

Determinación del Coeficiente de Endurecimiento “n” en laminas de la Aleación de Aluminio AA-3003 H₁₆

Miguel Velandia

Universidad Nacional Experimental de Guayana, Ciudad Guayana, Venezuela, mvelandi@uneg.edu.ve

Maguampi Romero

Universidad Nacional Experimental de Guayana, Ciudad Guayana, Venezuela, joromero@uneg.edu.ve

Leonir Gómez

Universidad Nacional Experimental de Guayana, Ciudad Guayana, Venezuela, lgomez@uneg.edu.ve

RESUMEN

Las operaciones de conformado de metales y aleaciones siempre muestran algún tipo de anisotropía; para simplificar el análisis de sus propiedades la anisotropía es usualmente despreciada y se asume que el material es isotrópico. Sin embargo, un análisis adecuado debe desarrollarse para predecir el flujo plástico del material durante la deformación y las propiedades del producto final. Las aleaciones de aluminio de la serie AA-3XXX, tienen una amplia aplicación en la industria de transporte alimentos y bebidas, lo que requiere un control de la anisotropía de las láminas de la aleación a fin de asegurar la formabilidad y reducir las pérdidas de material durante los procesos de conformado. En este trabajo se presenta un método experimental conocido como curva de flujo en el cual se determina el coeficiente de endurecimiento en láminas conformadas en frío de aleaciones de Aluminio; el valor de este parámetro es de utilidad en el análisis de la anisotropía de este tipo de aleaciones laminadas en frío pues puede asociarse a la orientación preferencial de granos en el material laminado.

Palabras claves: Anisotropía, coeficiente de endurecimiento, formabilidad

ABSTRACT

The operations to forming of metals and alloys are always show kind of anisotropy, to simplify the analysis of a material's mechanical properties, anisotropy is usually despised and it is assumed that the material is isotropic. However, proper analysis should be developed to predict the flow of material during plastic deformation and properties of the final product. The aluminium alloys of Series AA-3XXX, have a wide application in the transportation, food, beverages and packacking industries, which requires monitoring of the anisotropy sheets of alloy, to ensure formability and reduce losses material during the process of forming. This paper presents an experimental method known as flow curve in which determines the ratio of hardening in cold-shaped sheets of aluminum alloys, the value of this parameter is useful in the analysis of this type of anisotropy alloy cold-rolled as it can associate itself with the preferential orientation of grains in the material laminate.

Keywords: Anisotropy, hardening coefficient, formability

1. INTRODUCCION

Las mediciones de propiedades de láminas de aleaciones de aluminio, son importantes para la caracterización de la calidad de material. No existe una relación simple entre las propiedades y el comportamiento al conformado ya que los estados de esfuerzo y el comportamiento de la deformación durante el conformado del material no es duplicado durante los ensayos de tracción.

En los materiales estructurales la respuesta mecánica puede ser altamente anisotrópica como consecuencia del comportamiento intrínseco de su red cristalina resultante de los procesos de fabricación. La mayoría de los materiales laminados exhiben una pronunciada influencia de la dirección del laminado sobre sus propiedades mecánicas. Un parámetro que permite evaluar este efecto es el coeficiente de endurecimiento “n”, el cual se determina a través de la curva esfuerzo deformación real, también conocida como curva de flujo o fluencia. El coeficiente de endurecimiento se considera una medida de la máxima deformación obtenida durante el laminado en frío, así un valor alto corresponde a una alta deformación uniforme, un valor bajo muestra la tendencia del material a estricciones locales.

La curva de flujo se puede modelar a través de diferentes ecuaciones: La ley de potencia (Ludwik-Hollomon): $\sigma = K\varepsilon^n$, la ley de potencia (Krupkowsky): $\sigma = K (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$, y la ley de saturación: $\sigma = A+K(1- e^{-n\varepsilon})$. (L. Smith 2006)

2. DESARROLLO

2.1 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

Al deformar un cuerpo (por ejemplo en tracción) desde el comienzo de esta deformación hasta el momento de fractura, se observa un aumento en la resistencia del material a medida que es deformado; este fenómeno es conocido como endurecimiento por deformación y ocurre en aleaciones de aluminio de las series 2XXX, 3XXX, y 5XXX. Uno de los medios más comunes para adicionar resistencia a una aleación se basa en el uso de la deformación permanente del material a través de diversos procesos de conformado, por lo cual recibe el nombre de endurecimiento por trabajo o trabajo en frío. Este endurecimiento se asocia al frenado y apilamiento de las dislocaciones por la deformación permanente, y a la presencia de una mayor área en la frontera de grano que inhibe dislocaciones subsecuentes. Debido a esto el material se resiste a ser deformado y es necesario aplicar tratamientos de recocido para recuperar propiedades y poder conformarlo mucho más. Para estudiar lo que ocurre teóricamente se realizan ensayos de tracción, obteniéndose dos tipos de curvas, la curva esfuerzo-deformación convencional, y la curva de esfuerzo- deformación verdadera. Para el análisis estricto del endurecimiento por deformación es necesario emplear la curva esfuerzo- deformación verdadera.

2.2 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN VERDADERA

Las curvas de esfuerzo-deformación convencional no muestran una indicación real de las características de la deformación de un metal, debido a que se basa en las dimensiones originales de la muestra y éstas durante la prueba cambian continuamente. Las curvas basadas sobre esfuerzos de tracción verdaderos y deformaciones instantáneas de las muestras, se conocen como curvas de flujo o curvas esfuerzo-deformación verdadera, y representan básicamente las características de la deformación plástica del material.

Estas se pueden determinar fácilmente de la curva de esfuerzo convencional por la correlación entre el esfuerzo real “ σ ” y el esfuerzo convencional “s” (Dieter 1976)

$$\sigma = \frac{P}{A}(e + 1) = s(e + 1)$$

La cual es válida siempre que se asuma un volumen constante y una distribución homogénea de esfuerzos en la muestra en tracción. La deformación real “ ε ” es determinada de la deformación convencional o ingenieril “e” por:

$$\varepsilon = \ln (e + 1)$$

Para metales y aleaciones dúctiles como el aluminio y sus aleaciones, normalmente se cumple una relación entre el esfuerzo y la deformación verdadera, que se describe por una relación potencial de la forma conocida como ecuación de Ludwik-Hollomon. (Siegert et al., 1994)

$$\sigma = K \varepsilon^n \rightarrow \log \sigma = \log K + n \log \varepsilon$$

Si se grafica la curva esfuerzo-deformación real en coordenadas logarítmicas, como en la Figura 1, se observa que la mayoría de los puntos caen en dos líneas rectas, la primera línea representa la porción elástica de la curva en la cual se cumple la Ley de Hooke y el módulo de elasticidad es constante ($\sigma = E \cdot \varepsilon$). La segunda línea representa la región plástica de la curva, donde ocurre el endurecimiento por deformación y resume la relación esfuerzo-deformación en la zona plástica mediante la ecuación ($\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon$), donde n representa el coeficiente de endurecimiento y K el coeficiente de resistencia para una deformación real $\varepsilon = 1$. Ver Figura 2. Así mediante una regresión lineal de la curva esfuerzo- deformación real podemos determinar este coeficiente, que determina como endurece el metal cuando esta siendo deformado.

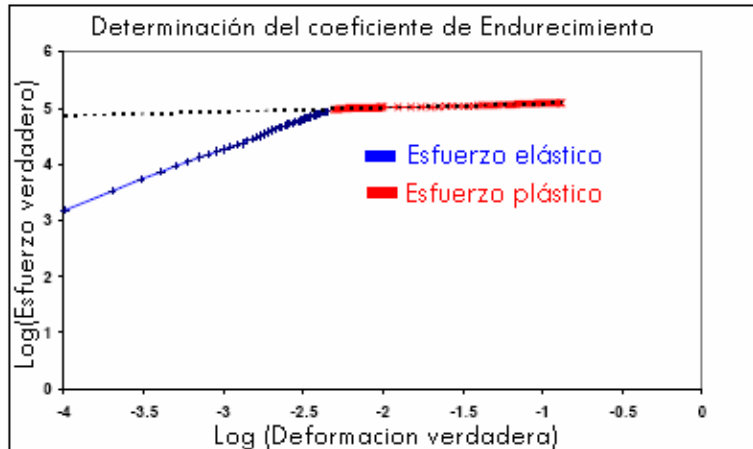


Figura 1. Curva log-log del esfuerzo vs deformación verdaderos

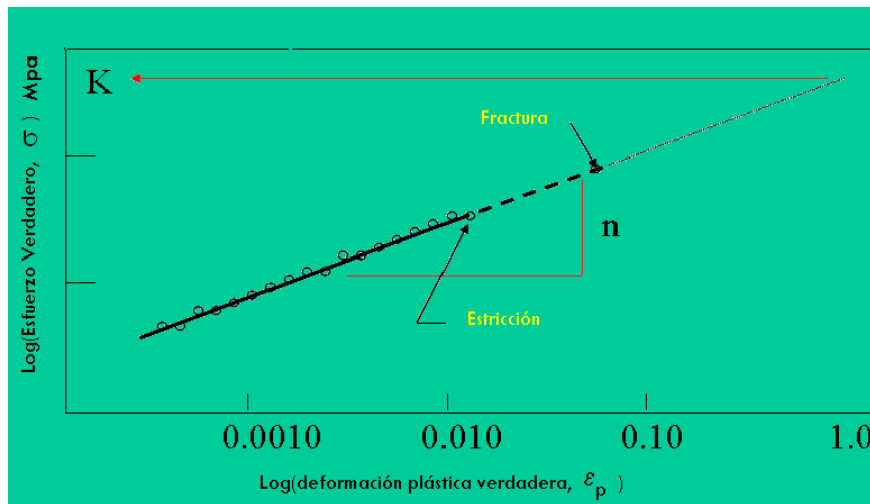


Figura 2. Sección plástica de la curva esfuerzo vs deformación verdaderos

Los valores del coeficiente de endurecimiento van desde $n=0$ (sólido perfectamente plástico) hasta $n=1$ (sólido elástico), para la mayoría de los metales n tiene un valor entre 0,1 y 0,5. Los materiales con un alto valor de “ n ” tienen mejor formabilidad que aquellos con un bajo valor, esto significa que un endurecimiento (temper) de alta resistencia de un material dado, típicamente tendrá un valor mucho menor de “ n ” que un “temper” de menor resistencia para el mismo material.

Ya que el valor de esfuerzo de fluencia es alto, el valor de “K” también se incrementará para altos “temper”. Algunas desviaciones de esta ecuación frecuentemente son observadas a menudo a bajas deformaciones (10^{-3}) o a altas deformaciones (Smith 2006). Ver la tabla 1.

Tabla 1. Valores de K y n a temperatura ambiente (Key to Metals Steel)

Metal	Condition	n	K, psi
0,05% C steel	Annealed	0,26	77000
SAE 4340 steel	Annealed	0,15	93000
0,60% C steel	Quenched and tempered 1000°F	0,10	228000
0,60% C steel	Quenched and tempered 1300°F	0,19	178000
Copper	Annealed	0,54	46400
70/30 brass	Annealed	0,49	130000

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se determina el coeficiente de endurecimiento en láminas de una aleación de aluminio AA-3003, sometida a un porcentaje de reducción de 50 a 55% (Temple H₁₆), la composición de la aleación se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Composición de AA-3003

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
% en peso	0,6	0,7	0,05-0,20	1-1,5	0,1	Bal

- Se tomaron muestras del material laminado para la obtención de probetas representativas de toda la lámina, en las diferentes direcciones: paralela (0°); perpendicular (90°) y diagonal (45°) a la laminación.
- Se troquelaron probetas para realizar dicho ensayo en una máquina de ensayo universal, según norma ASTM E8-95
- Con los resultados obtenidos se realizan curvas de flujo para las distintas direcciones y la regresión lineal de cada una de ellas, para el cálculo de los coeficientes n y K

4. RESULTADOS

A continuación se presentan resultados del ensayo de tracción para las diferentes direcciones analizadas, ver tabla 3, así como las gráficas de las curvas de flujo para cada dirección de la aleación laminada.

Tabla 3. Valores del ensayo de tracción a 0° - 45° y 90°

0°				45°				90°			
σ_c (psi)	% ϵ	σ_v (psi)	ϵ_v	σ_c (psi)	% ϵ	σ_v (psi)	ϵ_v	σ_c (psi)	% ϵ	σ_v (psi)	ϵ_v
350	1,20	354,200	0,012	375	1,75	381,563	0,017	375	1,50	380,625	0,015
375	1,30	379,875	0,013	380	1,80	386,840	0,018	380	1,10	384,180	0,011
400	1,50	406,000	0,015	385	1,85	392,123	0,018	385	1,15	389,428	0,011
420	1,55	426,510	0,015	390	1,90	397,410	0,019	390	1,20	394,680	0,012
425	1,60	431,800	0,016	395	1,95	402,703	0,019	395	1,30	400,135	0,013
430	1,75	437,525	0,017	400	2,0	408,000	0,020	405	1,50	411,075	0,015
440	1,80	447,920	0,018	405	2,05	413,303	0,020	415	1,60	421,640	0,016
445	1,90	453,455	0,019	415	2,15	423,923	0,021	425	1,80	432,650	0,018
450	2,0	459,000	0,020	425	2,25	434,563	0,022	475	2,25	485,688	0,022

Donde σ_c =esfuerzo convencional, σ_v = esfuerzo verdadero, % ϵ = % deformación, ϵ_v = deformación verdadera

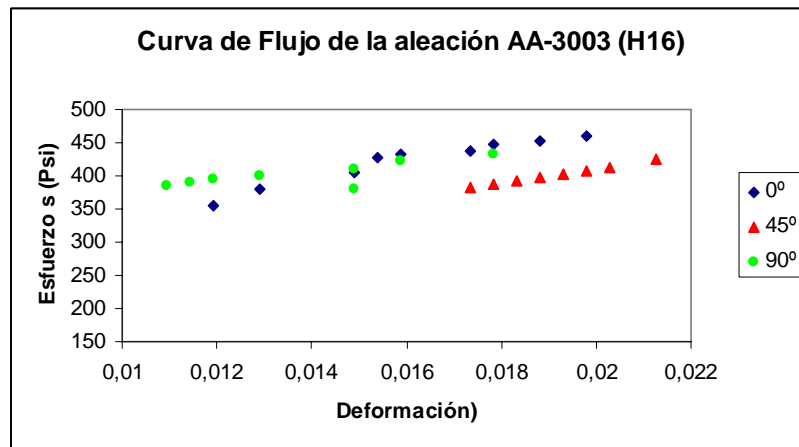


Figura 3. Gráfica de la curva Esfuerzo vs Deformación de la aleación 3003 (H16)

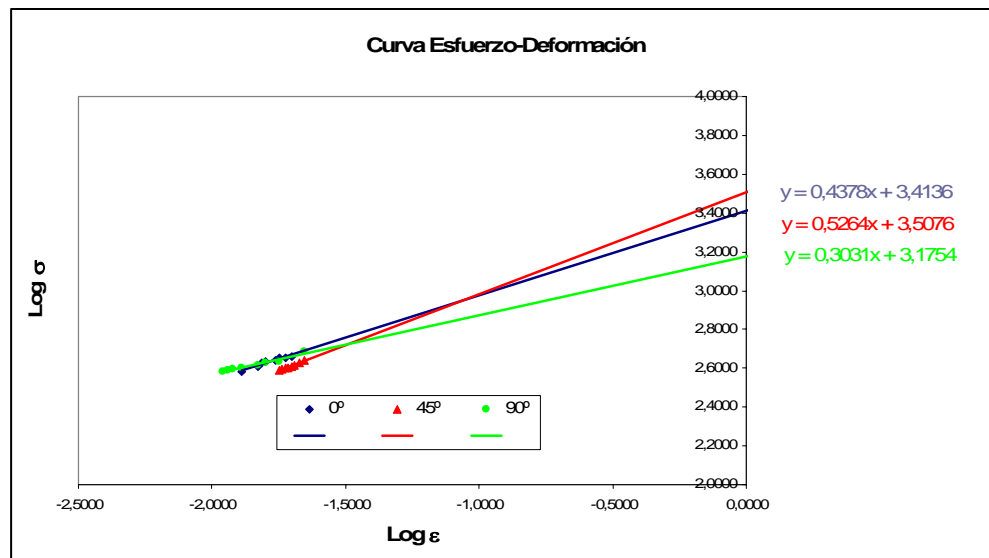


Figura 4. Gráfica Log-Log de la curva Esfuerzo vs Deformación de la aleación 3003 (H16)

Las curvas de la Figura 3 evidencian una marcada diferencia para los valores en las diferentes direcciones de la muestra laminada, observándose mayor porcentaje de deformación en la dirección de 45°. Los valores graficados en escala logarítmica, Figura 4 muestran una curva aproximadamente recta de la cual se obtuvieron el coeficiente de endurecimiento “n” y el de resistencia K para cada caso, observándose un mayor endurecimiento a 45° en la lámina. Ver tabla 4

Tabla 4. Valores de n y K para la aleación AA- 3003 (H16)

Dirección	Coficiente n	Coficiente K
0°	0,44	3,4
45°	0,53	3,5
90°	0,30	3,2

En materiales con valores elevados de n , el esfuerzo de flujo (σ) aumenta rápidamente con la deformación (ϵ). Este comportamiento hace que la deformación se distribuya a regiones de baja deformación (ϵ) y bajo esfuerzo de flujo (σ). Un elevado valor de n , es indicativo de buena formabilidad en un proceso de estiramiento.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos llevan a las siguientes conclusiones:

- El coeficiente de endurecimiento por deformación calculado a través de este procedimiento indica que el material tiene una formabilidad moderada
- Las variaciones de los coeficientes de endurecimiento en las diferentes direcciones de laminación evidencian la anisotropía del material
- El mayor valor de n y K en la dirección a 45° que permite inferir una mejor deformación o conformado preferencial en esa dirección

REFERENCIAS

Dieter. G, Mechanical Metallurgy, McGraw- Hill 1976

Siegert K.; S. Wagner,(1994) Formability Characteristics of Aluminium Sheet. TALAT, Lectura 3701.

Smith, L. Oakland University (Updated:1/4/2006). Chapter 4: Hardening. [en línea] disponible:personalwebs.oakland.edu/~l8smith/junk3/NewMetalFormingNotes/ch%204%20hardening.pdf

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en los procedimientos de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.