deformación del 50 al 55%, mientras que el H14, es solo del 25 al 35% [8].

### B.3. COPA SWIFT

En la lámina 3003-CCDR con TTH, espesor 5,3 mm, se realizaron cuatro de éstos ensayos todos con resultados exitosos, sin daños por grietas y con líneas de deformación paralelas entre si y perpendiculares a la

base de la copa, y a ojo desnudo, con muy bajo valor de orejamiento lo que es indicativo de las buenas propiedades isotrópicas del material experimental, contrario a los resultados de una copa suministrada por Alcasa y elaborada en aleación de aluminio 3105, espesor 0,33 mm obtenida vía tradicional de laminación en caliente, en la cual existe un borde ondular y presenta líneas de deformación a 45° respecto a la base de la copa. En la Fig. 2, se evidencia la diferencia en la planicidad de los bordes de ambos productos. Mientras menos ondulaciones tenga el borde, menor desperdicio se obtendrá en caso de ser necesario un borde perfectamente plano.



**Figura 2. Fotografía de las copas del ensayo Swift de embutición profunda de las aleaciones comerciales de aluminio de Alcasa, la tradicional AA3105 y AA3003 de esta investigación**

En la tabla VI, se comparan los resultados de medición del orejamiento (%O) en dos copas resultantes del ensayo de embutición profunda en de la 3003-CCDR, con TTH y una de la 3105.

**TABLA VI. VALORES DE OREJAMIENTO OBTENIDO DEL ENSAYO SWIFT EN LAS ALEACIONES 3003 Y 3105**

Material Alcasa obtenido vía laminación en caliente (3105)						
Valles	0,666	0,602	0,595	0,602	2,465	%O=4,9
Picos	0,655	0,650	0,630	0,654	2,589	
Material experimental, obtenido vía colada de doble rodillo, con TTH (3003)						
Valles	0,667	0,663	0,687	0,678	2,695	%O=1,1
Picos	0,682	0,673	0,676	0,694	2,724	
Valles	0,679	0,658	0,670	0,696	2,703	%O=1,7
Picos	0,666	0,691	0,700	0,691	2,748	

El %O de 1,1 y 1,7 se encuentra por debajo del 2,0% aceptado industrialmente [16]. La embutibilidad del material experimental, medida por el recorrido del punzón en el ensayo de copa Swift, fue de 16,4 mm, superior a los 12 mm obtenidos por [17], en copas de láminas para embutición profunda de acero de muy bajo carbono (0,04 %C) con espesor promedio de 0,44 mm, fabricadas en Sidor para elaboración de filtros automotrices. Considerando estos resultados se puede concluir que el material experimental 3003, obtenido vía CCDR, con TTH 550°- 2 horas, laminado hasta espesor final de 0,53 mm es embutible.

#### IV. CONCLUSIONES

Dos bobinas de aleación de aluminio 3003, obtenidas vía colada continua de doble rodillo, previamente sometidas a tratamiento térmico de homogeneizado a 550°C – 2 horas de calentamiento isotérmico, fueron laminadas en frío a escala industrial y una de ellas fue caracterizada mecánicamente mediante ensayos de tracción y embutición profunda.

Se eliminaron dos pases en el proceso de laminación que se asocian a mejoras en la productividad y reducción de costos.

Los resultados de los parámetros que más influencia tienen en las propiedades de ductilidad se corresponden con los del material embutible.

#### RECONOCIMIENTO

El autor agradece a la Unexpo por facilitar sus laboratorios y a la empresa Alcasa por suministrar sus productos y equipos industriales para la realización de la presente investigación.

#### V. REFERENCIAS

- [1] J. F Shackelford Ciencia de los Materiales para Ingenieros. (3ed). México. Prentice Hall, 1995, p. 162.
- [2]. J. D. Verheeven. Fundamentos de Metalurgia. Limusa. México, 1974, pp. 73-76.
- [3]. J. G. Sevillano. Plasticidad de sólidos cristalinos mediante deslizamientos cristalográficos: Deformación de cristales bajo condiciones de contorno de desplazamiento. Universidad de Navarra, Septiembre 2002, pp. 1-14
- [4]. P. G. Estadística elemental. C.E.C.S.A 2ed. México, 1974, p. 74.
- [5]. G. I. Taylor. "Plastic Strain in Metals". Twenty-Eighth May Lecture to Institute of Metals, Delivered May 4, 1938, pp. 307-317.
- [6]. J. W. Hutchinson." Plastic stress-strain relations of F.C.C polycrystalline metals hardening according to Taylor's rule". J. Mech. Phys. Solids, Vol. 12, pp 11 to 24. Pergamon Press Ltd. Great Britain. 1968.
- [7]. M. A. Meyers, and K. K Chawla. Mechanical Behavior of Materials. Prentice-Halls. E.U, 117, 1999, pp. 126-127, 150-152, 171-172.
- [8]. G. H. C. Navarro. Evaluación y Caracterización de Aluminio CVG ALCASA 3105 Durante el Proceso de Laminado en Frío. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Experimental de Guayana, 2003, Puerto Ordaz.
- [9]. S. Villegas. Caracterización mecánica y microestructural de la aleación AA 3003, vía Colada Continua de Doble Rodillo, sin Tratamiento de Homogeneizado . Tesis de Maestría, sin publicar. Universidad Experimental de Guayana. 2012. Puerto Ordaz.
- [10]. J. H. Hollomon, "Tensile Deformation". Trans AIME, 1945, pp. 268-290.
- [11]. E. A. Pelegry, J. I. Verdela y J. A. Pedro-Sanz. "Parámetros mecánicos estructurales y orientaciones

preferentes de chapas de acero dulce para embutición". Dyna N° 2. Febrero, 1976, pp. 73-80.

[12]. G. E. Dieter. Metalurgia Mecánica. Aguilar. España, 1967, p. 58.

[13]. C. Angarita, P. Moewis y L. Sáenz. "Evaluación del comportamiento mecánico del acero microaleado X-60 laminado en frío y sometido a tratamiento térmico de recocido". Revista de Ingeniería U.C. VOL. 10. N° 3, 2003, pp. 28-36.

[14]. M. Romero, B. Hidalgo y M. Velandia." Caracterización microestructural de la aleación AA-3003 con temple H-14". Copérnico, Año VI (11), 65. Julio-Diciembre, 2009.

[15]. M. Velandia, M. Romero y L. Gómez. "Determinación del Coeficiente de endurecimiento n en láminas de aleación

de aluminio AA- 3003- H16". 6th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Junio.4-6, 2008, pp.1-6.

[16]. X. M. Chen. "Earing behavior and crystallographic texture of aluminum alloys during cold rolling". Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 10(4) August 2001, pp. 399-404.

[17]. V. Ch. G. Veruska. Determinación del comportamiento del acero utilizado para la fabricación de hojalata T1 destinada a la producción de filtros automotrices. Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero en Materiales. Universidad Nororiental Privada Gran Mariscal de Ayacucho, 2001, Puerto Ordaz.