

Comportamiento de relajación de esfuerzos en acero SAE 1065 en condiciones de tasa de deformación variable durante la aplicación del pre-esfuerzo

Sandra Cabello ⁽¹⁾, Eli Saúl Puchi C. ⁽²⁾, Engels Ochoa ⁽²⁾

¹ Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

² Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela
Email: scabello@uc.edu.ve

Resumen

En este artículo se investigó el comportamiento de relajación de esfuerzos en acero SAE 1065 variando la tasa de deformación durante la aplicación del pre-esfuerzo. El estudio se realizó en alambres de 5.5 mm de diámetro con la siguiente composición nominal (% Peso): C:0.67, Mn:0.65, Si:0.22, P:0.020, S:0.012 y Al:0.003. Se utilizó una máquina servohidráulica controlada por un computador (Instron 8502) que permite mantener constante la deformación producida una vez aplicada cierta carga y registrar la disminución de ésta en el tiempo. El efecto de la tasa de deformación durante la precarga se evaluó variando separadamente longitud efectiva y velocidad de desplazamiento del cabezal. La data experimental se modeló según la Ley Potencial, determinando mediante regresión lineal los parámetros A y m. Se determinó que la tasa de deformación incide sobre la relajación de esfuerzos.

Palabras claves: Relajación de esfuerzos, ley potencial, tasa de deformación

Stress relaxation behavior in SAE 1065 steel at different strain rates during pre-stress application

Abstract

A study about the stress relaxation behavior of SAE 1065 steel at different strain rates during pre-stress application was made. The present investigation was carried out employing samples with the following nominal composition (Wt%): C:0.67, Mn:0.65, Si:0.22, P:0.020, S:0.012 and Al:0.003. The material was supplied as rods of approximately 5.5 mm diameter. A computer-controlled servohydraulic machine (Instron 502) was used, which allows, to maintain constant strain produced once pre-selected load is applied and to register the drop of load in time. Strain rate influence was carried changing effective length and cross head speed separately. Experimental data was treated according to a potential mechanical equation of state and parameters A and m were determined by lineal regression analysis. It was found relaxation behaviour is influenced by strain rate during pre-stress application.

Keywords: Stress relaxation behavior, power law, strain rate

INTRODUCCIÓN

La relajación de esfuerzos, así como el *creep*, son respuestas del material que dependen del tiempo, donde la deformación resultante está influenciada por el efecto viscoso. En el caso particular de la relajación, el material experimenta variaciones del esfuerzo en el tiempo, una vez sometido a cierto nivel de esfuerzo y manteniendo constante la longitud. Este comportamiento es de interés en la industria del pre-tensado, ya que al aplicar la carga al componente metálico, bien sea en forma de torones o de varillas y, previo al vaciado del concreto, éstos sufrirán una disminución de esa precarga con el paso del tiempo,

quedando comprometida la eficiencia del conjunto concreto-acero y en consecuencia, acortando el tiempo de vida útil de la estructura o incrementando los costos por concepto de una mayor cantidad de acero para compensar la relajación.

Muchos han sido los esfuerzos por aminorar este efecto en aceros destinados a la fabricación de estructuras de concreto pre-tensado, entre ellos la aplicación de tratamientos termomecánicos para alivio de tensiones y disminución de esfuerzos residuales inducidos en el trefilado de los alambres que conforman los torones [1-3]. Para propósitos prácticos, el decrecimiento del esfuerzo aplicado con el tiempo se ha venido estimando con frecuencia por medio de la ecuación empírica referida por

Zeren [1] y Urbáez [4]; otros modelos similares hacen una distinción, para el tratamiento de componentes de relajación normal y baja relajación. Estos modelos permiten correlaciones aceptables en ensayos de larga duración, específicamente en torones, aún cuando sobreestima en algún grado el fenómeno relajación [3], pero en ensayos de corta duración, dichos modelos no permiten estimaciones apropiadas sobre el decrecimiento del esfuerzo; para estos casos es aplicable el modelo propuesto por Stussi [1]:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + 10^n} \quad (1)$$

$$n = -1,3 + \frac{\text{Log } t \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_A} - 0,99 \right)}{3} \quad (2)$$

Donde n es una función dependiente del tiempo y del esfuerzo inicial; σ_A el esfuerzo de fluencia a 0,1% del alargamiento, σ_0 el esfuerzo inicial y t, el tiempo en horas.

Debido a que los modelos hasta ahora propuestos en algún modo subestiman o sobreestiman el comportamiento real de relajación, la experimentación directa sobre el material no ha dejado de ser la metodología más confiable. Es posible expresar el cambio del esfuerzo en función del tiempo por medio de una ecuación de estado basada en la ley potencial de creep [5], de la forma:

$$\sigma = \sigma_0 (1 + At)^{\frac{1}{1-m}} \quad (3)$$

Donde A y m representan constantes del material. A partir de este modelo potencial y haciendo uso análisis de regresión lineal con la data experimental obtenida del ensayo de relajación, es posible obtener los parámetros A y m vinculados con el comportamiento de pérdida de esfuerzo en el tiempo.

Por otra parte, existen otras variables extrínsecas al material que de alguna manera pueden afectar su comportamiento de relajación. Tal es el caso de la tasa de deformación durante la aplicación de la pre-carga, la cual puede ocurrir bien por modificación de la longitud ensayada o por cambios en la velocidad de aplicación del pre-esfuerzo.

En esta investigación, se hace uso de ensayos de relajación de corta duración para estudiar el efecto de la tasa de deformación aplicada durante la precarga sobre la relajación de esfuerzos. Además, partiendo de la data experimental y mediante análisis de regresión lineal con

ajuste a la Ley Potencial se determinan los parámetros A y m asociados con la relajación.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El estudio se llevó a cabo empleando muestras de acero en forma de alambón, suministradas por VICSON S.A; Valencia, Venezuela. Las muestras evaluadas, de diámetro 5,5 mm y composición química mostrada en la tabla 1 fueron ensayadas en una máquina servohidráulica controlada por computador (Instron 8502), la cual permite, trabajando en modo de relajación, mantener constante la deformación producida una vez aplicada cierta carga y registrar la disminución de ésta con el tiempo. La duración de cada ensayo fue de 4 horas y la temperatura se mantuvo constante, aproximadamente en 20°C.

Para evaluar el efecto de la tasa de deformación durante la aplicación del pre-esfuerzo, se hizo variaciones tanto de la longitud efectiva de la probeta como de la velocidad del desplazamiento del cabezal durante la precarga; variándolos separadamente. Para el grupo de longitudes variables se ensayó longitudes de: 165 mm, 220 mm, 330 mm y 385 mm; con lo que se generó tasas de deformación de: 20E-5 s⁻¹, 15 E-5 s⁻¹, 10 E-5 s⁻¹ y 8.7 E-5 s⁻¹ respectivamente, la velocidad de desplazamiento del cabezal durante la precarga se mantuvo constante en 2 mm/min. Para el grupo de muestras en las cuales se varió la velocidad del desplazamiento del cabezal, la longitud efectiva de las probetas se mantuvo constante e igual a 220 mm, mientras que las velocidades de desplazamiento del cabezal durante la precarga fueron: 0.2 mm/min, 2 mm/min y 20 mm/min, lo que se corresponde con tasas de deformación de 10⁻⁵ s⁻¹, 10⁻⁴ s⁻¹ y 10⁻³ s⁻¹ respectivamente.

ACERO	C	Mn	Si	P	S	Al
SAE1065	0.67	0.65	0.22	0.020	0.015	0.003

Tabla 1. Composición química (% peso) del acero SAE 1065.

La tasa de deformación fue determinada a partir de la expresión:

$$\varepsilon(s^{-1}) = \frac{\Delta l}{t} \left(\frac{mm}{s} \right) * \frac{1}{l_0} \left(\frac{1}{mm} \right) \quad (4)$$

Donde: ε : Tasa de deformación
 $\Delta l/t$: Velocidad de desplazamiento del cabezal
 l_0 : Longitud efectiva de la probeta

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra los perfiles de relajación obtenidos en el acero SAE 1065 variando la tasa de deformación, mediante cambios en la longitud efectiva.

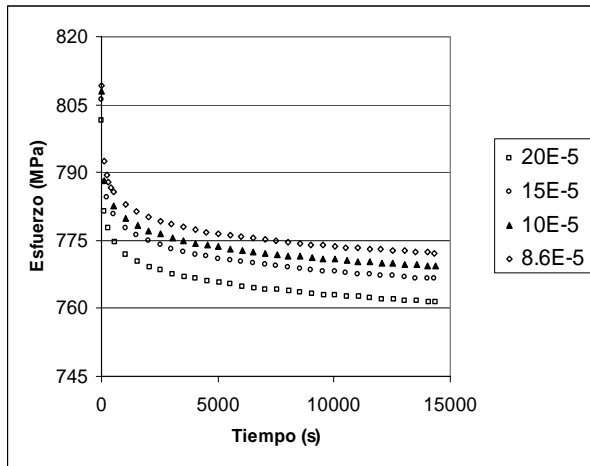


Figura 1. Perfiles de relajación para SAE 1065 a diferentes tasas de deformación durante la precarga

Se observa un aumento en la pérdida del preesfuerzo a medida que la tasa de deformación es mayor, con una diferencia entre condiciones extremas de aprox. 15 MPa. Los parámetros m y A obtenidos por regresión lineal con ajuste potencial de la data experimental se muestran en la tabla 2.

La correlación promedio obtenida en esta serie fue de 98.3%. En las Figuras 2 y 3, donde se representa gráficamente la distribución de m y A para las condiciones ensayadas, se observa poca variabilidad para el parámetro m , de manera similar la variación para el parámetro A no es significativa. De lo anterior se desprende que los parámetros m y A separadamente no indican de manera inequívoca las características de relajación.

Tabla 2. Parámetros m y A en SAE 1065 para distintas tasas de deformación mediante variación de L_0

L_0 (mm)	$\dot{\epsilon}$ (s^{-1})	σ_0 (MPa)	m	A (s^{-1})	r^2
165	20E-5	809.547	191.262	1.22	0.943
220	15E-5	807.028	180.907	0.592	0.998
330	10E-5	809.033	192.389	0.831	0.994
385	8.6E-5	808.305	192.814	0.562	0.997

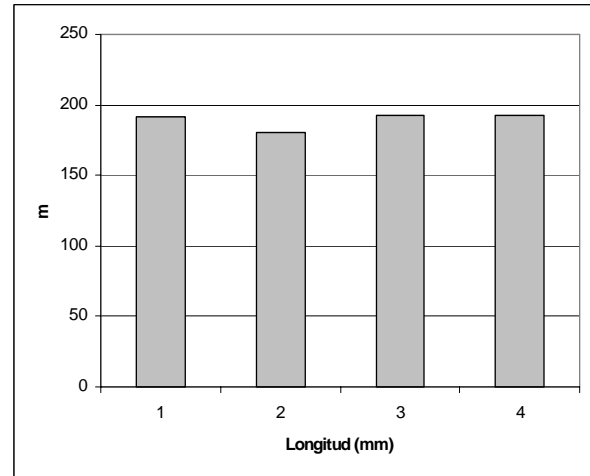


Figura 2. Parámetro m vs. Longitud

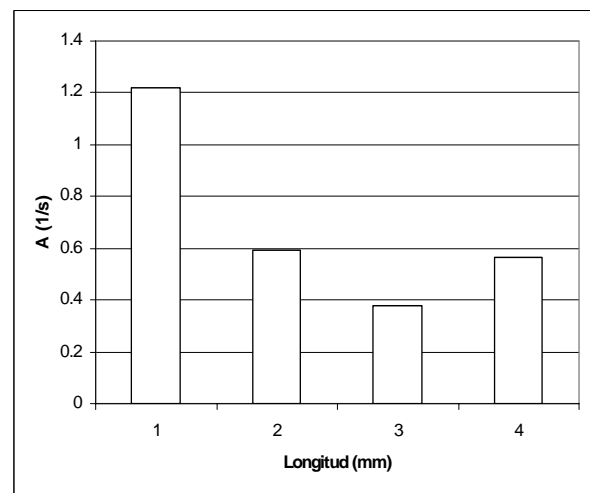


Figura 3. Parámetro A vs. Longitud

La Figura 4 muestra los perfiles de relajación de SAE 1065 para diferentes tasas de deformación durante la precarga, obtenidas variando la velocidad de desplazamiento del cabezal.

Nuevamente se corrobora un aumento en la pérdida de esfuerzos en el tiempo para mayores tasas de deformación. La diferencia entre condiciones extremas es de aproximadamente 20 MPa. La tabla 3 contiene los parámetros m y A para las condiciones evaluadas.

La correlación promedio fue de 90.5%

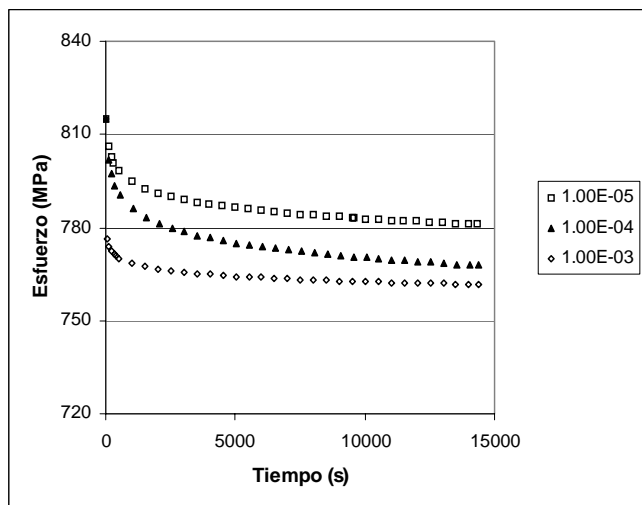


Figura 4. Perfiles de relajación en SAE 1065 a diferentes tasas de deformación durante la precarga

Tabla 3. Parámetros m y A en SAE 1065 para diferentes tasas de deformación mediante variación de V

V (mm/min)	$\dot{\epsilon}$ (s^{-1})	σ_0 (Mpa)	m	A (s^{-1})	r^2
0.2	1E-5	814.122	154.378	0.085	0.878
2	1E-4	814.96	212.56	0.053	0.981
20	1E-3	814.83	300.32	4.141	0.946

Las Figuras 5 y 6 muestran los valores de m y A respectivamente para las distintas condiciones en que se varió la velocidad de desplazamiento del cabezal. Se observa un aumento del parámetro m con la velocidad, aunque el parámetro A no muestra una tendencia claramente definida.

El aumento de la relajación con la tasa de deformación se ha encontrado tanto en metales [6,7], como en polímeros [8]. Una hipótesis que explica este efecto es que las altas tasas de deformación conllevan a un descenso en la relación esfuerzo de retorno-esfuerzo total. Ese descenso en el esfuerzo de retorno está usualmente vinculado con subestructuras que no son suficientemente heterogéneas o “bien desarrolladas”. Las subestructuras bien desarrolladas corresponden a estructuras de equilibrio con subgranos primarios equiaxiales y límites de subgrano secundarios. Las microestructuras menos desarrolladas están determinadas por una densidad de dislocaciones homogéneas más altas y límites de grano difusos. Cuando un metal se relaja, su estado interno evoluciona para alcanzar la cinética de menor acumulación de deformación inelástica. Si el metal es deformado a

bajas tasas de deformación contendrá subestructuras de dislocación de baja energía más desarrolladas que uno deformado a mayores tasas de deformación. En consecuencia, menor será la energía disponible para posteriores movimientos de dislocaciones durante la relajación de esfuerzos.

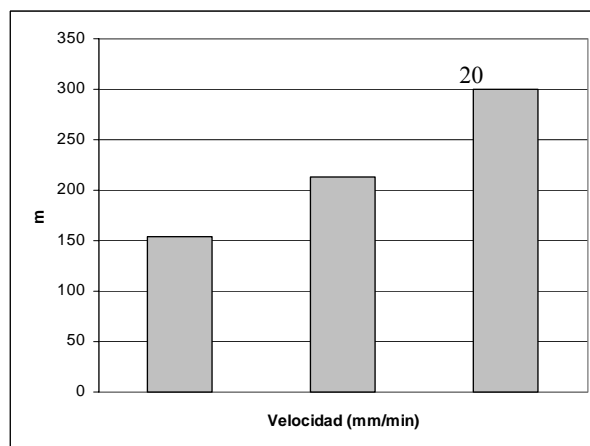


Figura 5. Parámetro m vs. Velocidad.

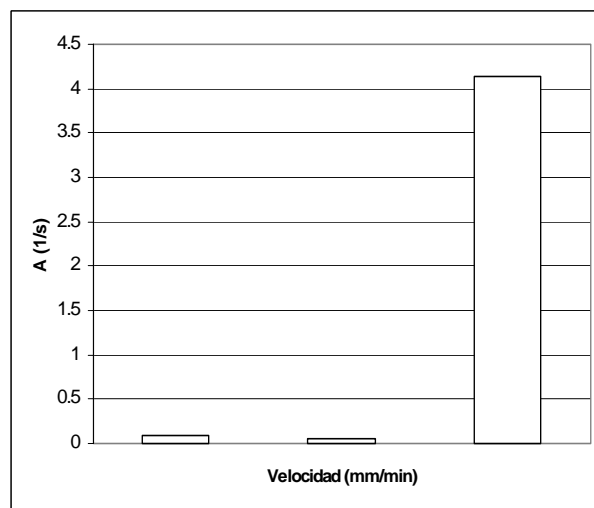


Figura 6. Parámetro A vs. Velocidad

CONCLUSIONES

La relajación de esfuerzos se ve influenciada por la tasa de deformación durante la aplicación del pre-esfuerzo. A medida que aumenta la tasa de deformación, la relajación de esfuerzos también es mayor. Lo anterior está asociado a una estructura de dislocaciones de baja energía más desarrollada para metales ensayados a menores tasas de deformación.

El ajuste de la data experimental mediante la ley potencial, se considera satisfactorio, por cuanto brindó para las condiciones estudiadas, una correlación promedio de 90%, permitiendo hacer extrapolaciones a tiempos mayores, lo cual representa una alternativa en la estimación de esfuerzos durante ensayos de larga duración.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se llevó a cabo con el soporte de la Oficina de Planificación del Sector Universitario (OPSU), mediante el financiamiento a través del Programa de becas “Alma Mater”.

Se agradece a Vicson de Venezuela, S.A por el suministro de las muestras usadas en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Adalet Zeren, Muzaffer Zeren (2003). “Stress relaxation properties of prestressed steel wires”. *Journal of Materials Processing Technology* 141, pp. 86-92
- [2] J.M. Atienza, M.L. Martinez-Perez, M. Elices (2005). “Residual stresses in cold drawn ferritic rods”. *Scripta Mater.* 52, pp 305-309
- [3] J.M. Atienza, M.L. Martinez-Perez, M. Elices (2005). “Residual stresses in cold drawn pearlitic rods”. *Scripta Mater.* 52, pp 1223-1228
- [4] R. Urbáez, F. Toledo, G. Castro Farinas and E.S. Puchi Cabrera (2000). “Relaxation behavior of wire drawn perlitic steel componentes”. *International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials.*
- [5] Ricardo E. Medrano and Peter P. Gillis. (1989). “Stress relaxation of an AISI 1080 Steel”. *Metall. Trans. A*, 20 A. 2011-2015
- [6] Michael W. Woodmanse, Richard W. Neu (2002). “The influence of prior strain rate on stress relaxation in solder alloys” *Mater. Sci. Eng. A322*, pp. 79-88
- [7] Erhard Krempl. (2001). “Relaxation behavior and modeling”. *Int. J. Plasticity* 17, pp.1419-1436
- [8] Erhard Krempl, Fazeel Khan. (2003). “Rate (time)-dependent deformation behavior: an overview of some properties of metals and solid polymers”. *Int. J. Plasticity* 19, pp.10