

ENSAYOS DE CREEP POR TORSIÓN Y TRACCIÓN

TORSION AND TENSION CREEP TESTS

Daniela Alessio¹, Sandra Robles¹, Lilian Moro², René Molina²

(1) Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería, Av. Alem 1253, Bahía Blanca - Argentina

(2) Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, Departamento de Mecánica, Montevideo 340, Bahía Blanca – Argentina

(e-mail: ingsandrarobles@gmail.com)

Recibido: 23/02/2017 - Evaluado: 26/04/2017 - Aceptado: 03/07/2017

RESUMEN

En este estudio se efectúa el análisis de dos metodologías de ensayo para evaluar el comportamiento de un material al creep o fluencia por activación térmica o termofluencia. Se realizaron en laboratorio dos tipos de ensayos, por torsión y por tracción, bajo combinaciones de temperatura y tensión comparables, de un acero austenítico, de uso habitual en los equipos de la industria petroquímica de la región. Con los registros adquiridos, se graficaron las diferentes curvas deformación-tiempo del material. Se presenta el análisis del estado estacionario de creep a través de la ley de potencia de Norton. Se observa que, aunque los ensayos por torsión presentan una velocidad de deformación mayor que los ensayos de tracción, los parámetros característicos de creep, el factor de tensión n y la energía de activación térmica Q , no se ven afectados, resultando independientes de la técnica de ensayo.

ABSTRACT

In this study the analysis of two test methodologies is carried out to evaluate the creep behavior of a material or creep by thermal activation. Two tests types, torsion and tensile, of an austenitic steel commonly used in petrochemical equipment in the region, under comparable temperature and stress conditions were carried out in the laboratory. With the acquired records, deformation-time curves of the material were plotted. The steady-state analysis of creep through the Norton power law is presented. It is observed that, although the torsion tests have a deformation n rate greater than the tensile tests, the characteristic parameters of creep, the tension factor n and the thermal activation energy Q are not affected, being independent of the test type.

Palabras clave: termofluencia, ensayo de torsión, ensayo de tracción, aceros austeníticos

Keywords: creep, torsion test, tensile test, austenitic steels

INTRODUCCIÓN

Los equipos de una planta industrial pueden fallar entre otras causas por excesiva deformación plástica y/o por degradación progresiva de sus materiales. Tal es el caso de las plantas petroquímicas donde algunos equipos, por ejemplo los hornos de pirolisis, se exponen a temperaturas elevadas, medio ambiente agresivo y estados de sollicitación que dan origen a diferentes mecanismos de daño que conllevan a una reducción significativa de su vida útil (Bonaccorsi *et al.*, 2014; Otegui *et al.*, 2015). Entre los fenómenos críticos que afectan la integridad de los componentes es de interés en este estudio, la termofluencia o creep. En este fenómeno, a medida que transcurre el tiempo, a una temperatura superior a 0,3 a 0,6 de la temperatura de fusión del material y a tensiones menores al límite elástico, se produce una deformación progresiva del elemento y la pérdida de la resistencia mecánica del material, que se evidencia con transformaciones en la microestructura (Evans & Wilshire, 1993).

Los ensayos mecánicos del material tienen un rol importante al momento de comprender el comportamiento del acero en estudio y su probable aplicabilidad en una determinada condición. Comúnmente las pruebas de termofluencia de laboratorio, se realizan manteniendo una probeta del material, a una carga aplicada y temperatura constantes durante un período de tiempo, registrándose las deformaciones en función del tiempo (Evans & Wilshire, 1993). El efecto de mantener una carga constante durante toda la duración de un ensayo tiene como consecuencia que la tensión efectiva aumenta uniformemente con la deformación acumulada. Y, por lo tanto, estos datos no representarían el comportamiento del material en forma independiente a la geometría de la muestra de ensayo. En cambio, la información de fluencia bajo condiciones de tensión constante, permite superar este inconveniente. Generalmente, el método experimental para el estudio del comportamiento mecánico de un material, se lleva a cabo con una máquina de tracción (Zhang *et al.*, 2017). Pero tiene limitaciones derivadas de valores de deformación restringida, el estrangulamiento que se genera por deformación, casi en la mitad de la probeta, que conlleva a una variación del volumen en la zona calibrada (Stouffer & Dame, 1996), así como alcanzar un estado de tensión uniaxial. Por otra parte se podrían realizar ensayos de torsión en caliente para el estudio de creep, en los que se establecen condiciones de tensión constante utilizando mecanismos simples. Estos ensayos, son comúnmente utilizados para evaluar el comportamiento a la fluencia de los materiales de aplicación en procesos industriales como forjado, extrusión o rolado, donde el comportamiento plástico de los materiales dúctiles es muy importante. Esto es debido a que grandes deformaciones se pueden imponer fácilmente debido a la estabilidad geométrica y mecánica de la prueba (Grote & Antonsson, 2009). En contrapartida, en este tipo de ensayo la distribución en el volumen de la tensión, la deformación y la velocidad de deformación, no son uniformes. Para minimizar este inconveniente como así también, las inestabilidades que se podrían producir en las condiciones de borde impuestas por las mordazas de sujeción se utilizan probetas de pequeño tamaño, sección y longitud (Nagode *et al.*, 2011; Patil & Gore, 2013).

Para que los resultados obtenidos mediante los ensayos de creep por torsión sean comparables con los de ensayos de creep por tracción uniaxial, se relaciona la tensión de corte y la deformación angular con la tensión y deformación equivalente, respectivamente, aplicando el criterio de fluencia de Von Mises (Dieter, 2014).

Con el objeto de comparar ambas metodologías de ensayo, se presenta en este trabajo el análisis del estado estacionario de creep a través de la ley de potencia de Norton (Ghatak & Robi, 2015). Para ello, se ensayaron probetas de un acero de la serie HP (Drotlew *et al.*, 2012), de uso habitual en la industria petroquímica de la región, en condiciones comparables de temperatura y tensión, adecuando la carga externa aplicada a la geometría de las probetas y a la metodología de aplicación de la carga.

METODOLOGÍA

La máquina para realizar el ensayo de creep por torsión, consiste en un eje horizontal que tiene en uno de sus extremos una polea ranurada relacionada a la carga y a la medición del ángulo de giro. El otro extremo acopla la probeta a ensayar dentro del horno (Fig. 1a); lo complementan un controlador de temperatura para realizar el

registro obtenido con una termocupla de cromel-alumel ubicada en la zona media de la probeta, y un adquisidor de datos con codificador, para los ángulos de torsión generados y los tiempos en los que se producen los mismos.

La máquina de ensayo de creep por tracción (Molina *et al.*, 2009), está formado por una barra principal apoyada en un extremo a un amortiguador regulable y, en el otro, posee una leva circular de radio constante (Fig. 1b). De la barra principal cuelga un peso, de trazabilidad controlada, que se desplaza a lo largo de la misma, permitiendo modificar la distancia al centro de rotación y así lograr la tensión que se desea aplicar. La máquina tiene anexado un horno eléctrico, donde el control de la temperatura se efectúa por medio de una termocupla de cromel-alumel cuyo extremo caliente se ubica sobre la superficie de la zona central calibrada de la probeta. Se mide la deformación de la zona calibrada de la probeta por medio de dos transductores de desplazamiento lineal (LVDT) Marca Solartron, que producen una señal adquirida por un sistema analógico-digital.



Fig. 1: Máquinas de ensayo de creep por: a) torsión b) tracción.

Las probetas utilizadas para los ensayos de torsión (Fig. 2a) tienen una longitud calibrada de 7 mm y un radio de 3,5 mm (Patil & Gore, 2013; Divo Bressan & Kirchhof Unfer, 2006). Los estudios de tracción se efectúan con probetas (Fig. 2b), cuyas dimensiones y geometría responden a la norma ASTM E139-06. La probeta tiene dos salientes al finalizar la zona calibrada, donde se sujetan los elementos de medición.

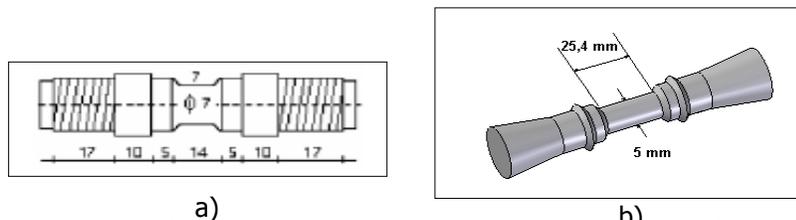


Fig. 2: Geometría y dimensiones de las probetas [mm]: (a) de torsión (b) de tracción

Para evaluar el material se realizaron ensayos a tracción y a torsión, en condiciones isotérmicas (1173, 1193, 1223 y 1253K) a tensiones de 50, 60, 65 y 70 MPa. Los datos obtenidos se representaron según curvas que responden a la formulación de Norton (Evans & Wilshire, 1993; Ghatak & Robi, 2015).

Las muestras para las metalografías, fueron extraídas de la parte central o útil y del extremo de apoyo de las probetas ensayadas. Estas se desbastaron, pulieron y atacaron químicamente para el revelado de la microestructura con el reactivo Glicerregia (10 ml de HNO₃, 35 ml de HCl y 30 ml de glicerina).

Se realizaron observaciones metalográficas de la microestructura del material en condición de colada y ensayado con ambas metodologías. Se dispone de un microscopio de platina invertida para aplicaciones de metalografía y

control de materiales industriales marca Leica DM ILM, equipado con una máquina fotográfica digital de la misma marca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización del material en estudio, en la condición de recepción, se realiza a través de la composición química obtenida con un espectrómetro de emisión por plasma marca Spectromax modelo X, Tabla 1, y la observación de la microestructura (Fig. 3). Se observa en la misma una matriz austenítica con presencia de un eutéctico interdendrítico formado por carburos de cromo ($M_{23}C_6$ y M_7C_3) y de niobio (MC).

Tabla 1: Composición (% en peso) del acero HP aleado con Nb en la condición de recepción

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Ti	Mo	Fe
HP con Nb	0,6	1,8	2	25	35	1,34	-	0,5	Bal.

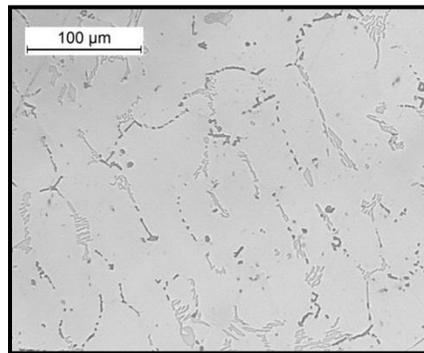


Fig. 3: Microestructura característica del acero HP modificado

Una vez ensayado el material a diferentes tensiones y temperaturas, se repitieron las observaciones de la microestructura. Por ejemplo, se observa el engrosamiento de los carburos de Cr en borde de grano y que el tamaño de grano en la probeta metalográfica correspondiente al ensayo de tracción es mayor que en el caso del ensayo a torsión (Fig. 4). Esto último concuerda con la observación de mayores tiempos para los ensayos de tracción respecto de los de torsión, para desarrollar deformaciones específicas semejantes. Del procesamiento de las fotomicrografías utilizando el programa de análisis de imágenes Material Plus 4.2, se obtuvo que el tamaño promedio aproximado de los granos en torsión es de 64 x 30 micrones con un perímetro de 195 micrones y, en tracción, de 80 x 60 micrones y su perímetro, 256 micrones.

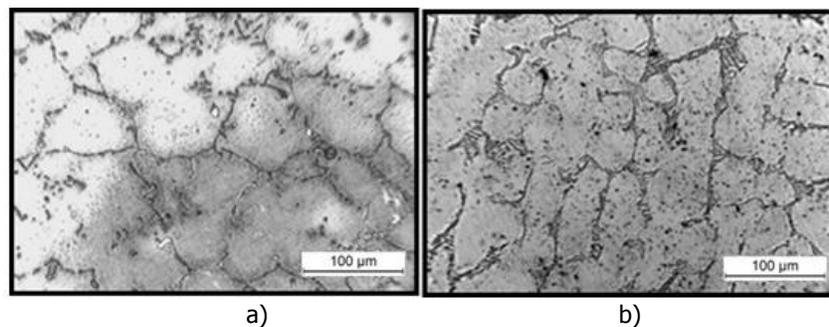


Fig. 4: Microestructura del acero HP ensayado a 1173K y a 60 Mpa. (a) de tracción (b) de torsión

Los datos derivados de los ensayos de creep por torsión y por tracción se trasladaron a gráficas de deformación específica en función del tiempo, por ejemplo, como la que se muestra a continuación a una temperatura de ensayo de 1173K (Fig. 5) (Niu *et al.*, 2002; Yao *et al.*, 2007). Se observa que para alcanzar, en ambos ensayos, deformaciones específicas similares, los de torsión requieren menores tiempos.

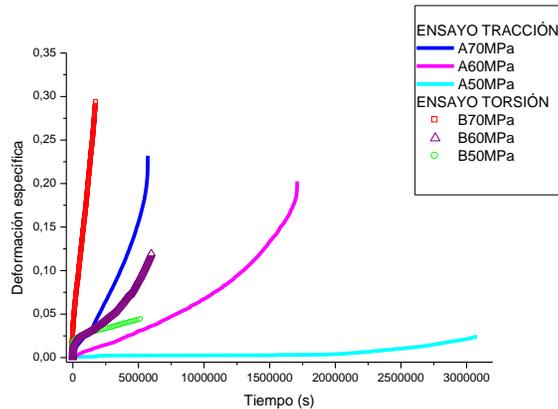


Fig. 5: Curvas de creep a la temperatura de 1173K y tensiones entre 50 a 70 MPa - Ensayos de Torsión y Tracción

A partir de las gráficas de creep (Fig. 5), se obtiene la pendiente de la curva en el estadio de creep secundario (estado estacionario), que representa la velocidad de deformación en esa zona. En la Tabla 2 se presentan los valores a una temperatura de 1173K.

Tabla 2: Velocidad de deformación en la etapa secundaria. Temperatura de ensayo 1173K

Tensión (MPa)	Velocidad de deformación	
	Creep por Torsión	Creep por Tracción
50	6,08E-8	1,16E-8
60	1,07E-7	6,59E-8
70	1,46E-6	2,27E-7

A partir de la relación empírica, ley de potencia de Norton (ec.1) (Yao *et al.*, 2007), que vincula la velocidad de deformación en la etapa de creep secundario $\dot{\epsilon}$, con la tensión equivalente σ y la temperatura absoluta aplicada T , se calcula la energía de activación térmica Q y el exponente de tensión n .

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \tag{1}$$

Siendo, A una constante función de la estructura del material y R la constante Universal de los Gases.

A partir del ajuste lineal de los valores de la velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$ en función de la tensión σ , a una dada temperatura de ensayo, se relaciona el valor de la pendiente de la recta de ajuste con el exponente de tensión n , como por ejemplo se muestra en la (Fig. 6).

De igual forma se obtuvo la energía de activación, a partir de los datos registrados en los ensayos de creep realizados a una misma tensión, graficando la velocidad de deformación en función de la inversa de la temperatura. En la Tabla 3, se muestran los valores hallados de la energía de activación Q para una tensión de 60 MPa y del exponente de tensión n para una temperatura de 1173K, con ambas metodologías de ensayo.

Los valores de la energía de activación y del exponente de tensión, hallados en este trabajo, concuerdan con los informados en la literatura, para aceros del tipo HP (Voicu *et al.*, 2009; Ghatak & Robi, 2015).

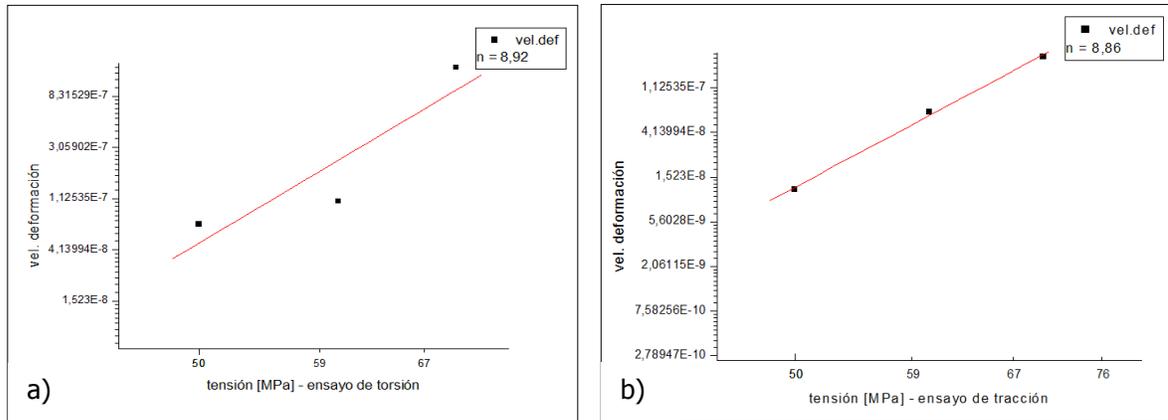


Fig. 6: Determinación del exponente de tensión n a 1173K y tensiones entre 50 a 70 MPa (a) torsión, (b) tracción

Tabla 3: Valores de la energía de activación y del exponente de tensión para los ensayos de torsión y tracción

Parámetros de creep	Torsión	Tracción
Energía de activación Q [KJ/mol]	543	553
Exponente de tensión n	8,92	8,86

Cabe observar, que tanto la energía de activación Q , como el valor del exponente de tensión n , son semejantes. Demostrando así, que éstos son definidos por el material y no dependen de la metodología de ensayo empleada para su determinación.

CONCLUSIONES

De los estudios realizados se observa que:

- Los ensayos de creep realizados bajo las mismas condiciones de temperatura y tensión equivalente, con la máquina de ensayo de torsión, debido al tipo y distribución de las tensiones que se generan en la probeta, presentan una velocidad de deformación mayor que los ensayos de tracción. Es decir, los valores de deformación específica a determinada tensión y temperatura se alcanzan en tiempos menores. En consecuencia las velocidades de deformación obtenidas en el estadio secundario, también son diferentes y superiores para los casos de torsión.
- A pesar de estas diferencias, se comprueba que los parámetros que definen al material, n y Q , son independientes de la técnica de ensayo.
- Los ensayos de creep por torsión, aunque no son los más utilizados, tienen un requerimiento de equipamiento menos complejo y los ensayos son de menor duración; consideración ventajosa cuando el número de probetas es importante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación al Departamento de Ingeniería, al Laboratorio de Metalurgia y a la SGCyT, de la Universidad Nacional del Sur, y al Departamento de Mecánica de la Facultad Regional Bahía Blanca de la UTN.

REFERENCIAS

1. Bonaccorsi, L., Guglielmino, E., Pino, R., Servetto, C. & Sili, A. (2014). Damage analysis in Fe-Cr-Ni centrifugally cast alloy tubes for reforming furnaces. *Engineering Failure Analysis*, 36, 65-74.
2. Dieter, G. (2014). *Mechanical Metallurgy* (3^o ed.). New York. Mc Graw Hill Education.
3. Divo Bressan, J. & Kirchhof Unfer, R. (2006). Construction and validation tests of a torsion test machine. *Journal of Materials Processing Technology*, 179, 23–29.
4. Drotlew, A., Garbiak, M. & Piekarski, B. (2012). Cast Steels for Creep-resistant Parts Used in Heat Treatment Plants. *Archives of Foundry Engineering*, 12 (4), 31-38.
5. Evans, R.W. & Wilshire B. (1993). *Introduction to Creep*. London-England: The Institute of Metals.
6. Ghatak, A. & Robi P.S. (2015). A comparative study of constitutive equations for the creep deformation of HP40Nb micro-alloyed steel. *Materials Science & Engineering A*, 648, 418–427.
7. Grote, K.H. & Antonsson, E.K. (2009). *Springer Handbook of Mechanical Engineering - California Institute of Technology* (CALTEC), Pasadena (CA) - USA: Springer.
8. Molina, R., Piovan, T., Moro, L. & Iurman, L. (2009); *Diseño de una máquina para ensayos termofluencia por tracción*. Proceedings del 9no Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales (SAM-CONAMET) y Primeras Jornadas Internacionales de Materiales Nucleares, 3 (1233-1239).
9. Nagode, A., Kosec, L. & Ule, B. (2011). Uni-axial and multi-axial creep behavior of P91-type steel under constant load. *Engineering Failure Analysis*, 18, 61-67.
10. Niu, L.B., Kobayashi, M. & Takaku, H. (2002). Creep Rupture Properties of an Austenitic Steel with High Ductility under Multi-axial Stresses. *ISIJ International*, 42 (10), 1156-1161.
11. Otegui, J.L., De Bona, J. & Fazzini, P.G. (2015). Effect of coking in massive failure of tubes in an ethylene cracking furnace. *Engineering Failure Analysis*, 48, 201–209.
12. Patil, R.D. & Gore, P.N. (2013). Review the Effect of Specimen Geometry on Torsion Test Results. *Int. J. Innovation Res. Sci., Eng. and Technol.*, 2 (12), 7567-7574.
13. Stouffer, D.C. & Dame, L.T. (1996). *Elastic Deformation of Metals: Models, Mechanical Properties, and Metallurgy*. New York: J. Wiley & Sons.
14. Voicu, R., Lacaze, J, Andrieu, E., Poquillon D. & Furtado, J. (2009). Creep and tensile behaviour of austenitic Fe–Cr–Ni stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, 510–511, 185–189.
15. Yao, H.T., Xuang, F.Z., Wang, Z. & Tu, S.T. (2007). A Review of Creep Analysis and Design under Multi-Axial Stress States. *Nuclear Engineering and Design*, 237, 1969-1986.
16. Zhang, Z., Hu, Z., Tu, H., Schmauder, S. & Wu, G. (2017). Microstructure evolution in HR3C austenitic steel during long-term creep at 650°C. *Materials Science & Engineering A*, 681, 74-84.

