



Revista INGENIERÍA UC

ISSN: 1316-6832

revistaing@uc.edu.ve

Universidad de Carabobo

Venezuela

Aparicio, Gennifer; D' Armas, Heber; Ciaccia, Marco
Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569
Revista INGENIERÍA UC, vol. 14, núm. 1, abril, 2007, pp. 57-63
Universidad de Carabobo
Valencia, Venezuela

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70714108>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569

Gennifer Aparicio⁽¹⁾, Heber D' Armas⁽²⁾, Marco Ciaccia⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigaciones en Mecánica CIMEC, Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo Valencia, Estado Carabobo, Venezuela

⁽²⁾ Unidad de Aplicaciones Experimentales UAE, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela
Email: gaparici@uc.edu.ve, mciaccia@uc.edu.ve, hdarmas@usb.ve

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio del comportamiento elasto-plástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569. Se compararon curvas de esfuerzo-deformación, obtenidas experimentalmente, con las conocidas ecuaciones empíricas de Hollomon y Ramberg-Osgood, así como con el modelo recientemente propuesto por Rasmussen. Se encontró que para el material recocido o normalizado, no se pueden utilizar las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen debido a las características de la curva esfuerzo-deformación, por lo que para este caso se aplicaron la ecuación de Hollomon y un polinomio de cuarto grado ajustado por el método de mínimos cuadrados. Este último proporciona una mejor aproximación a los resultados experimentales que la ecuación de Hollomon. Para el material trabajado en frío, la ecuación propuesta por Rasmussen muestra el mejor ajuste entre los modelos considerados en este trabajo.

Palabras clave: Comportamiento elasto-plástico, curva esfuerzo-deformación, coeficiente de correlación.

Tension elasto-plastic behavior of ASTM A-569 steel sheet

Abstract

In this work a study of tension elasto-plastic behavior of ASTM A-569 steel sheet is presented. Experimental stress-strain curves were compared with the known Hollomon and Ramberg-Osgood empirical equations, and with the recently model proposed by Rasmussen. The Ramberg-Osgood and Rasmussen equations cannot be used to fit the stress-strain curves for annealed or normalized steel because of the presence of a pronounced yield plateau. In this case, the Hollomon's model and a least square fourth degree polynomial were used, providing this last model a better fit to the experimental results than Hollomon's model. In addition, the Rasmussen equation showed the best fit to the stress-strain curve for the cold worked steel.

Keywords: Elasto-plastic behavior, stress-strain behavior, steel sheet.

1. INTRODUCCIÓN

La descripción del comportamiento de la curva esfuerzo-deformación y del endurecimiento que experimenta un metal, a través de expresiones matemáticas, es de suma importancia en diferentes aspectos de su estudio elasto-plástico, debido a que la zona plástica de la curva depende de parámetros que predicen los mecanismos de formabilidad y deformación del material. Actualmente los estudios se centran en simulaciones numéricas de miembros estructurales y procesos de conformado de metales, en los cuales se alcanzan deformaciones superiores al esfuerzo de fluencia y para ello es necesario conocer los parámetros de la

expresión matemática que describe la fluencia del mismo.

Una de las expresiones más utilizadas para predecir el comportamiento plástico de metales dúctiles es la ecuación de Hollomon, la cual establece una ley potencial de la forma $\sigma = K \cdot \epsilon^n$, donde K representa el esfuerzo para una deformación natural igual a uno y se le denomina coeficiente de resistencia, n es conocido como coeficiente de endurecimiento por deformación y es numéricamente igual a la deformación última ϵ_u del material, y σ y ϵ son el esfuerzo y la deformación real respectivamente. Una de las aplicaciones de la ecuación de Hollomon es la evaluación de la formabi-

lidad, a través del coeficiente de endurecimiento por deformación. Tal es el caso de Kleemola y Nieminen [1] que usaron el valor de n para el cálculo de la ductilidad residual de cobre deformado. Sin embargo es importante resaltar que la ecuación de Hollomon es una expresión empírica que no puede describir exactamente la curva esfuerzo-deformación para todos los metales.

Existen diferentes relaciones empíricas, que aunque no poseen ningún sentido físico conocido, proporcionan mejores aproximaciones a valores experimentales [2]. Entre estos modelos se encuentran los de Ludwik y Swift, los cuales incluyen el efecto de endurecimiento del material por trabajo en frío [3,4]. Las expresiones de Ludwik y Swift se muestran en las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

$$\sigma = \sigma_o + h \cdot \varepsilon^m \quad (1)$$

$$\sigma = K_1 \cdot (\varepsilon + \varepsilon_o)^{n_1} \quad (2)$$

Otro modelo muy utilizado es el de Ramberg-Osgood (1945), el cual utiliza una ecuación de tres parámetros para expresar la relación entre el esfuerzo (S) y la deformación ingenieril (e) hasta un valor ligeramente mayor al esfuerzo de fluencia del material (ecuación 3) [5]. Los tres parámetros considerados por Ramberg-Osgood son el módulo de elasticidad E_o , la resistencia a la fluencia S_y ($S_{0,2}$) y el parámetro n que define la forma de la curva [6].

$$e = \frac{S}{E_o} + 0,002 \cdot \left(\frac{S}{S_{0,2}} \right)^n; \quad S \leq S_{0,2} \quad (3)$$

El parámetro n se determina utilizando los esfuerzos para 0,01% y 0,2% de deformación, entonces de la ecuación (3) se obtiene que:

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(S_{0,2}/S_{0,01})} \quad (4)$$

MacDonald et al. (2000) reportó una serie de ensayos en columnas acanaladas de acero inoxidable AISI-304. Las curvas de Ramberg-Osgood fueron ajustadas a curvas esfuerzo-deformación obtenidas de ensayos de columnas cortas y probetas de tracción usando los esfuerzos de prueba del 0,01% y 0,2% para

determinar el parámetros n . Las curvas de Ramberg-Osgood ajustadas mostraron errores perceptibles para deformaciones superiores al 0,2% y la expresión modificada sugerida por MacDonald, es de la forma:

$$e = \frac{S}{E_o} + 0,002 \cdot \left(\frac{S}{S_1} \right)^{i+j \cdot \left(\frac{S}{S_1} \right)^k} \quad (5)$$

donde las constantes i , j y k toman valores entre 2,5 y 6 dependiendo del espesor del material ensayado[7]. Aunque esta expresión provee buena aproximación, su aplicabilidad está limitada particularmente a las aleaciones y espesores ensayados.

Olsson (2001) estudió modelos avanzados en plasticidad para aleaciones de acero inoxidable y realizó un gran número de ensayos en probetas cargadas uniaxial y biaxialmente. Graficó las curvas esfuerzo-deformación como esfuerzo verdadero (σ) versus deformación ingenieril (e) y observó experimentalmente que la curva esfuerzo-deformación se acercaba a una línea recta para grandes deformaciones. Propuso que la curva esfuerzo verdadero vs. deformación ingenieril se puede aproximar con la ecuación de Ramberg-Osgood hasta una deformación del 2%, y una línea recta desde este punto en adelante. La línea recta se obtiene como un ajuste promedio de la curva esfuerzo-deformación [8].

El modelo de Ramberg-Osgood fue modificado por Rasmussen (2003) para ampliar su rango de aplicación en la curva esfuerzo-deformación hasta el punto máximo, para lo cual introdujo dos parámetros adicionales, el esfuerzo último S_u y la deformación última e_u [9]. De esta manera Rasmussen propone definir el comportamiento del material, desde el inicio de la curva hasta el esfuerzo de fluencia con la ecuación de Ramberg-Osgood, y desde el esfuerzo de fluencia hasta el esfuerzo último con la ecuación (6) [10,11].

$$e = \frac{S - S_{0,2}}{E_{0,2}} + e_u \cdot \left(\frac{S - S_{0,2}}{S_u - S_{0,2}} \right)^m + e_{0,2}; \quad S_{0,2} < S \leq S_u \quad (6)$$

En la ecuación (6), Rasmussen denomina $E_{0,2}$ al valor de la tangente a la curva esfuerzo-deformación en el punto de fluencia, y se determina según la ecuación (7).

$$e_{0,2} = \frac{S_{0,2}}{E_o} + 0,002 \quad (7)$$

El parámetro $e_{0,2}$ es la deformación al esfuerzo de fluencia, calculado con la ecuación (8).

$$E_{0,2} = \frac{1}{E_o + 0,002 \cdot n / S_{0,2}} \quad (8)$$

El exponente m fue obtenido por Rasmussen mediante el ajuste de los datos experimentales para el caso de aceros inoxidables y se determina a través de la ecuación (9).

$$m = 1 + 3,5 \cdot \frac{S_{0,2}}{S_u} \quad (9)$$

Los parámetros $E_{0,2}$ y $e_{0,2}$ se muestran en la Figura 1.

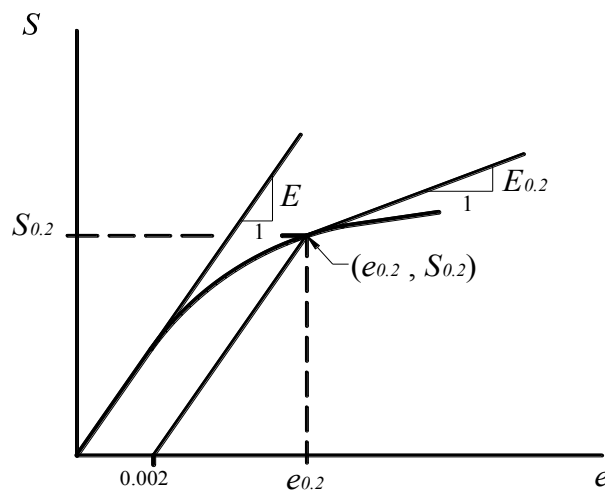


Figura 1. Parámetros de la ecuación de Rasmussen.

El objetivo de este trabajo es modelar el comportamiento elasto-plástico del acero ASTM-569 en condiciones de tracción, mediante ecuaciones empíricas que puedan ser empleadas para determinar con facilidad en el material original, tratado térmicamente y trabajado en frío. Una de las principales aplicaciones de este acero, es en la fabricación de malla expandida, la cual presenta un alto porcentaje de trabajo en frío y de la que no puede determinarse directamente el comportamiento elasto-plástico debido a las dificultades para fabricar una probeta que presenta esta forma del material. Adicionalmente, estas ecuaciones podrán ser aplicadas en cálculos numéricos en los que se requiera conocer en forma discreta el comportamiento elasto-plástico de este material.

2. METODOLOGÍA

El material estudiado fue previamente caracterizado mediante la obtención de la composición química, ensayos de tracción y microestructura. De los ensayos de tracción se obtuvieron curvas carga-alargamiento para el material en estado de entrega (E.E), recocido (R), normalizado (N) y trabajado en frío (T.F); todas estas condiciones en función de la orientación (dirección de laminación, L, y transversal a dicha dirección, T). Los porcentajes de deformación aplicados fueron de 10%, 20%, 40% y 60%. Se analizaron un total de 26 curvas carga-alargamiento.

Posteriormente, a partir de las curvas carga-alargamiento fueron determinadas las curvas esfuerzo-deformación ingenieril, para luego aplicar las ecuaciones empíricas. A partir de la curva ingenieril, se procedió a determinar la curva esfuerzo-deformación real, mediante las ecuaciones (10) y (11).

$$\sigma = S \cdot (1 + e) \quad (10)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (11)$$

Estas ecuaciones son válidas hasta el punto máximo de la curva, razón por la cual la curva real fue reportada hasta este punto. Por otra parte, debido a que las deformaciones elásticas son pequeñas en comparación con las deformaciones plásticas, solo fue aplicada la ecuación de Hollomon en la zona plástica.

Debido a que los aceros de bajo carbono presentan la característica zona de fluencia en estado de recocido o normalizado, las ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen no fueron empleadas en dichas condiciones, ni al material en estado de entrega, que aunque poseía un bajo porcentaje de trabajo en frío (menor al 10%), presentó una pequeña zona de fluencia. Por esta razón, para estos casos fue aplicada la ecuación de Hollomon, además de un polinomio de cuarto grado obtenido por el método de los mínimos cuadrados, de la forma:

$$\sigma = a \cdot \varepsilon^4 + b \cdot \varepsilon^3 + c \cdot \varepsilon^2 + d \cdot \varepsilon + e \quad (12)$$

Para el material trabajado en frío fueron utilizadas las ecuaciones de Hollomon, Ramberg-Osgood y Rasmussen, la primera para la curva real en la zona

plástica y las dos siguientes para toda la curva ingenieril.

Posteriormente fueron comparados todos los modelos y se calculó el coeficiente de correlación para cada condición.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los modelos que fueron aplicados a las curvas esfuerzo-deformación experimentales.

3.1 Ecuación de Hollomon

En la Tabla 2 se muestran los parámetros de la ecuación de Hollomon, y en la Tabla 3 los parámetros de la aproximación polinómica, para el material tratado térmicamente y para el material en estado de entrega, con sus respectivos coeficientes de correlación.

Tabla 2. Parámetros de la ecuación de Hollomon para el material tratado térmicamente y en estado de entrega.

Parámetros		K (kg/mm ²)	n	R ²
L	R	62,0	0,433	0,9665
	N	62,9	0,265	0,9941
	E.E	67,4	0,214	0,9934
T	R	55,8	0,337	0,9809
	N	68,5	0,252	0,9949
	E.E	63,4	0,194	0,9909

Tabla 3. Parámetros de la aproximación polinómica para el material tratado térmicamente y en estado de entrega.

Parámetros		a	b	c	d	e	R ²
L	R	-29926	17544	-4018	473	2,1	0,9995
	N	-15030	10199	-2740	396	13,7	0,9995
	E.E	-37273	19132	-3863	428	21,7	0,9941
T	R	-19540	12541	-3131	404	6,7	0,9996
	N	-25595	15692	-3761	479	15,2	0,9993
	E.E	-23769	13488	-2995	366	23,1	0,9993

En la Figura 2 se muestra la curva esfuerzo-deformación real para el material normalizado, comparada con el modelo de Hollomon.

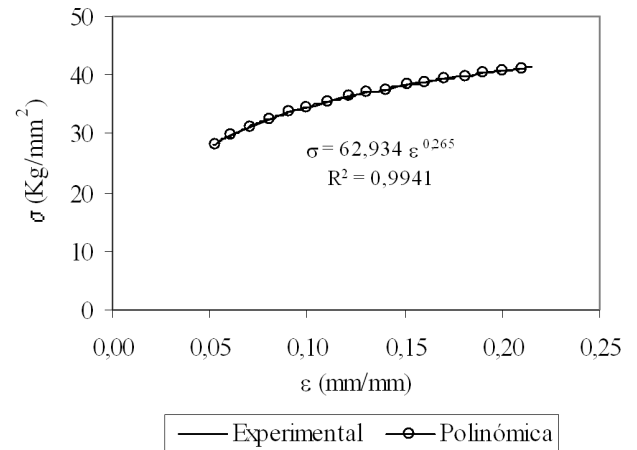


Figura 2. Ecuación de Hollomon vs. curva experimental. Material normalizado, longitudinal.

En la Figura 3 se muestra una comparación similar a la de la Figura 2, ahora con la aproximación polinómica de cuarto grado. Observando ambas figuras se advierte que la expresión polinómica obtenida por mínimos cuadrados aporta una mejor aproximación a la curva real en la zona plástica, presentando valores del coeficiente de correlación superiores al 99%, mientras que la ecuación de Hollomon presenta valores del coeficiente de correlación que varían desde 96% a 99%, siendo la diferencia entre ambos modelos de 1% a 4%.

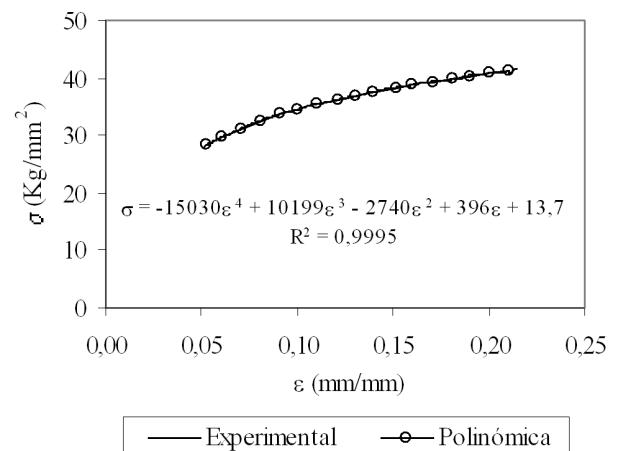


Figura 3. Aproximación polinómica vs. curva experimental. Material normalizado, longitudinal.

En la Tabla 4 se presentan los valores de los parámetros de la ecuación de Hollomon para el material trabajado en frío. En esta tabla se observa que el coeficiente de correlación en la mayoría de los casos no supera el 94 %, por lo cual puede decirse que la aproximación obtenida a través de la ecuación de Hollomon no aporta una buena aproximación de la curva esfuerzo-deformación del material trabajado en frío.

Tabla 4. Parámetros de la ecuación de Hollomon para el material trabajado en frío.

Parámetros		K (kg/mm ²)	n	R ²
Orient.	%T.F			
L	0	67,4	0,214	0,9934
	10	49,6	0,032	0,9207
	20	86,8	0,109	0,8569
	40	81,3	0,063	0,8567
	60	96,0	0,076	0,9208
T	0	63,4	0,194	0,9909
	10	45,6	0,024	0,9453
	20	56,1	0,049	0,8120
	40	88,0	0,077	0,8798
	60	87,1	0,062	0,9067

En la Figura 4 se presenta un ejemplo de la curva esfuerzo-deformación para el material trabajado en frío comparada con la ecuación de Hollomon, en función de la orientación.

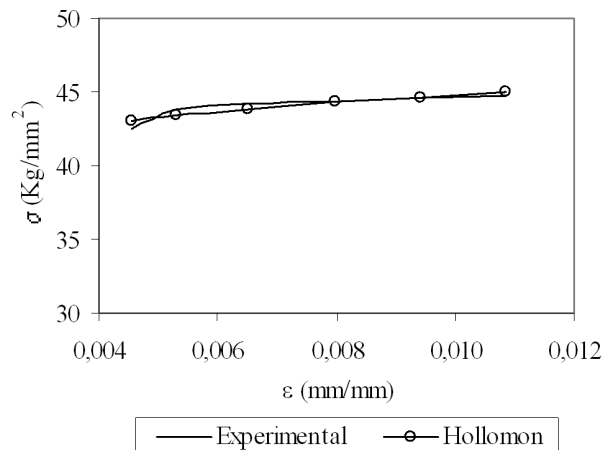


Figura 4. Ecuación de Hollomon vs. curva experimental. Material con 20% T.F, transversal.

3.2. Ecuaciones de Ramberg-Osgood y Rasmussen

Para el caso de los aceros al carbono en los estados de recocido y normalizado, la ecuación de Ramberg-Osgood y la continuación de ésta, introducida por Rasmussen, solo puede ser aplicada una vez que el material ha sido trabajado en frío, ya que esto produce la desaparición de la meseta de fluencia de la curva esfuerzo-deformación debido al endurecimiento por deformación.

En la Tabla 5 se muestran los parámetros de la ecuación de Ramberg-Osgood, en la que puede apreciarse que proporciona un buen ajuste cuando el porcentaje de trabajo en frío es superior al 20%, “a pesar de que para el caso de los aceros inoxidables genera esfuerzos superiores a los valores experimentales” [10,11]. Se encontró que el coeficiente de correlación es menor al 90% cuando el acero posee menos del 20% de trabajo en frío, y aumenta a un rango entre 94 y 99% cuando el trabajo en frío es igual o superior al 20%.

Tabla 5. Parámetros de la ecuación de Ramberg-Osgood para el material trabajado en frío.

Parámetros		E ₀ (kg/mm ²)	S _{0,2} / S _u	n	R ²
Orient.	%T.F				
L	0	-	-	-	-
	10	18749	0,95	7,69	0,8213
	20	15883	0,91	8,96	0,9671
	40	18402	0,96	9,12	0,9660
	60	16635	0,96	8,43	0,9766
T	0	-	-	-	-
	10	25100	0,97	10,86	0,8322
	20	15395	0,97	10,06	0,9360
	40	9621	0,98	30,06	0,9945
	60	16656	0,96	7,90	0,9961

Esto podría explicarse por el hecho de que la ecuación de Ramberg-Osgood fue concebida para ser usada con esfuerzos ligeramente superiores al esfuerzo de fluencia del material, y cuando se incrementa el porcentaje de trabajo en frío el esfuerzo de fluencia se acerca al esfuerzo último, debido a que disminuye la capacidad de deformación plástica por el incremento del endurecimiento por deformación.

En la Tabla 6 se muestran los parámetros adicionales que constituyen la continuación de la curva de Ramberg-Osgood, propuesta por Rasmussen, utilizando la ecuación para determinar el exponente m .

En las Figura 5 se muestran dos de las curvas esfuerzo-deformación ingenieril versus la curvas obtenidas de las ecuaciones de Ramberg-Osgood y de Rasmussen. Puede observarse que la ecuación propuesta por Rasmussen también presenta una muy buena aproximación a los datos experimentales exhibiendo coeficientes de correlación de 94% a 98%, sin ajustar el coeficiente m al acero en estudio.

4. CONCLUSIONES

Las ecuaciones de Ramberg-Osgood y la de Rasmussen solo pueden ser aplicadas a los aceros al carbono cuando poseen trabajo en frío, debido a que el endurecimiento por deformación producido en el material evita la aparición de la meseta de fluencia.

La aproximación polinómica obtenida por el método de los mínimos cuadrados, aporta una mejor aproximación a la curva real para el material tratado térmicamente y en estado de entrega, presentando valores del coeficiente de correlación superiores al 99,9%.

Tabla 6. Parámetros que constituyen la continuación de la curva esfuerzo-deformación ingenieril propuesta por Rasmussen partiendo de Ramberg-Osgood, para el material trabajado en frío.

Parámetros		$E_{0,2}$ (Kg/mm ²)	e_u (mm/mm)	S_u (Kg/mm ²)	m	$e_{(0,2\%)}$ (mm/mm)	R^2
Orientación	%T.F						
Longitudinal	0	-	-	-	-	-	-
	10	2314	0,0290	42,9	4,32	0,0042	0,9711
	20	2272	0,0133	52,3	4,18	0,0050	0,9732
	40	2692	0,0120	60,1	4,35	0,0052	0,9667
	60	3098	0,0095	66,5	4,38	0,0059	0,9551
Transversal	0	-	-	-	-	-	-
	10	1692	0,0205	40,7	4,39	0,0036	0,9533
	20	1866	0,0109	44,2	4,38	0,0048	0,9890
	40	905	0,0112	61,4	4,43	0,0083	0,9429
	60	3193	0,0123	65,2	4,35	0,0058	0,9820

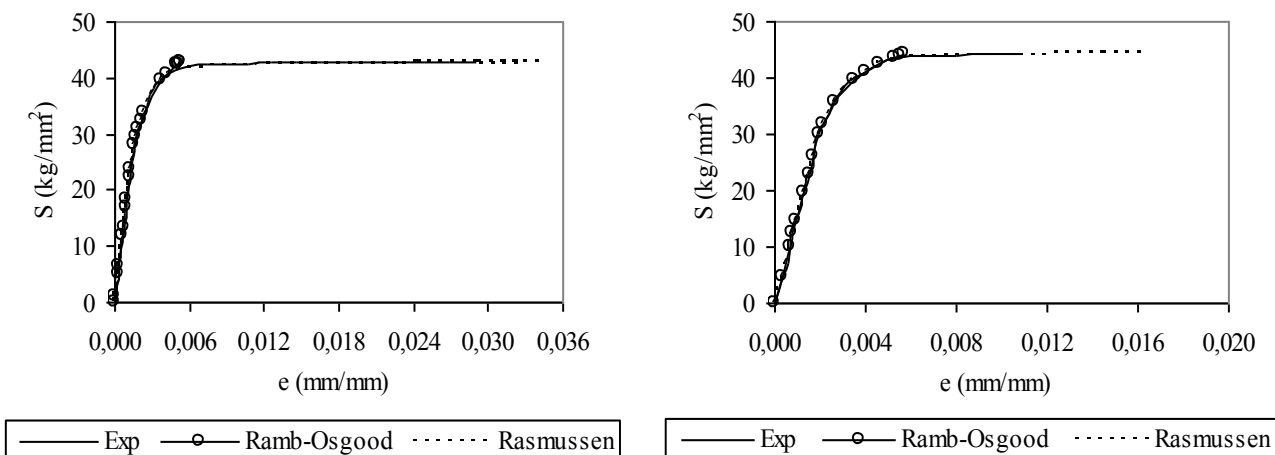


Figura 5. Rasmussen y Ramberg – Osgood vs. la curva experimental para el material con:
(a) 10% T.F-longitudinal y (b) 20% T.F-transversal.

La ecuación de Hollomon, no aporta una buena aproximación de la curva esfuerzo-deformación del material trabajado en frío, debido a que el coeficiente de correlación en la mayoría de los casos es inferior al 94%.

La expresión propuesta por Rasmussen presenta muy buena aproximación a los datos experimentales presentando coeficientes de correlación entre 94% a 98%, aún utilizando la expresión propuesta para m por Rasmussen para el caso de aceros inoxidables.

La ecuación de Ramberg-Osgood proporciona un buen ajuste para los aceros al carbono cuando el porcentaje de trabajo en frío es superior al 20%, obteniéndose coeficientes de correlación entre 94% a 99,5%, en incremento con el porcentaje de trabajo en frío.

5. AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos son dirigidos al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo, por subvencionar esta investigación a través de la Investigación Menor CDCH 2100-2004.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kleemola H. J. and Nieminen M. A. (1974): "On the Strain-Hardening Parameters of Metals", Metallurgical Transactions, Vol. 5, pp.1863-1866.
- [2] Ono K. (1972): "Strain-Hardening Equations and Uniform Strain", Metallurgical Transactions, Vol. 3, pp. 749-751.
- [3] Jonson W. and Mellor P. B. (1973): "Engineering Plasticity". Van Nostrand Reinhold Editorial, London.
- [4] Hill R. (1998): "The Mathematical Theory of Plasticity". Clarendon Press, Oxford.
- [5] Ramberg W. y Osgood W. (1.943): "Determination of Steel-Strain Curves by Three Parameters", National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Technical Note 902.
- [6] Hill H. N. (1945): "Determination of Stress-Strain Relations from "Offset" Yield Strength Values", National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Technical Note 927.
- [7] Macdonald M., Rhodes J. y Taylor G. (2000): "Mechanical properties of Stainless Steel Lipped Channels", Proceedings, 15th International Speciality Conferenced of Cold Formed Steel Structures. Eds RA LaBoube and W-W Yu, University of Missouri-Rolla, pp. 673-686.
- [8] Olsson A. (2001): "Stainless Steel Plasticity-Material Modelling and Structural Applications", PhD thesis, Departament of Civil and Minning Engineering, Luleå University of Technology, Sweden.
- [9] Rasmussen K. (2003): "Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys", Journal of Constructional Steel, Research 59, pp. 47-61.
- [10] Rasmussen K., Burns T., Bezkorovainy P. y Bambach M. (2002): "Numerical Modelling of Stainless Steel Plates in Compression". Departament of Civil Engineering, The University of Sydney, Research Report N° R813.
- [11] Bezkorovainy P., Burns T. y Rasmussen K. (2002): "Strength Curves for Metal Plates in Compression". Research Report N° R82.