

EFECTO DE LA TENSION ELASTICA EN LA CINETICA DE RECUPERACION DE ACEROS MARTENSITICOS

M.A. Vicente Alvarez⁽¹⁾, M. Marchena⁽²⁾, T. Perez⁽³⁾

(1) Centro Atómico Bariloche, CNEA, ARGENTINA

(2) Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA

(3) Departamento Metalurgia, REDE-AR, TENARIS SIDERCA

E-mail (Vicente Alvarez): m.a.vicente@cab.cnea.gov.ar

RESUMEN

Se realizó un estudio experimental sobre el efecto de la tensión elástica en la cinética de recuperación de aceros martensíticos deformados en frío. Utilizando una máquina de ensayos termomecánicos, se deformó en frío la probeta, luego se le aplicó un ciclo de térmico y finalmente se realizó una segunda tracción, para evaluar los cambios en las propiedades mecánicas por efecto del ciclo aplicado. Durante el ciclo térmico se mantuvo la probeta sometida a una tensión en el rango elástico, se estudiaron 4 casos, sin tensión, con 100, 200 y 300 MPa de tensión aplicada. Se observó que la tensión produce una aceleración en la cinética de recuperación del material, la cual se atribuyó a un aumento en la movilidad de las dislocaciones a alta temperatura. Se desarrolló un modelo simple que contiene los efectos de disminución de la densidad de dislocaciones por el mecanismo de recuperación y un incremento de las mismas por creep. Se concluyó que el creep durante el ciclo es sólo relevante a las más altas tensiones.

Tópico: 2-Materiales Metálicos

Palabras clave: aceros martensíticos, recuperación, creep, modelado

1. INTRODUCCION

El proceso de producción de ciertas piezas de acero puede requerir de un conformado en frío durante el cual se introduce en el material una alta densidad de dislocaciones, las que afectan sus propiedades mecánicas (aumento en la fluencia, caída de ductilidad, etc.). Es por ello que, muchas veces, es necesario un tratamiento térmico posterior con el objeto de disminuir la densidad de dislocaciones mediante el proceso de recuperación [1]. De esta forma se logra mejorar la ductilidad y reducir las propiedades mecánicas para que cumplan con los requerimientos del producto. Cuando el trabajado mecánico es inhomogéneo, se introduce también un perfil de tensiones residuales. Las tensiones presentes pueden afectar la cinética de recuperación así como también producir creep durante el ciclo térmico.

Es bien sabido que la movilidad de las dislocaciones a temperatura aumenta por la presencia de una tensión aplicada. Esto se debe a que bajo tensión, las dislocaciones tienen mayor capacidad para sortear las barreras, acelerando de esa forma su deslizamiento [2]. Por ese lado, es esperable que la cinética de recuperación crezca a medida que aumenta la tensión aplicada. Por otro lado, en presencia de la tensión elástica hay una producción de nuevas dislocaciones debido al proceso de creep, lo que llevaría a un aumento en los obstáculos por sortear, además de un aumento en las propiedades mecánicas [3]. Estos dos mecanismos tienen efectos contrapuestos.

El objetivo de este trabajo es disponer de datos experimentales que nos permitan dilucidar cuál es el efecto de la tensión elástica en la cinética de recuperación y poder estimar el peso de cada uno de esos mecanismos. Para ello se realizaron "ensayos de recuperación" en presencia de distintas tensiones elásticas. Estos ensayos consistieron en 1) deformar plásticamente una probeta de tracción 2) aplicar sobre la probeta deformada un ciclo

térmico al mismo tiempo que se la somete a una tensión elástica conocida, y 3) realizar una nueva deformación plástica del material, pero esta vez únicamente para determinar sus propiedades mecánicas finales. La comparación entre las propiedades mecánicas antes y después del ciclo térmico nos permitirá levantar curvas de cinética de recuperación para distintas temperaturas, tiempos y tensiones aplicadas.

Como antecedentes de este trabajo, ya se ha realizado una caracterización exhaustiva de la cinética de recuperación de estos materiales sin tensión aplicada. Incluso se desarrolló un modelo simple que logra predecir con buena precisión las propiedades mecánicas finales luego de una dada deformación y ciclo térmico a partir de la evolución de la densidad de dislocaciones [4].

Como complemento de la parte experimental de este trabajo, se extendió el modelo de la Ref.[4] de forma de incluir tanto el efecto de la tensión en la cinética de recuperación así como el endurecimiento por creep.

El trabajo está estructurado de la siguiente forma: en la siguiente sección se presenta un detalle experimental, en la que se describen los ensayos de recuperación bajo tensión y ensayos de creep en material deformado. Estos últimos serán usados como datos de entrada del modelo. En la sección subsiguiente se presentarán los resultados experimentales. Luego se detallará el modelo y su implementación.

2. DETALLES EXPERIMENTALES

El material usado en este estudio es un acero martensítico revenido similar al de la Ref. [4]. El proceso de producción final involucra un templado desde la fase austenítica del acero de forma de lograr una estructura martensítica, seguido de un revenido de 695°C por 20min.

Como se mencionó en la introducción, se realizaron dos tipos distintos de experimentos. A continuación daremos los detalles experimentales de cada uno de ellos.

Ensayos de recuperación bajo tensión

Para realizar estos ensayos se mecanizaron probetas cilíndricas de 4mm de diámetro. Estas probetas fueron ensayadas en una máquina marca Gleeble, modelo 3500. En esta máquina la probeta es calentada por efecto Joule, lo que permite obtener altas velocidades de calentamiento. La temperatura durante el ciclo se controló con una termocupla soldada al medio de la probeta. La secuencia experimental fue la siguiente, se aplicó una deformación plástica hasta un 6% de deformación, la cual fue medida con un extensómetro ubicado en la zona calibrada de la probeta. La velocidad de deformación fue de 1.10^{-4} s^{-1} . Luego se sometió a la probeta a una tensión en el rango elástico (para la temperatura máxima del ciclo). Se la calentó con una velocidad de 100°C/s, se la mantuvo a una dada temperatura por un tiempo pre-fijado, el cual se varió entre los 5 y los 300seg y finalmente se la enfrió a temperatura ambiente a una velocidad de 40°C/seg. Una vez que finalizó el ciclo térmico se reubicó el extensómetro y se realizó la tracción final (igual velocidad de deformación que en la pre-deformación) para determinar las propiedades mecánicas finales.

La efectividad del ciclo térmico para recuperar las propiedades mecánicas se midió a través del siguiente parámetro, que estima la fracción recuperada:

$$\chi = \frac{\sigma^{Def} - \sigma(T, t)}{\sigma^{Def} - \sigma^0} \quad (1)$$

donde σ^0 y σ^{Def} son las tensiones de fluencia del material original y luego de la deformación en frío, respectivamente, las que se obtienen de la curva tensión-deformación durante la pre-deformación. $\sigma(T, t)$ es la fluencia del material luego de ser tratado térmicamente con un ciclo caracterizado por una temperatura T y un tiempo t . Este valor se obtiene de la curva de tracción final.

Ensayos de creep en material deformado

El objetivo de estos ensayos es determinar la cinética de creep para un material deformado en frío. Realizar este experimento es técnicamente difícil ya que es fundamental efectuar el calentamiento y la homogenización térmica de la probeta en tiempos muy cortos, tratando de evitar una recuperación importante del material antes de comenzar el ensayo de creep en sí. Debido a estas dificultades, se optó por calentar primero la probeta hasta la temperatura de ensayo para luego realizar la pre-deformación. Es claro que la cinética de creep que se está midiendo es la de un material deformado en caliente, el cual pudo sufrir recuperación dinámica [5]. Teniendo en cuenta que el tiempo que lleva deformarlo es muy corto, consideramos que el error introducido es chico.

Para este ensayo se utilizaron muestras cilíndricas de 9mm de diámetro. Los ensayos se realizaron en una máquina marca MTS que dispone de un horno de lámparas. La temperatura se midió a través de una termocupla soldada en el centro de la zona donde se ubicó el extensómetro. Se calentó la probeta con una velocidad de $\sim 2^{\circ}\text{C/s}$ y se la mantuvo a esa temperatura por 20min de forma de asegurar una buena homogenización térmica. Las diferencias de temperatura entre los extremos de la zona calibrada ($l_0=25\text{mm}$) fueron menores a los 3°C . La deformación plástica se realizó a una velocidad de $2 \cdot 10^{-4}$ 1/s. Una vez que se alcanzó la deformación deseada, se redujo la tensión aplicada a los valores que requieren el ensayo de creep. Se mantuvo esa tensión por 2 horas. En la Figura 1 se muestran los detalles de la evolución de la tensión y deformación como función del tiempo para las distintas etapas del ensayo. Se estudiaron los casos de material sin deformación y deformado al 2.5%. No se logró deformar la probeta a valores mayores del 3% por la aparición de necking.

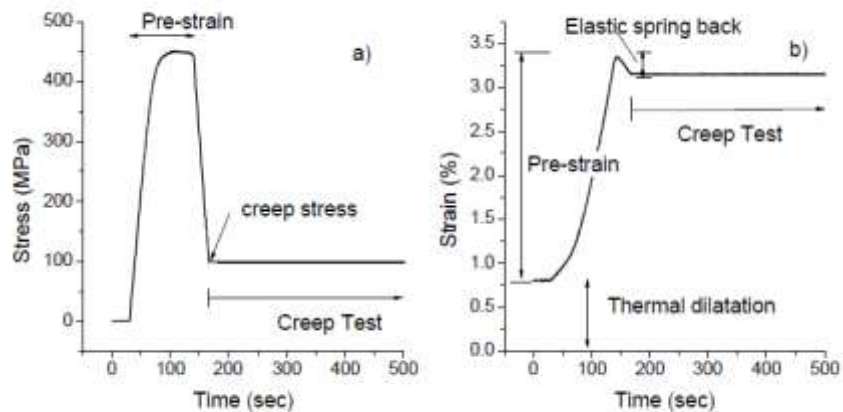


Figura 1. Evolución de la a) tensión y b) deformación durante el ensayo de creep.

3. RESULTADOS

Ensayos de recuperación bajo tensión

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos para los ensayos de recuperación bajo tensión. Los puntos corresponden a los datos experimentales de la fracción recuperada (Ec.(1)), mientras que las líneas corresponden a los resultados del modelo que se detallará más adelante. Los ensayos corresponden a una temperatura de 600°C , la cual fue seleccionada ya que permitía observar en tiempos cortos una recuperación intermedia. Las distintas líneas corresponden a distintos valores de tensiones elásticas aplicadas. Para esta temperatura la tensión de fluencia del material se determinó en $\sim 400\text{MPa}$.

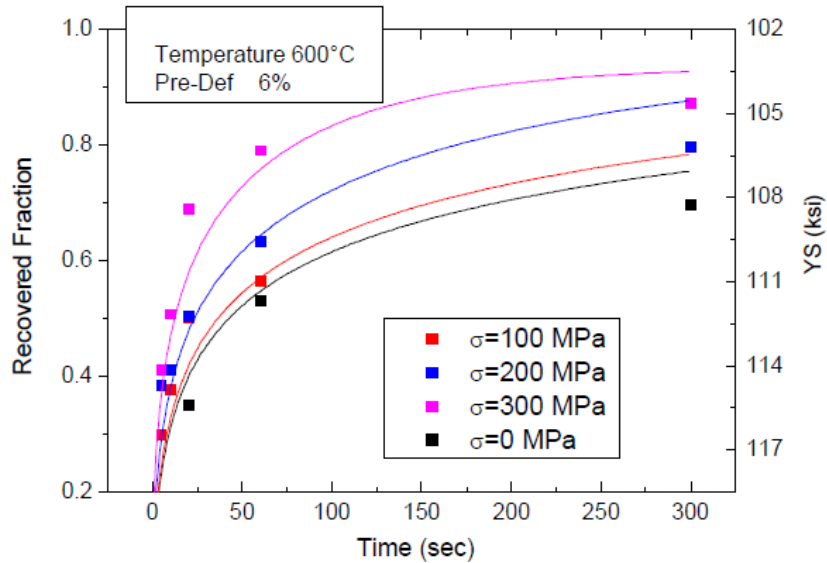


Figura 2. Fracción recuperada (Ec.(1)) medidas para distintas tensiones elásticas aplicadas y distintos ciclos térmicos.

Estos resultados muestran claramente como la cinética de recuperación se acelera por efecto de la tensión elástica.

Ensayos de creep

En la Figura 3 se presentan los resultados de los ensayos de creep en el material sin deformación mientras que en la Figura 4 se presentan las curvas para el material deformado a 600°C luego de una pre-deformación del 2.5%. Las líneas gruesas corresponden a los datos experimentales mientras que las líneas finas (las que se superponen con las curvas experimentales para casi todos los casos) son el cálculo de un modelo fenomenológico que fue ajustado con estos mismos resultados. En el material sin deformar se ve que tanto la tensión como la temperatura tienen un efecto muy fuerte en la cinética, acelerándola notablemente. Estos resultados son los esperados para estos ensayos ya que la dependencia de la velocidad de deformación por creep suele ser de tipo potencial para la tensión y exponencial para la temperatura [6].

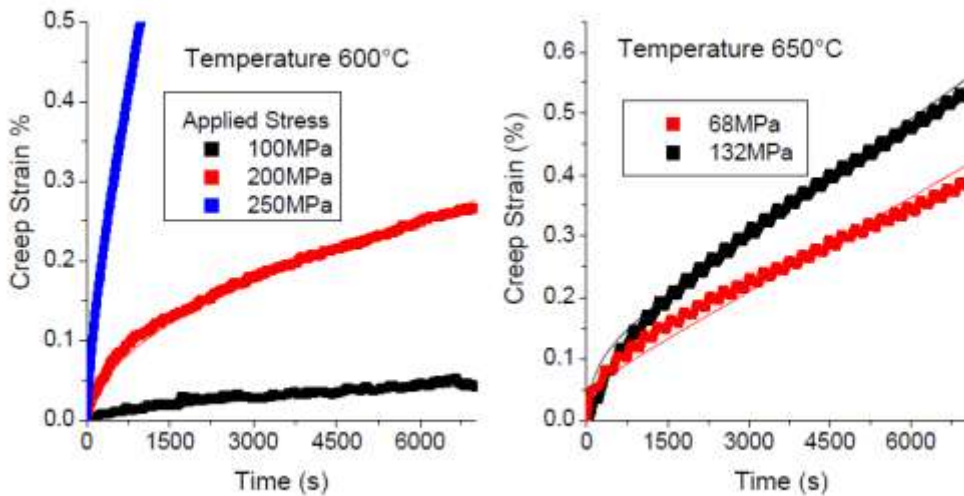


Figura 3. Ensayos de creep a distintas temperaturas y para distintas tensiones aplicadas para el material sin deformación.

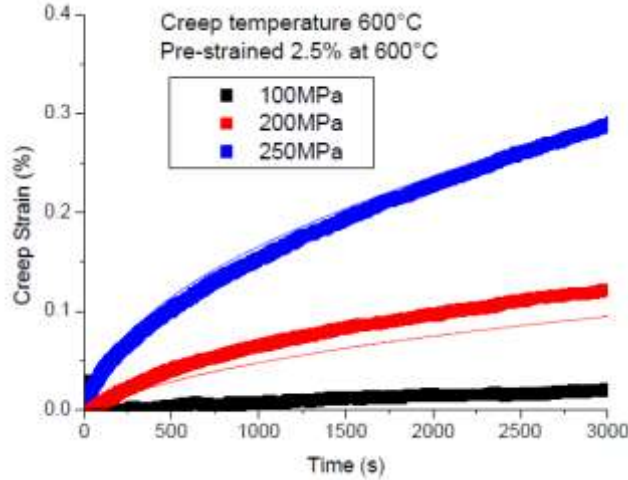


Figura 4. Ensayos de creep a 600°C para distintas tensiones aplicadas para el material deformado al 2.5%.

El material deformado (Figura 4) presenta una fuerte desaceleración en la cinética de creep en comparación con el material sin deformar. Mientras a 600°C el material sin deformar (Figura 3.a) muestra valores de deformación por creep muy elevados (0.5%) para 250MPa luego de 1000s, el material sin deformar sólo deformó 0.15% para iguales tensión y tiempo de exposición. Algo similar ocurre a 200MPa y a 100MPa. Evidentemente el rol que juegan las dislocaciones introducidas en la deformación generan importantes barreras para el desarrollo de este fenómeno. Este mismo comportamiento ya fue observado experimentalmente para otros materiales metálicos [7] Para poder incluir estos datos experimentales en el modelado de la cinética de recuperación, se optó por ajustar un modelo fenomenológico de creep que incluye tanto las etapas de creep primario como estacionario [8]. Las ecuaciones de este modelo son:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n (1 - H) \quad \text{y} \quad \dot{H} = \frac{h' \cdot \dot{\varepsilon}}{\sigma} \left(1 - \frac{H}{H^*} \right) \quad (2)$$

donde $\dot{\varepsilon}_0$, σ_0 , n , h' y H^* son parámetros a ajustar. La condición inicial para la resolución de este set de ecuaciones es $H(0)=0$. En esta ecuación $H(t)$ es una función que va de 0 a 1, y da cuenta de la disminución en la deformación por creep debido al avance del creep primario. A largos tiempos $H=1$ y la velocidad de deformación por creep es constante (creep secundario).

El set de parámetros que dan el mejor ajuste de las Figuras 3 y 4 se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de los parámetros de la Ec.(2) que dan el mejor ajuste de las curvas de las Figuras 3 y 4.

Pre-def	$\dot{\varepsilon}_0$	σ_0	h'	H^*
0	$2.65 \cdot 10^{28} \text{ s}^{-1}$ $\exp(-549 \text{ KJ/RT}(\text{°K}))$	250 MPa	$3.5 \cdot 10^5 \text{ MPa.s}$	$0.9 + (T(\text{°C}) - 600) \cdot 0.001$
2.5%		289 MPa		
6%*		343 MPa*		

* extrapolado

Cabe aclarar, que el cálculo del modelo coinciden con las curvas experimentales para todas las deformaciones, tensiones y estados de deformación, excepto para la curva obtenida en el material deformado a 200MPa en la cual se aparta ligeramente (ver Figura 4). Entre el material con y sin deformación se varió un único parámetro, σ_0 , el cual representa una tensión de referencia, cuanto mayor es ese valor menor es la velocidad de deformación. El resto de los parámetros sólo dependen de la temperatura de ensayo, con expresiones muy similares a las propuestas en la Ref[8]. Teniendo en cuenta que el efecto de la deformación se puede resumir a modificar sólo un parámetro, se extrapoló dicho valor para una deformación del 6% teniendo en cuenta una

regresión lineal. En un futuro y para tener una mejor estimación de σ_o sería conveniente realizar mediciones para varias pre-deformaciones.

4. DESARROLLO DEL MODELO DE RECUPERACION BAJO TENSION

En trabajos previos, desarrollamos un modelo de recuperación sin tensión. Este modelo se basa en la aniquilación de la densidad de dislocaciones ρ con una cinética que está determinada por la siguiente ecuación [4]:

$$\frac{d\rho}{dt} = -M(\rho, T) \cdot \rho \quad (3)$$

donde $M(\rho, T) = M_o \cdot e^{-Q(\rho)/RT}$ es la movilidad de las dislocaciones, y tiene asociada una energía de activación la que depende de la densidad de dislocaciones presentes en el material $Q(\rho) = Q_o - Q_1 \cdot \sqrt{\rho}$. La solución de la Ec.(3) es una función decreciente como función del tiempo. M_o, Q_o, Q_1 son parámetros que dependen del material, tanto de su microestructura como de su composición química. La relación entre la densidad de dislocaciones y el valor de fluencia del material se evalúa usando la siguiente relación [2]:

$$\sigma = \sigma_y + \alpha \cdot b \cdot G \cdot \sqrt{\rho} \quad (4)$$

donde σ_y es la fluencia del material sin deformación, $\alpha \sim 0.5$, b es el vector de Burgers y G el módulo de corte. Para resolver la Ec.(3) hay que usar como condición inicial el valor de ρ que corresponde al material deformado, el que se obtiene usando la Ec.(4) una vez que se conoce la fluencia de dicho material. Para extender la Ec.(3) al caso de la recuperación en presencia de una tensión externa, deben considerarse dos contribuciones: 1) el efecto que tiene la tensión sobre la movilidad M , y 2) el aumento en la densidad de dislocaciones por el mecanismo de deformación por creep. Se propone la siguiente ecuación:

$$\frac{d\rho}{dt} = -M(T, \sigma_A, \rho) \cdot \rho + WH_{creep} \quad (5)$$

donde ahora la movilidad $M(T, \sigma_A, \rho) = M_o \exp(-(Q_o - Q_1 \cdot \sqrt{\rho + C \cdot \rho_A}) / RT)$ con $\rho_A = (\sigma_A / abG)^2$. ρ_A es una densidad de dislocaciones equivalente producto de la tensión externa, y C es un parámetro de ajuste.

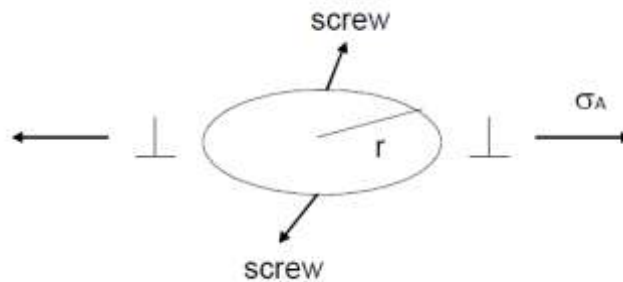


Figura 5. Esquema de cómo se generan los loops de dislocaciones durante el creep

Para evaluar el término WH_{creep} asumimos que la deformación durante el creep se produce por un aumento en el número de loops de dislocaciones, como los que se muestran en la Figura 5 [3]. El tamaño de los loops depende

únicamente de la tensión aplicada y de la densidad total de dislocaciones (las del material original+las producidas durante la pre-deformación) $r = L(\sigma_A) / \sqrt{\rho_{tot}}$ [3]. El aumento en la densidad de dislocaciones debido a la generación de N nuevos loops viene dada por $\Delta\rho = 2.\pi.r.N$. Por su parte estos nuevos loops producen una deformación por creep igual a $\Delta\varepsilon = \frac{b.\pi.r^2}{m}.N$, donde m es el factor de Taylor (~ 3). Combinando estas dos últimas ecuaciones, podemos estimar el aumento en la densidad de dislocaciones producto de la deformación por creep como $\Delta\rho = \frac{2m}{b.r}\Delta\varepsilon$. Luego, la velocidad de generación de nuevas dislocaciones viene dado por:

$$WH_{creep} = 2.m \frac{\sqrt{\rho_{tot}}}{b.L(\sigma_A)} \dot{\varepsilon}_{creep} \quad (6)$$

Esta expresión permite evaluar WH_{creep} como función de la velocidad de deformación por creep $\dot{\varepsilon}_{creep}$.

Para estimar la contribución del término de creep (Ec.(6)) a la cinética de recuperación de la Figura 2, primero calculamos la curva de creep a 600°C en un material pre-deformado un 6% para los distintas tensiones de interés. Este cálculo se hizo usando la Ec.(2) con los parámetros de la Tabla 1. En la Figura 6 se presentan los resultados.

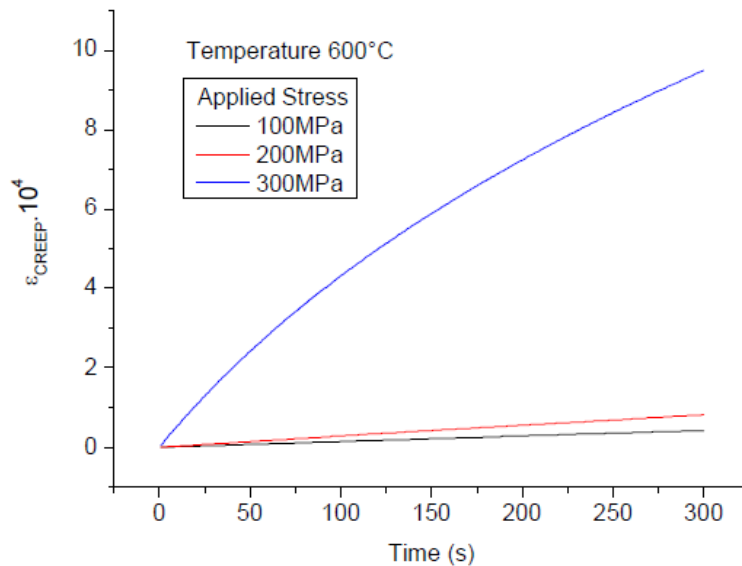


Figura 6. Predicción de la cinética de creep para un material deformado al 6% a partir de la Ec.(2).

Claramente a 100 y 200MPa el material casi no sufre deformación por creep para los tiempos de interés. Recién para 300MPa se ven deformaciones cercanas al 0.1%. Por lo tanto, es de esperar que el efecto del creep en la cinética de recuperación sea sólo visible a grandes tensiones. A partir de las curvas de creep de la Figura 6 se evaluó el término WH_{creep} para las temperaturas reportadas en la Figura 2. Se insertó este término en la Ec.(5) y se ajustó el valor de C para tener un buen ajuste de la expresión con los resultados experimentales de la Figura 2. El valor óptimo de C resultó ser $0.12m^2$. Las líneas en esta figura corresponden al modelo ajustado. Por último, es interesante analizar el peso que tienen las dos contribuciones, creep y movilidad, al balance de la densidad de dislocaciones. En la Figura 7 presentamos un cálculo de la fracción recuperada con y sin tener en cuenta el término WH_{creep} . Las líneas llenas corresponden a considerarlo mientras que las de puntos cuando se lo deja de lado. Evidentemente a 100 y 200MPa el peso de este término es despreciable. Por su parte, para 300MPa hay una diferencia chica y sólo a grandes tiempos.

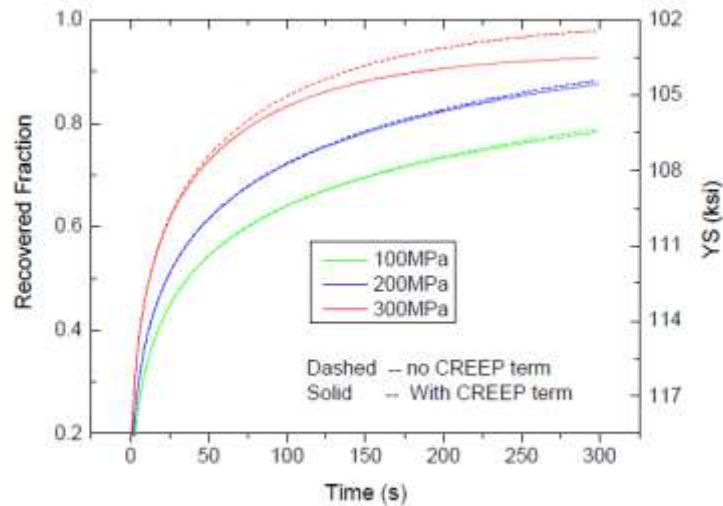


Figura 7. Predicción de la Ec.(5) considerando y sin considerar el término de creep.

5. CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos de recuperación bajo tensión en un acero martensítico revenido. Se vio que la cinética de recuperación es acelerada por la tensión elástica, siendo su efecto acelerador mayor a medida que la tensión crece. Se asoció ese aumento con un aumento en la movilidad de las dislocaciones, y se mostró a través de cálculos con un modelo simple que el endurecimiento por creep es despreciable para bajas tensiones y tienen un efecto chico a altas tensiones.

REFERENCIAS

1. F. J. Humphrey, M. Hatherly, "Recrystallization and related annealing phenomena", 2004, 2da Ed., Elsevier.
2. Hull D., Bacon D. J., "Introduction to dislocations", 1984, Oxford: Pergamon Press.
3. P. Ostrom y R. Lagneborg, "A dislocation link length Model for creep" ;Res. Mecánica, Vol 1, (1980), p 59-79.
4. M.A. Vicente Alvarez, M. Marchena, T. Perez, "Recovery Kinetics of Cold-Deformed Cr-Mo Steels", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol 39A, (2008), p. 3283-3290.
5. Meyers and Chawla, in "Mechanical Metallurgy principles and applications", 1984, Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
6. N. D. Batsoulas, "Review Mathematic description of the mechanical behaviour of metallic materials under creep conditions", Journal of Materials Science, Vol 32 (1997), p. 2511-2527.
7. F. Povolo, A.J. Marzocca, "Creep of cold-worked Zry-4 at 673 K", Journal of Nuclear Materials, Vol 97, (1981), p. 323-332.
8. Osgerby, Dyson, "Physically based modelling of stress relaxation in superalloys and ferritic steels " en "Performance of bolting materials in high temperatura plant applications", pp. 362.