Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2004; **24** (2): 31-36

ESTIMACIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA PARA MATERIALES LAMINADOS EN FRÍO

Mary Torres, Verónica Di Graci, Gustavo González, Omar Zurita

Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar. Caracas 1080. Venezuela.

E-mail: matorres@usb.ve; vdigraci@usb.ve; gustag@cantv.net; ozurita@usb.ve

Revisado: 30-Mar-2006; Aceptado: 09-May-2006
Publicado On-Line: 19-May-2006
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

Las ecuaciones de Hollomon en tensión simple de un acero AISI 1040 y un cobre puro recocidos se emplean para estimar sus resistencias a la fluencia después de trabajárseles en frío mediante laminación. Los valores así calculados para ambos materiales, resultan siempre mayores que los valores experimentales obtenidos mediante ensayos de tensión simple, para los correspondientes valores de deformación aplicada. Con la finalidad de corregir esta discrepancia entre los valores calculados y los experimentales, se formulan ecuaciones de Hollomon modificadas con un factor que debe ser característico del proceso de endurecimiento durante el conformado del metal en particular.

Palabras Claves: *Hollomon, Laminación, Fluencia, Acero, Cobre*

Abstract

Hollomon´s equation from a tension test for AISI 1040 steel and pure copper both in an annealed condition has been used to predict the yield strength of both materials after being cold-worked by rolling. The yield strength of the cold-worked materials was experimentally determinated by means of tension tests and compared to those values estimated through Hollomon´s equation. The experimental yield strength values were always lower than those calculated by means of Hollomon´s equation. A Modified Hollomon´s equation with a deformation factor is presented in order to obtain the right values. It is expected that the factor will be characteristic of the forming process for each metal.

Keywords*: Hollomon, Rolling, Yielding, Steel, Copper*

1. INTRODUCCIÓN

Una de las ecuaciones empíricas más común que describe el comportamiento plástico de un acero al carbono, debido a que ajusta de una manera más satisfactoria y simple los esfuerzos y deformaciones, es la ecuación de Hollomon [1]:

$$\sigma = \sigma_o \, \varepsilon^m \qquad (1)$$

donde $\boldsymbol{\sigma}$ es el esfuerzo real; $\boldsymbol{\sigma_o}$ y **m** son el coeficiente y el exponente de endurecimiento por deformación de Hollomon, respectivamente; y $\boldsymbol{\varepsilon}$ es la deformación real.

Las variables $\boldsymbol{\sigma}$ y ε definen cada uno de los puntos de la curva esfuerzo-deformación real del material recocido. El coeficiente $\boldsymbol{\sigma_o}$ es el esfuerzo real para producir una deformación real unitaria y el exponente **m** es una medida de la capacidad de endurecimiento por deformación del material; ambos valores, que se reportan como propiedades de los metales, varían para cada aleación y dependen de la condición del material [2]. Una de las utilidades prácticas de esta expresión matemática es que permite estimar la formabilidad del material al considerar la magnitud del exponente de endurecimiento **m** en la ecuación (1) [3].

La ecuación de Hollomon también se define como el lugar geométrico de todos los valores posibles que puede alcanzar el límite de fluencia de un metal mediante deformación plástica [3]. Cuando el material tiene trabajo en frío, el esfuerzo de fluencia se puede determinar teóricamente utilizando la ecuación de Hollomon del material recocido de la siguiente manera:

$$S_{yw} = \sigma_{yw} = \sigma_o \, \varepsilon_w^m \qquad (2)$$

donde $\mathbf{S_{yw}}$ y $\boldsymbol{\sigma_{yw}}$ son la resistencia y el esfuerzo real a fluencia respectivamente del material trabajado en frío; $\boldsymbol{\varepsilon_w}$ es la deformación real de trabajo en frío.

Este conocimiento es de gran importancia ya que, al diseñar, se puede estimar el esfuerzo de fluencia resultante de la pieza fabricada mediante deformación plástica. Sin embargo, la discrepancia de los valores calculados del esfuerzo de fluencia, con respecto a los experimentales, ha sido motivo de estudio debido a su importancia en el diseño ingenieril. Según Ratke y Welch [4] esta discrepancia se debe al método empírico empleado en la obtención de los modelos matemáticos utilizados en el cálculo.

En el presente trabajo se obtienen los valores calculados de resistencia a la fluencia de un acero AISI 1040 y cobre electrolítico laminados en frío, a partir de las ecuaciones de Hollomon obtenidas de los materiales recocidos evaluados a tensión. Los valores así calculados son mayores que los respectivos valores experimentales obtenidos mediante ensayos de tensión simple, para los dos materiales. Para tratar de corregir la discrepancia entre ambos valores se propone una ecuación de Hollomon modificada donde se ajusta la deformación plástica suministrada con un factor característico del proceso de conformado y del material.

2. PARTE EXPERIMENTAL

En el presente estudio se emplearon pletinas de 2440 mm x 100 mm x 16 mm de acero al carbono AISI 1040, recocidas a 800ºC por dos (2) horas, y pletinas de cobre electrolítico puro de 350mm x 20mm x 10mm, recocidas parcialmente [5]. El tratamiento térmico de recocido parcial se realizó a una temperatura de 300ºC por una hora, empleando un horno sin atmósfera controlada en el cual se introdujeron todas las pletinas. Las composiciones químicas de ambos materiales se muestran en la tabla 1. Para la determinación experimental de las propiedades mecánicas de los materiales recocidos, se realizaron ensayos de tensión en una máquina Universal de Ensayos MTS 810 de 25 toneladas de capacidad, con una velocidad de desplazamiento constante e igual a 3 mm/min, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM E8 M-91 [6]. Para los ensayos del cobre se utilizó un extensómetro MTS modelo 6-51-15-M-A, clase B. Las probetas empleadas se diseñaron siguiendo las especificaciones descritas en la norma ASTM A 370-91a [7]. Un total de tres probetas fueron ensayadas para los promedios obtenidos, los cuales se presentan en las tablas 2 y 3. La obtención de datos se llevó a cabo a una razón de 1000 puntos/s, utilizando el programa computacional DASYLAB.

Las pletinas de cobre y acero recocidas se laminaron, en dirección paralela a su dimensión mayor, en una laminadora STANAT modelo A270, con una velocidad de 10,2 x 10^{-2} m/s. El trabajo en frío se realizó en forma progresiva, para cada material, cortando después de cada pasada tres piezas, para un total de 30 piezas laminadas correspondientes a las 10 condiciones de estudio. Las deformaciones efectivas por trabajo en frío para el acero estuvieron comprendidas en el intervalo de 0,019 y 0,256, mientras que para el cobre estuvieron entre 0,022 y 0,640, como se observa en la tabla 4 para ambos materiales.

Las propiedades mecánicas de los materiales laminados se obtuvieron a partir de ensayos de tensión simple siguiendo el mismo procedimiento, condiciones y normas para los materiales en estado recocido antes señalados. Para la determinación de los valores experimentales de resistencia a la fluencia del cobre se empleó la convención del 0,2% de deformación.

Tabla 1. Composiciones químicas del acero y cobre puro.

Material	*Elemento*	*Análisis Químico (% en peso)*
Acero AISI 1040	C	0,400 ± 0,001
	Mn	0,780 ± 0,010
	Si	0,360 ± 0,010
Cobre Electrolítico	Cu	99,998 ± 0,001
	Zn	0,002 ± 0,001

Tabla 2. Valores promedios de las propiedades mecánicas a tensión del acero AISI 1040.

Propiedad	*Valor*
Condiciones del material	Recocido
Esfuerzo de fluencia [MPa]	347 ± 5
Resistencia máxima [MPa]	605 ± 6
Esfuerzo de fractura MPa]	987 ± 4
Deformación a fractura	0,603 ± 0,003
Reducción de área [%]	45 ± 1

Nota: Promedio de las propiedades mecánicas de tres probetas ensayadas.

Tabla 3. Valores promedios de las propiedades mecánicas a tensión del cobre puro.

Propiedad	*Valor*
Condiciones del material	Recocido parcial
Esfuerzo de fluencia [MPa]	208 ± 5
Resistencia máxima [MPa]	261 ± 4
Esfuerzo de fractura MPa]	494 ± 9
Deformación a fractura	1,067 ± 0,021
Reducción de área [%]	66 ± 2

Nota: Promedio de las propiedades mecánicas de tres probetas ensayadas.

Los ajustes realizados a los valores experimentales de las propiedades estudiadas se hicieron empleando el programa Microsoft Excel 2000.

Tabla 4. Valores de las deformaciones experimentales obtenidas, por laminación, en el acero AISI 1040 y cobre puro estudiados.

Pasada N°	*Acero* $\varepsilon_{w\,L}$ *obtenida*	*Cobre* $\varepsilon_{w\,L}$ *obtenida*
1	0,019	0,022
2	0,032	0,065
3	0,042	0,107
4	0,056	0,161
5	0,073	0,217
6	0,119	0,265
7	0,138	0,389
8	0,165	0,460
9	0,200	0,534
10	0,256	0,640

$\varepsilon_{w\,L}$: deformación plástica por laminación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las ecuaciones (3) y (4) muestran las expresiones para el cálculo de la resistencia a la fluencia de los materiales laminados.

Para el acero:

$$S_{yL\ calculado} = 1031\,\varepsilon_L^{\ 0,196}\ [\text{MPa}],\ R^2 = 0,99 \qquad (3)$$

Para el cobre:

$$S_{yL\ calculado} = 421\,\varepsilon_L^{\ 0,180}\ [\text{MPa}],\ R^2 = 0,94 \qquad (4)$$

donde $\mathbf{S_{yL}}$ es la resistencia a la fluencia del metal laminado en frío; $\boldsymbol{\varepsilon_L}$ la deformación efectiva dada por laminación; 1031 MPa y 0,196 los parámetros de Hollomon para el acero recocido y 421 MPa y 0,180 los parámetros de Hollomon del cobre recocido.

Las expresiones (3) y (4) están en función de los valores de las ecuaciones de Hollomon obtenidos (considerando sólo el intervalo de deformación plástica uniforme) para los materiales recocidos. Para ello se realizó un ajuste potencial empleando un promedio de 12 parejas de puntos experimentales σ–ε y el programa Microsoft Excel 2000.

En la gráfica de la figura 1 se presenta el aumento potencial con la deformación de laminación, de los valores experimentales y calculados de resistencia a la fluencia del acero y cobre, siendo los valores experimentales menores que los calculados para todo el intervalo de deformación considerado.

El mismo comportamiento se observa para los dos materiales estudiados con una diferencia máxima, entre los valores experimentales y los calculados, de 22% para el acero y 29% para el cobre, quedando la relación entre la resistencia calculada y experimental de la siguiente manera:

$$S_{yL\ calculado} = 1,16\,S_{yL\ experimental} \quad \text{para el acero} \qquad (5)$$

$$S_{yL\ calculado} = 1,20\,S_{yL\ experimental} \quad \text{para el cobre} \qquad (6)$$

donde (1,16 ± 0,03) y (1,20 ± 0,08) son los valores promedios que relacionan ambas variables, con su desviación estándar, para el acero y cobre respectivamente.

La mencionada diferencia se debe a que el endurecimiento del material durante un proceso de laminación resulta menor al que experimenta cuando la misma cantidad de deformación plástica ocurre a tensión simple. En tal sentido Ratke y Welch [4] afirman que la falta de exactitud entre los valores calculados a partir del ajuste empírico de un modelo matemático y los experimentales, se debe a que las condiciones bajo las cuales ocurren las deformaciones plásticas en ambos casos no son las mismas. Específicamente durante un proceso de laminación la deformación plástica ocurre como un estado plano de deformaciones mientras que un estado triaxial de deformaciones tiene lugar durante

un ensayo de tensión simple. Bajo estas circunstancias, la determinación de expresiones empíricas debería ser también particular y específica en la descripción del endurecimiento por deformación de acuerdo al proceso.

Se propone por lo tanto, obtener una mejor predicción de la resistencia a la fluencia de los materiales laminados, realizando un ajuste a la deformación en las ecuaciones (3) y (4), obtenidas para tensión, así:

$$S_{yL\ ajustado} = 1031\left(K_L \varepsilon_L\right)^{0,196} \text{ [MPa], para acero} \quad (7)$$

$$S_{yL\ ajustado} = 421\left(K_L \varepsilon_L\right)^{0,180} \text{ [MPa], para cobre} \quad (8)$$

donde $\mathbf{K_L}$ es el factor de ajuste a la deformación de laminación.

Para determinar los valores de este factor de ajuste, se combinan las ecuaciones (3) y (7) para el acero y (4) y (8) para el cobre, quedando los mismos así:

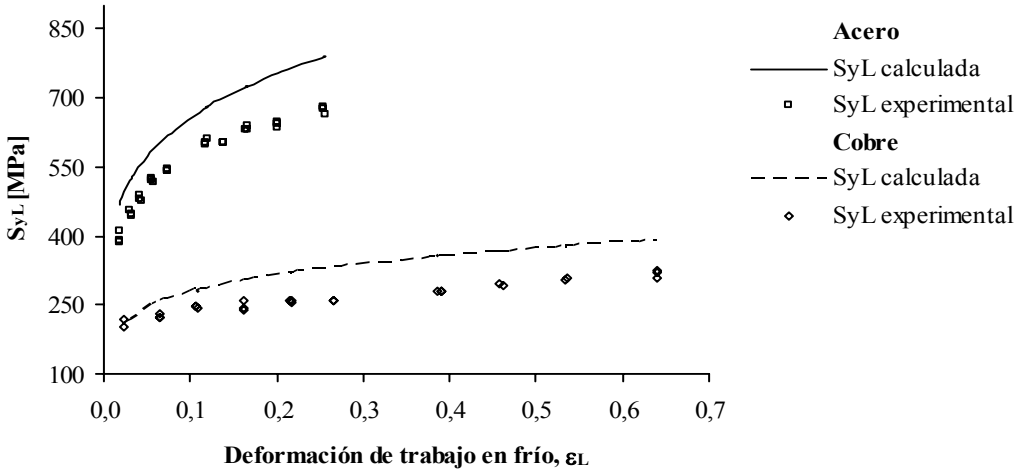

Figura 1. Valores calculados y experimentales de resistencia a la fluencia del acero y cobre, en función de la deformación de trabajo en frío por laminación.

$$K_L = \left(\frac{S_{y\ ajustada}}{S_{y\ calculada}}\right)^{1/0,196}, \text{ para el acero} \quad (9)$$

$$K_L = \left(\frac{S_{y\ ajustada}}{S_{y\ calculada}}\right)^{1/0,180}, \text{ para el cobre} \quad (10)$$

donde el valor ajustado de la resistencia a la fluencia corresponde al valor experimental.

Estos valores para el factor de ajuste se grafican en función de la deformación de laminación y se presentan en la figura 2**,** donde un polinomio de tercer grado es el mejor ajuste que se obtiene para ambos materiales. Se observa que, para el intervalo común de deformaciones, los K_L para el acero son mayores que para el cobre. Con los valores de K_L obtenidos a partir de estos polinomios, para cada deformación respectiva, y las ecuaciones (7) y (8) se obtienen los valores ajustados de la resistencia a la fluencia del acero y cobre laminados. Comparando estos valores con los correspondientes experimentales obtenidos mediante tensión simple, se observa una diferencia máxima de 3% para el acero y 10% para el cobre. En la figura 3, se muestran las resistencias a la fluencia, ajustadas y experimentales, en función de la deformación por laminación, para ambos materiales.

De esta manera se propone la siguiente ecuación general para el cálculo de la resistencia a la fluencia de un material con trabajo en frío, a partir de las propiedades del material en estado recocido:

$$S_{yw} = \sigma_o \left(K\,\varepsilon_w\right)^m \quad (11)$$

donde K = 1 para tensión simple, mientras que para el acero AISI 1040 y cobre puro laminados, $K = K_L$ y se puede representar como un polinomio de tercer grado en función de la deformación de laminación. Este factor de ajuste está determinado por el estado que caracteriza el desarrollo de la deformación plástica durante el proceso de conformado en frío y, en particular, por el material.

4. CONCLUSIONES

Los valores de resistencia a la fluencia del acero y cobre laminados calculados, empleando la ecuación de Hollomon de tensión de los materiales recocidos, son mayores que los obtenidos experimentalmente mediante tensión simple. La diferencia máxima entre ambos valores fue de 22% para el acero y 29% para el cobre. Una mejor aproximación de estos valores calculados se obtiene con la ecuación de Hollomon propuesta $\mathbf{S_{yL} = \sigma_o \left(K_L \varepsilon_L\right)^m}$, donde $\mathbf{K_L}$ se ajusta a un polinomio de tercer grado en función de la deformación de laminación, encontrándose que la diferencia máxima, entre los valores así calculados y los experimentales, fue de 3% para el acero y 10% para el cobre. Se deduce que $\mathbf{K_L}$ es un factor de ajuste característico del proceso de endurecimiento durante el conformado del metal en particular.

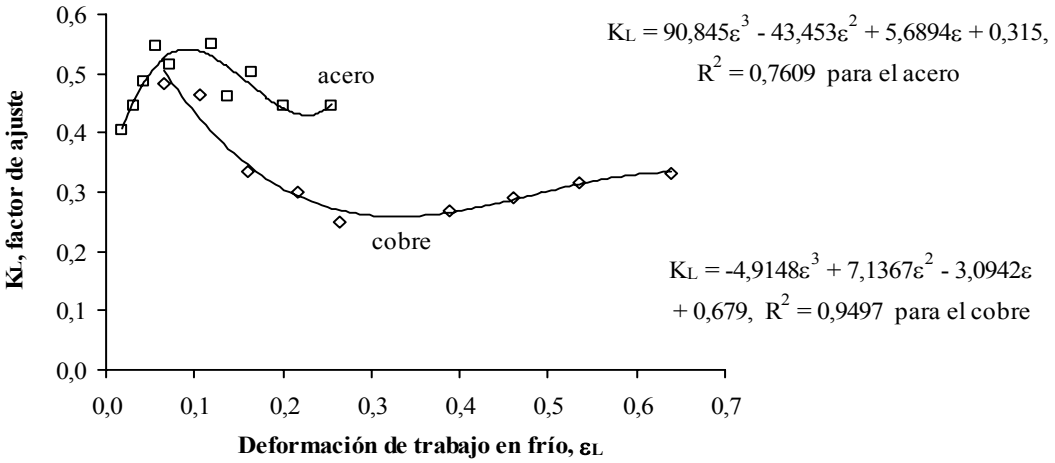

Figura 2. Factor de ajuste, $\mathbf{K_L}$, para la deformación del acero y cobre en las ecuaciones (7) y (8), en función de la deformación de trabajo en frío, $\boldsymbol{\varepsilon_L}$

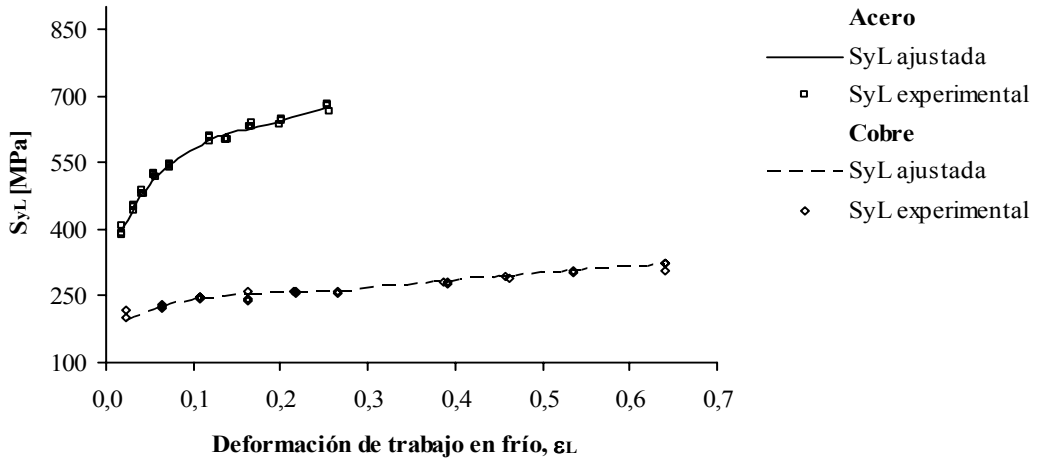

Figura 3. Comparación de los valores ajustados y experimentales de resistencia a la fluencia del acero y cobre, en función de la deformación de laminación.

5. REFERENCIAS

[1] Kishore R, Sinha TK. *Metall. Mater. Trans. A* 1996; **27A** (10): 3340-3343

[2] Callister W Jr. *Materials Science and Engineering. An Introduction.* New York (EE.UU.): John Wiley & Sons, 1991, p. 132

[3] Datsko J. *Material Properties and Manufacturing Processes.* New York (EE.UU.): John Wiley & Sons, 1991.

[4] Ratke L, Welch P. *Metalkunde* 1983; **74** (4): 226-232

[5] Pardoen T, Delannay F. *Metall. Mater. Trans. A* 1998: **29A** (7): 1895-1909

[6] Norma ASTM E8 M-91, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, Vol. 01.02. Philadelphia (EE.UU.): ASTM, 1992, p. 598-616

[7] Norma ASTM A370-91a, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products,* Vol. 01.01. ASTM Philadelphia (EE.UU.): ASTM, 1992, p. 249-294

[8] Torres M, Di Graci V, González G. *Rev. LatinAm. Metal. Mater.* 2000; **20** (1): 23-29