

Comportamiento de relajación de esfuerzos en aceros al carbono sometidos a distintos niveles de esfuerzo en zonas de deformación elástica y plástica

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

⁽¹⁾Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Carabobo- Venezuela

⁽²⁾Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales. Universidad Central de Venezuela

E-mail: scabello@uc.edu.ve

Resumen

Se investigó el comportamiento de relajación de esfuerzos en aceros al carbono sometidos a distintos niveles de esfuerzo en zonas de deformación elástica y plástica. El estudio se realizó en alambrones de 5 mm de diámetro, con porcentajes de carbono entre 0.1 y 0.75. Para ello fue empleada 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. Los ensayos fueron realizados a una velocidad de aplicación de carga de 2 mm/min y a cargas de 30, 40, 50, 70, 80 y 90% de la carga de rotura correspondiente a cada acero, comprendiendo condiciones de deformación elástica y plástica. La data experimental es tratada según una ecuación mecánica de estado del tipo potencial y es comparada con el modelo teórico de Stussi.

Palabras claves: Relajación de esfuerzos, ley potencial, aceros al carbono

Stress relaxation behavior of carbon steels at different levels of stress in elastic and plastic strain zones

Abstract

A study about the stress relaxation behaviour of carbon steel at different levels of stress in elastic and plastic strain zones is presented. Wire rod of 5.5 mm diameter with contents of carbon between 0.1 and 0.75 percent were tested. 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. Test were made at a cross head speed of 2 mm/min and loads of 30, 40, 50, 70, 80 and 90% of rupture load corresponding with each steel, including elastic and plastic strain conditions. Experimental data is treated according to a potential mechanical equation of state and it is compared with theoretical model referred by Stussi.

Keywords: Stress relaxation behavior, power law, carbon steels

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de relajación se refiere a la pérdida de la carga (tensión) en función del tiempo, cuando un componente es tensado a una carga inicial, en un porcentaje preestablecido de la carga nominal de rotura y manteniendo constante la longitud [1]. Este fenómeno se manifiesta como consecuencia del efecto viscoso de los materiales, lo que implica que las deformaciones dependen del tiempo y es lo que se conoce como anelasticidad.

Este efecto supone una contracción en el componente elástico de la deformación inicialmente provocada en la precarga, para dar paso a la deformación plástica inherente y finalmente se traduce en un descenso en el esfuerzo como resultado de la saturación en el movimiento de dislocaciones, hasta que las mismas alcanzan el término de la zonas de deslizamiento o hasta que coinciden con campos de esfuerzos de dislocaciones que las han precedido.

El movimiento de dislocaciones continuará hasta que se alcance un esfuerzo de equilibrio y el esfuerzo de origen sea reducido a un valor crítico. Este fenómeno es

de especial interés en la industria del concreto pretensado; donde la carga inicialmente aplicada al componente metálico, y previo al vaciado del concreto, desciende con el tiempo, comprometiendo la eficiencia del conjunto concreto-acero. La magnitud de la relajación varía dependiendo del tipo del acero, pero los parámetros más significativos son el tiempo y la intensidad del esfuerzo inicial.

El decrecimiento del esfuerzo aplicado con el tiempo se ha venido estimando con frecuencia por medio de la ecuación empírica referida por Zeren [2] y Urbáez [3] de la forma:

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - \frac{\text{Log } t}{10} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_y} - 0,55 \right) \right] \quad (1)$$

Donde σ representa el esfuerzo instantáneo para un tiempo t (en horas) posterior a la aplicación del esfuerzo inicial σ_0 y σ_y el esfuerzo de fluencia del alambre de acero.

Otros modelos similares hacen una distinción, para el tratamiento de componentes de relajación normal y baja relajación; donde el término 0,55 de la ecuación (1) es sustituido por 0,67 y 0,73 respectivamente. Dichos modelos permiten correlaciones aceptables en ensayos de larga duración, específicamente en torones, aún cuando sobreestima en algún grado el fenómeno relajación [3], sin embargo; para ensayos de corta duración, los modelos citados no permiten estimaciones apropiadas sobre el decrecimiento del esfuerzo con el tiempo. Zeren [2] refiere el modelo propuesto por Stussi:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + 10^n} \quad (2)$$

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

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.

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 [4], de la forma:

$$\sigma = \sigma_0 (1 + At)^{\frac{1}{1-m}} \quad (4)$$

Donde A y m representan constantes del material.

Esta investigación ha sido realizada con la finalidad de estudiar el comportamiento de relajación de esfuerzos en aceros con diferentes contenidos de carbono en un rango de aplicación de esfuerzos que generan deformaciones de naturaleza elástica y plástica, por medio de la ley potencial de creep, de la cual son obtenidos los parámetros A y m a través de análisis de regresión lineal de la data experimental.

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 computadora (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 longitud total de las probetas fue de 320 mm y la longitud entre mordazas de 220 mm. Los ensayos fueron realizados a una velocidad de aplicación de la carga de 2 mm/min y a cargas de 30, 40, 50, 70, 80 y 90% de la carga de rotura del acero correspondiente; comprendiendo condiciones de deformación elástica (30, 40 y 50%) y de deformación plástica (70, 80 y 90%).

Los ensayos fueron realizados a distintos niveles de esfuerzos, que se corresponden con fracciones del esfuerzo de rotura de cada acero, que garantizan relajación en el campo elástico y plástico.

La Tabla 2 muestra los valores de esfuerzos de fluencia y rotura para cada acero y los correspondientes esfuerzos aplicados en los ensayos de relajación. La duración de cada ensayo fue de 4 horas y a una temperatura constante de aproximadamente 20°C.

Tabla 1. Composición química (% peso) de los aceros ensayados

ACERO	C	Mn	Si	P	S	Al
SAE1010	0.11	0.42	0.092	0.012	0.008	0.001
SAE1035	0.335	0.65	0.21	0.018	0.010	0.025
SAE1060	0.63	0.74	0.23	0.012	0.012	0.002
SAE1075	0.78	0.64	0.21	0.012	0.010	0.002

Tabla 2. Esfuerzos de fluencia σ_y , rotura σ_r y fracciones de esfuerzo de rotura $0.i \sigma_r$ aplicados

ACERO	σ_y	σ_r	$0.3 \sigma_r$	$0.4 \sigma_r$	$0.5 \sigma_r$	$0.7 \sigma_r$	$0.8 \sigma_r$	$0.9 \sigma_r$
SAE1010	273.588	403.227	120.968	161.291	201.613	282.259	322.581	362.904
SAE1035	378.814	616.204	184.861	246.482	308.102	431.343	492.964	554.584
SAE1060	547.176	900.736	270.221	360.294	450.368	630.515	720.589	810.662
SAE1075	690.284	1094.352	328.306	437.741	547.176	766.046	875.482	984.917

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra los perfiles de relajación correspondientes al acero SAE 1075 en las diferentes condiciones de deformación, se incluye tanto la data experimental, como el ajuste de acuerdo al modelo potencial, y el perfil resultante de aplicar el modelo teórico propuesto por Stussi.

Para las condiciones de deformación plástica el modelo teórico subestima el comportamiento de relajación, mientras que en las condiciones de deformación elástica el modelo teórico se aproxima más al comportamiento experimental; especialmente a 40% de la carga de rotura, exceptuando el comportamiento a 30%, donde el modelo teórico sobreestima la relajación.

La Figura 2 muestra los perfiles de relajación correspondientes al acero SAE 1060. Se observa mayor

aproximación entre los perfiles experimental, ajustado por ley potencial y teórico de Stussi; excepto para la condición de 50%, donde el modelo propuesto por Stussi subestima en mayor grado la relajación.

En la Figura 3, los perfiles de relajación para diferentes condiciones de deformación en el acero SAE 1035 muestran gran similitud entre el comportamiento experimental, ajustado por ley potencial y teórico de Stussi, aún cuando el modelo de Stussi en todos los casos subestima ligeramente la pérdida de pre-esfuerzo en el tiempo.

En los perfiles de relajación del SAE 1010, mostrados en la Figura 4, se observa una aproximación aceptable entre el comportamiento experimental, ajustado por ley potencial y el perfil obtenido a partir del modelo de Stussi.

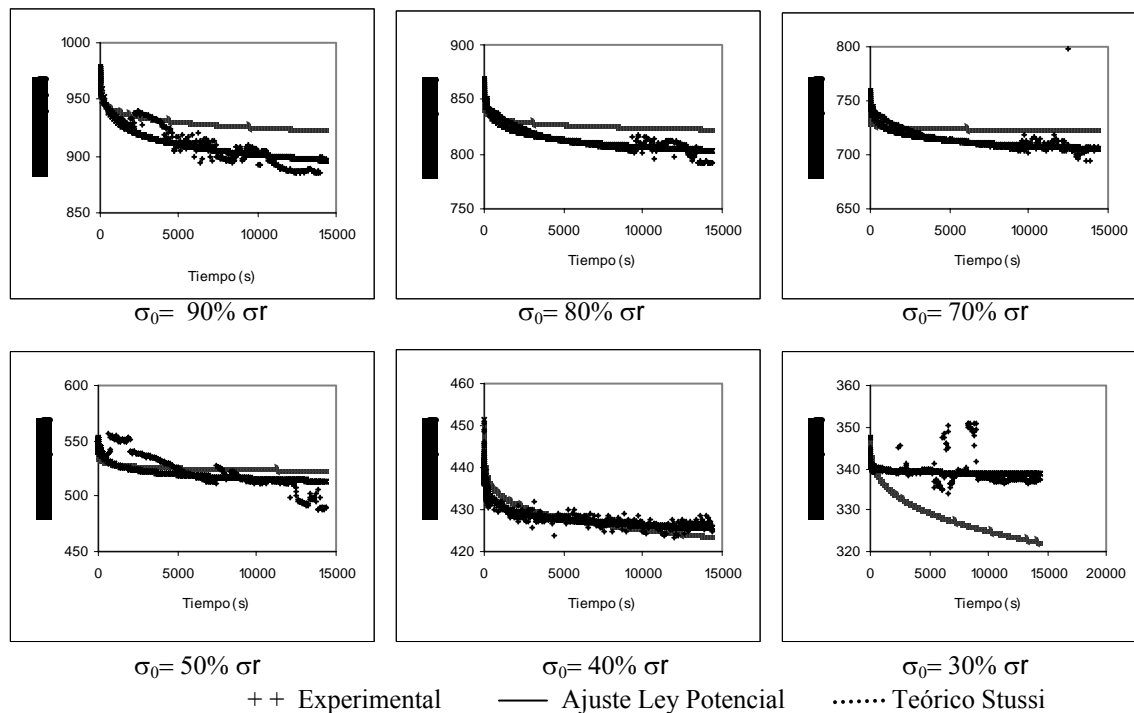


Figura 1. Patrones de relajación: experimentales, con ajuste potencial y según Stussi para acero SAE1075 en distintas zonas de aplicación de la carga

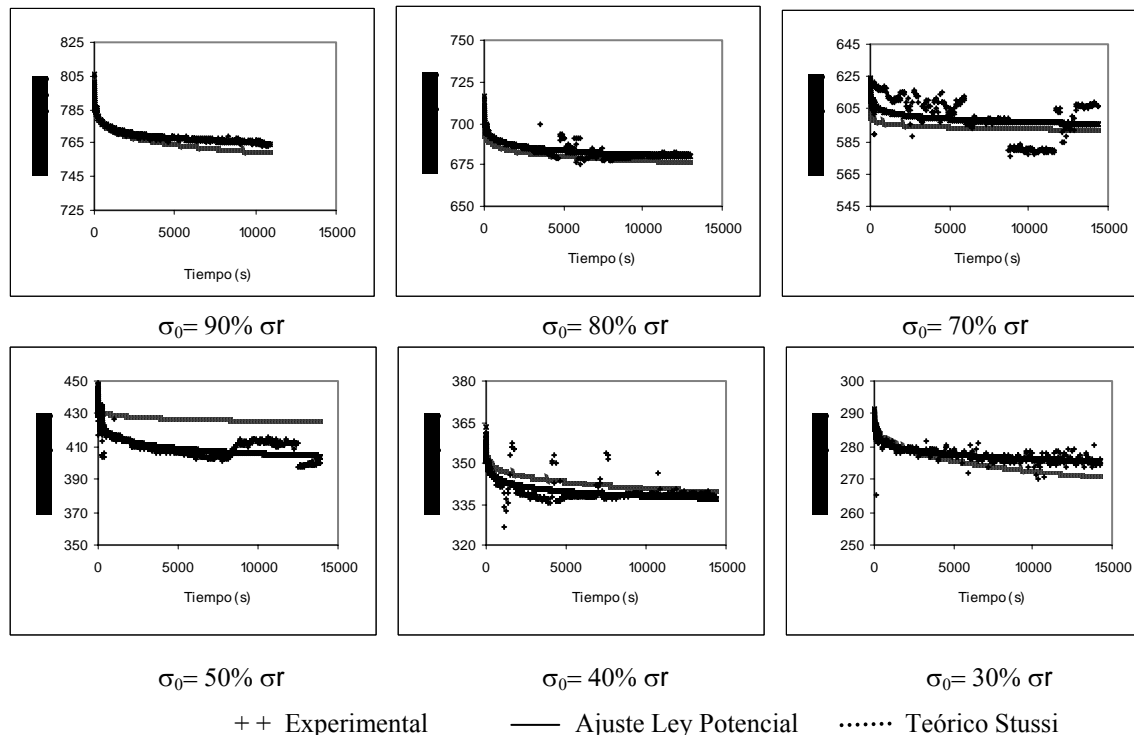


Figura 2. Patrones de relajación: experimentales, con ajuste potencial y según Stussi para acero SAE 1060 en distintas zonas de aplicación de la carga

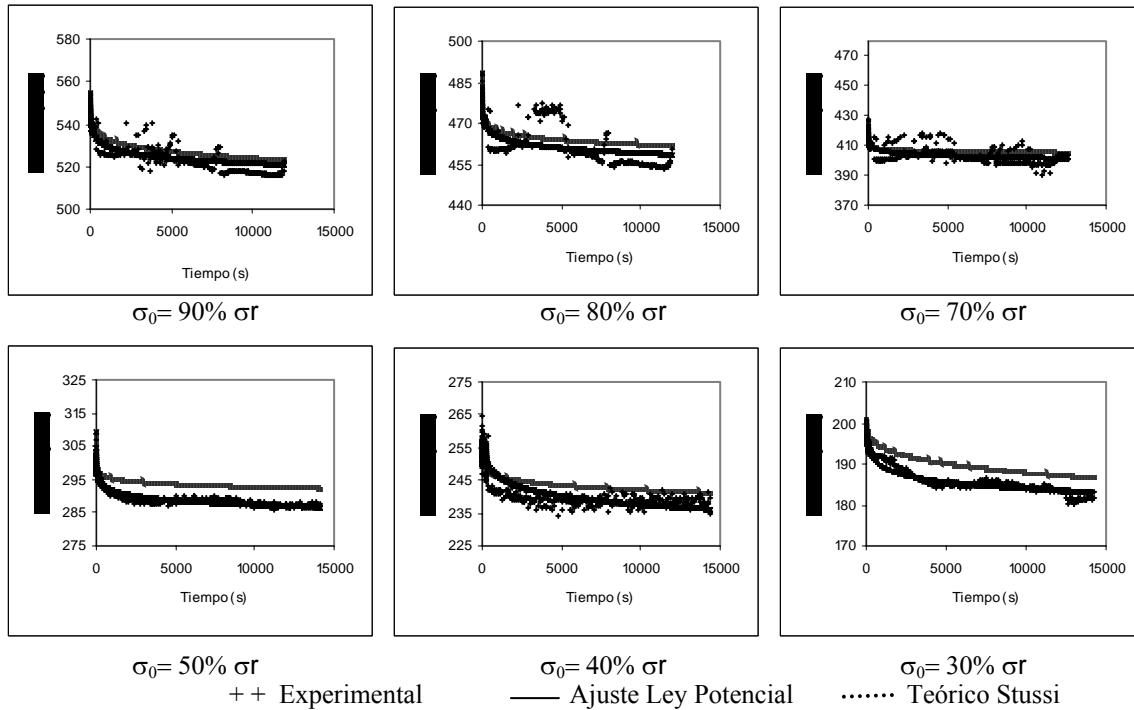


Figura 3. Patrones de relajación: experimentales, con ajuste potencial y según Stussi para acero SAE 1035 en distintas zonas de aplicación de la carga

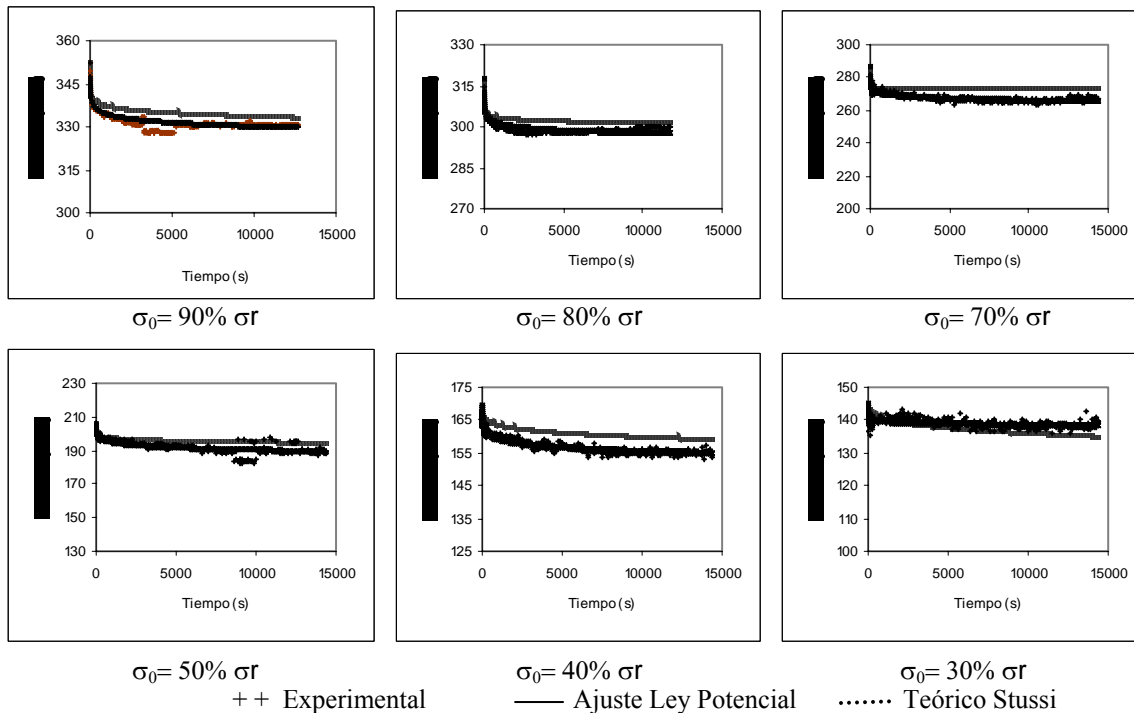


Figura 4. Patrones de relajación: experimentales, con ajuste potencial y según Stussi para acero SAE 1010 en distintas zonas de aplicación de la carga

La disminución en el pre-esfuerzo inicialmente aplicado para cada uno de los aceros estudiados a distintas condiciones de deformación se muestra en la figuras 5 y 6. Para todos los aceros ensayados, la relajación de esfuerzos es mucho más baja en la zona elástica que en la región plástica, lo cual sugiere mecanismos de deformación diferentes [4].

Por otra parte, la estabilización del esfuerzo ocurre en menor tiempo para los aceros deformados en la zona elástica, esto último no es reproducible por el

modelo de Stussi; por lo que sólo se observa en los patrones obtenidos de la data experimental, y es en éstos patrones donde puede observarse las tres zonas de interés: relajación acelerada, relajación intermedia, y estabilización, las cuales son más claramente diferenciables en muestras relajadas a partir de esfuerzos que generan deformación plástica ya que en la relajación a partir de esfuerzos que generan deformaciones de naturaleza elástica, sólo las zonas de relajación acelerada y estabilización pueden ser identificadas [5]

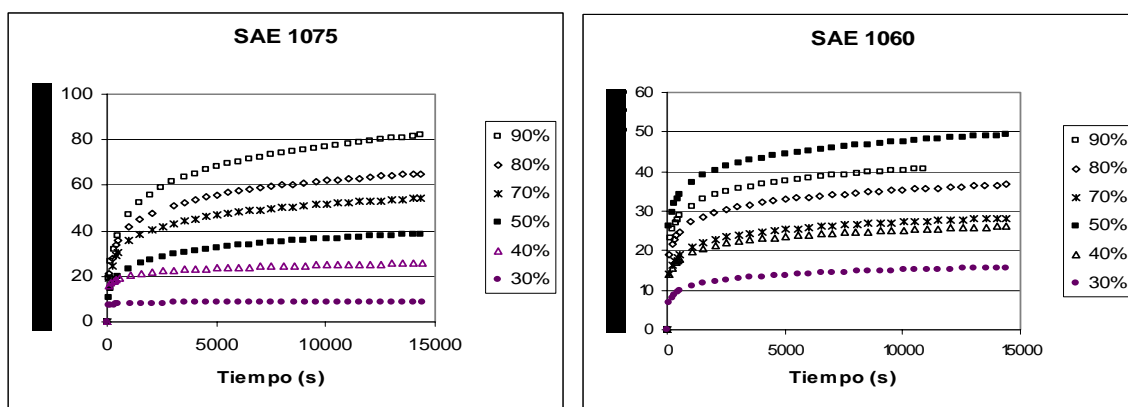


Figura 5. Disminución del esfuerzo a distintas condiciones de deformación para aceros de alto carbono.

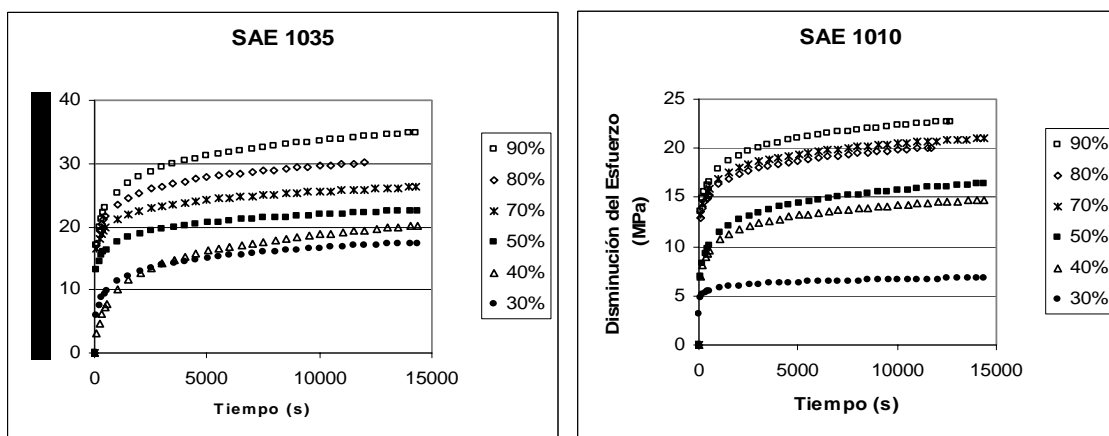


Figura 6. Disminución del esfuerzo a distintas condiciones de deformación para aceros de bajo carbono.

La Tabla 3 muestra los parámetros involucrados en la ecuación del tipo potencial utilizada para el tratamiento de la data experimental, y se incluye la correlación obtenida para cada uno de los ensayos.

Nótese que los parámetros m y A entre cada condición no son comparables, ya que cada par corresponde a condiciones totalmente diferentes, debido a

que son efectuados sobre materiales y niveles de esfuerzo diferentes, a diferencia de los parámetros de ajuste obtenidos por Urbáez y colaboradores [3], donde se experimentó a un mismo nivel de preesfuerzo (70% de carga de rotura) y con un mismo material (acero perlítico); y la diferenciación entre las condiciones se

basó únicamente en la característica de relajación (baja y normal).

En las Figuras 7 y 8 se representa gráficamente la variación de los parámetros m y A para las condiciones estudiadas

Tabla 3. Parámetros involucrados en ec. (4) obtenidos de regresión lineal a la data experimental.

Código	σ_0 (MPa)	m	A (s⁻¹)	r^2
75R90	984.917	69.663	0.028	0.928
75R80	875.482	91.713	0.082	0.978
75R70	766.046	101.368	0.118	0.63
75R50	547.176	92.25	0.051	0.779
75R40	450.621	92.664	0.033	0.935
75R30	328.306	933.221	2165683	0.342
60R90	810.662	193.283	1.971	0.995
60R80	720.589	194.451	1.799	0.968
60R70	630.515	214.408	1.361	0.608
60R50	450.368	90.469	2.053	0.883
60R40	360.294	140.623	2.312	0.902
60R30	270.221	155.600	0.36	0.877
35R90	554.584	148.311	0.981	0.863
35R80	492.964	174.993	5.311	0.789
35R70	427.28	208.85	36.827	0.69
35R50	308.102	155.326	8.103	0.983
35R40	246.482	62.671	0.0107	0.93
35R30	184.861	80.819	0.0977	0.982
10R90	352.457	176.314	9.467	0.975
10R80	322.581	199.554	35.896	0.933
10R70	282.259	174.706	38.739	0.95
10R50	206.462	101.978	0.301	0.975
10R40	161.291	102.15	0.698	0.974
10R30	120.968	364.625	2351.84	0.625

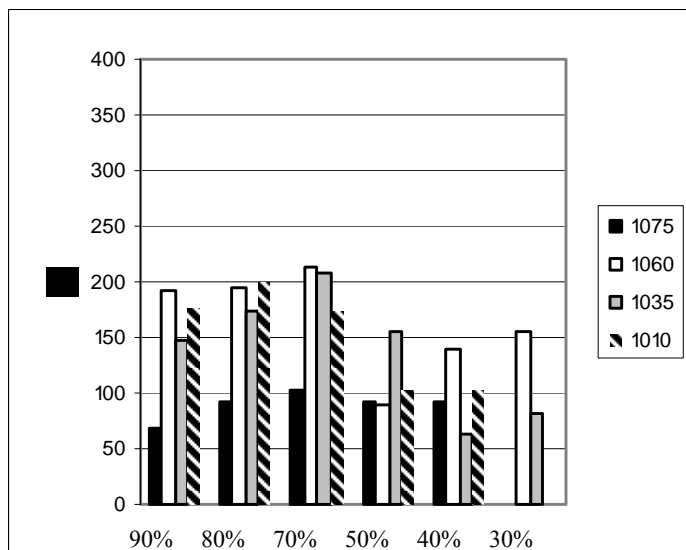


Figura 7. Variación del parámetro m a distintos niveles de aplicación de la carga

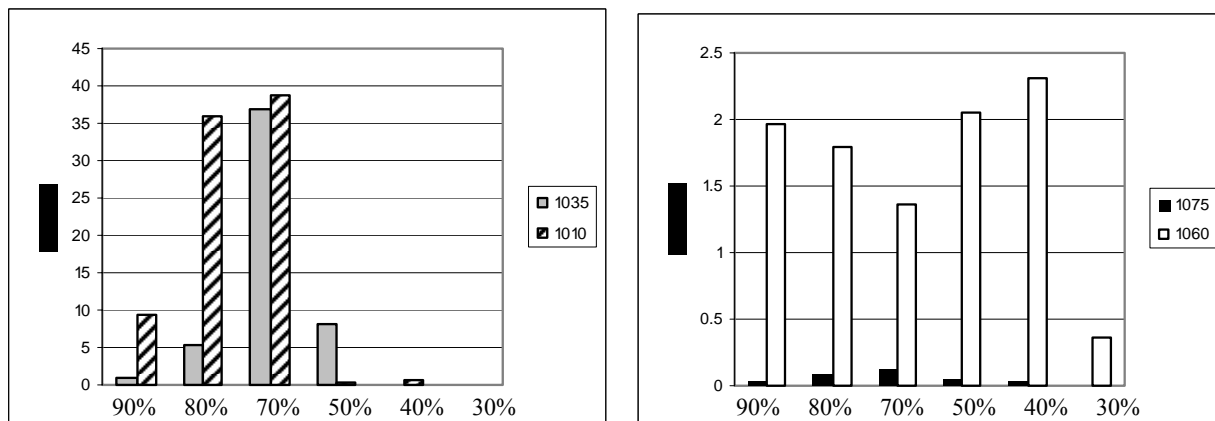


Figura 8. Variación del parámetro A para distintos niveles de aplicación de la carga

Aún cuando el parámetro m no mostró una tendencia claramente definida con la variación del porcentaje de carga aplicada ni entre aceros de diferentes contenidos de carbono, el parámetro A parece indicar que es mayor cuando de aceros de bajo carbono se trata; de manera similar que el parámetro m, el parámetro A no mostró tendencia definida con la variación del porcentaje de carga aplicada. De lo anterior se desprende que dichos

parámetros, separadamente no describen de manera inequívoca el comportamiento de relajación.

Sin embargo, una vez determinados estos parámetros es posible extrapolar sobre la pérdida del pre-esfuerzo a tiempos superiores, no evaluados directamente durante el ensayo de corta duración; lo que constituye una alternativa frente a la demanda de tiempo y equipamiento

que implican los ensayos de larga duración requeridos en aplicaciones industriales.

CONCLUSIONES

La magnitud del esfuerzo aplicado y la naturaleza de la deformación asociada (elástica o plástica) modifica de manera sustancial el patrón de relajación. La relajación de esfuerzos es mucho más baja en la zona elástica que en la región plástica, lo cual sugiere mecanismos de deformación diferentes. A medida que se eleva el esfuerzo aplicado y se pasa de zona elástica a plástica; la relajación alcanza una mayor magnitud y la estabilización ocurre en mayor tiempo, esto último es más notable en aceros con mayor contenido de carbono.

En las curvas de relajación pueden identificarse tres zonas de interés: una primera correspondiente a relajación acelerada, la cual ocurre en los primeros segundos de la prueba, una segunda o de relajación intermedia, con una tasa de relajación menor y una tercera zona que comprende la estabilización, donde no ocurre variación importante del esfuerzo con el tiempo.

Los patrones de relajación para condiciones de deformación elástica y plástica son claramente diferenciables: en el primer caso las zonas predominantes son la de relajación acelerada y estabilización, siendo la zona intermedia poco o nada distinguible; mientras que en el caso de deformación plástica las tres etapas se pueden apreciar.

El modelo propuesto por Stussi para la estimación de relajación de esfuerzos, proporciona buenos resultados en aceros al carbono, con porcentajes entre 0.1 y 0.75 de carbono en un rango de esfuerzos que generan deformaciones tanto elásticas como plásticas. Sin embargo en el 70% de los casos estudiados subestimó el comportamiento de relajación.

El ajuste de la data experimental mediante la ley potencial de creep, se considera satisfactorio, por cuanto presentó para las condiciones estudiadas una correlación promedio de 90% y, conocidos los parámetros A y m es posible extrapolar sobre la relajación de esfuerzos a mayores tiempos, lo que representa una alternativa en ensayos de relajación de larga duración.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se ha llevado 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 BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Norma Venezolana COVENIN (1995). "Cordón de acero de siete alambres relevado de tensiones para miembros estructurales pretensados o postensados". N° 1024
- [2] Adalet Zeren, Muzaffer Zeren (2003). "Stress relaxation properties of prestressed steel wires". *Journal of Materials Processing Technology* 141. 86-92
- [3] R. Urbaez, F. Toledo G. Castro Fariñas and E. S. Puchi Cabrera. (2000). "Relaxation behavior of wire draw perlitic steels components". *International Conference on processing and manufacturing of advanced materials*. Las Vegas, USA.
- [4] Ricardo E. Medrano and Peter P. Gillis. (1989). "Stress relaxation of an AISI 1080 Steel". *Metallurgical Transactions A*, 20 A. 2011-2015
- [5] S. Cabello, E. Ochoa y E.S. Puchi Cabrera. (2004). "Comportamiento de relajación para el acero AISI 1075 sometido a distintos niveles de carga en zonas de deformación elástica y plástica". *Jornadas de investigación de la Facultad de ingeniería Jifi 2004*. Caracas, Venezuela.