

Evaluación de la velocidad de creep en aleaciones resistentes a altas temperaturas

Evaluation of creep rate in high-temperature resistant alloy

Presentación: 30/10/2024

Gabriel González

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca
ggonzal@frbb.utn.edu.ar

Roger Moscovakis

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca
moscovakisroger@gmail.com

Jonathan Micael Resch

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca
jonathanresch3@gmail.com

Juana Pochon

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca
Juanapochon2015@gmail.com

Gerardo Pender

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca
gpender@frbb.utn.edu.ar

Resumen

Cuando los componentes de una planta industrial se encuentran sometidos a condiciones severas de temperatura y esfuerzos mecánicos, sufren una deformación plástica que continua a lo largo del tiempo. Este proceso, denominado termofluencia (creep), se presenta en industrias petroquímicas, plantas generadoras de energía y refinerías de petróleo, donde sus componentes son utilizados durante largos períodos de tiempo y expuestos a condiciones rigurosas de servicio. El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento al creep de aleaciones de alto contenido de níquel ((Incoloy 800 (30 Ni – 20 Cr), Inconel 601 (60 Ni – 25 Cr) y aleación HP modificada con niobio (25 Cr – 35 Ni) que poseen, alta resistencia termomecánica asociada a la microestructura interna de la matriz. Se analiza la variación de la velocidad de deformación con la tensión aplicada y la temperatura; simultáneamente se caracteriza la evolución microestructural.

En forma experimental, mediante ensayos de creep, se reproducirán condiciones de ensayo en el laboratorio, de características similares a las de operación en servicio. Las curvas experimentales obtenidas de esta forma, nos van a permitir conocer la variación de las propiedades físicas y mecánicas; estudiar los mecanismos responsables del fenómeno y describir parámetros que estén vinculados con la resistencia mecánica del material.

Palabras clave: Velocidad de deformación, termofluencia, aleaciones resistentes, ensayos de creep.

Abstract

When the components of an industrial plant are subjected to severe temperature and mechanical stress conditions, they suffer from a plastic deformation that continues over time. This process, known as creep, occurs

in petrochemical industries, power generation plants, and oil refineries, where components are used for long periods and exposed to severe service conditions. The objective of this work is to study the creep behavior of nickel high content alloys (Incoloy 800 (30 Ni – 20 Cr), Inconel 601 (60 Ni – 25 Cr), and HP series steels (25 Cr – 35 Ni)) that possess high thermomechanical resistance associated with the internal microstructure of the matrix. The variation of the deformation rate with applied stress and temperature is analyzed; simultaneously, the microstructural evolution is characterized under conditions of temperature and time similar to those in the tests.

Experimentally, through creep tests, laboratory conditions similar to service operation conditions will be reproduced. The experimental curves obtained in this way will allow us to understand the variation of physical and mechanical properties, study the mechanisms responsible for the phenomenon, and describe parameters related to the material's mechanical strength.

Keywords: Deformation rate, creep, high- temperature resistant alloys, creep tests.

Introducción

La termofluencia, o creep, es el proceso de deformación lenta y continua de un material cuando se encuentra sometido a una carga constante a lo largo del tiempo, especialmente bajo condiciones de alta temperatura (Callister & Rethwisch, 2018). El estudio de la misma adquiere aún mayor importancia, cuando los materiales afectados son aceros destinados a industrias petroquímicas, plantas generadoras de energía y refinerías de petróleo, ya que sus componentes son utilizados durante largos períodos de tiempo y expuestos a condiciones severas de servicio (Klueh & Harries, 2001). La significancia que tiene la comprensión del comportamiento de los materiales para el diseño industrial se debe principalmente al alto costo que representa para las industrias la rotura de sus equipos, problema que puede ser solucionado cuando se realiza una correcta selección del material (Dowling, 2013).

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento al creep de aleaciones de alto contenido de níquel que poseen alta resistencia termomecánica asociada a la microestructura (Pint et al., 2013). Se analiza la variación de la velocidad de deformación en función de la temperatura y la tensión aplicada; simultáneamente se caracteriza la evolución microestructural, en las condiciones de temperatura y tiempo de los ensayos (Shankar et al., 2001).

Desarrollo

Los ensayos de creep, han sido realizados a 3 materiales diferentes: aleaciones de alto contenido de Ni, Incoloy 800 (30 Ni – 20 Cr), Inconel 601 (60 Ni – 25 Cr) y HP modificado (25 Cr – 35 Ni), el resultado de los mismos permite observar la influencia sobre la resistencia al creep de la composición química y de la evolución microestructural. Las aleaciones de Níquel presentan una microestructura constituida por una matriz formada por una solución sólida FCC (fase γ) y un disperso de precipitados intermetálicos (fase γ') que son los responsables de su gran resistencia. En particular el HP modificado se utiliza ampliamente en las industrias petroquímicas de la región de Bahía Blanca, para construir los hornos de pirólisis, porque presentan resistencia a la termofluencia gracias a la estabilidad de las fases que lo componen (Alessio D, 2012).

En la Tabla 1 puede observarse la composición química de los materiales en cuestión, verificada con un espectrómetro de emisión por plasma, marca Spectromax modelo X, se presentan los elementos componentes y los valores medidos de las concentraciones (% en peso) del material.

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo	Fe	Al	Ti
HP - mod.	0.60	1.8	2.0	25	35	1.34	0.5	Bal.	--	--
INCOLOY	0,006	--	--	20,1	30,9	--	--	46,2	0,53	1,04
INCONEL	0,03	0,12	0,20	21,94	58,5	--	--	17,39	--	0,30

Tabla 1: composiciones químicas

El equipo para realizar los ensayos de creep fue diseñado y construido íntegramente en la FRBB, por personal del Grupo de Estudio de Materiales (GEMAT). Consta de un sistema de tres máquinas, de igual diseño, que someten al material bajo ensayo a tensión y temperatura constantes, manteniendo la independencia de funcionamiento de cada una de ellas con la particularidad de estar controlado por un único sistema de adquisición y software específico (Gonzales. G 2018).

Los ensayos se realizaron respetando las condiciones de la norma (ASTM E139-11, 2018). Para obtener los resultados se realizaron 6 (seis) ensayos, 2 (dos) por material, a distintas temperaturas de trabajo y a una misma tensión. Las probetas se obtuvieron de materiales en estado de recepción. En el caso de las superaleaciones Inconel e Incoloy se parte de barras laminadas en frío y posteriormente recocidas, mientras que la aleación HP ha sido fabricada por fundición. Se ha calculado el valor n de tensión graficando la velocidad de deformación, en función de la tensión σ .

Se realizaron los ensayos de creep sobre los tres materiales a una tensión de 110 MPa y a temperaturas de 750 °C y 800 °C (figura 1) para evaluar cómo responde a temperaturas límites de trabajo.

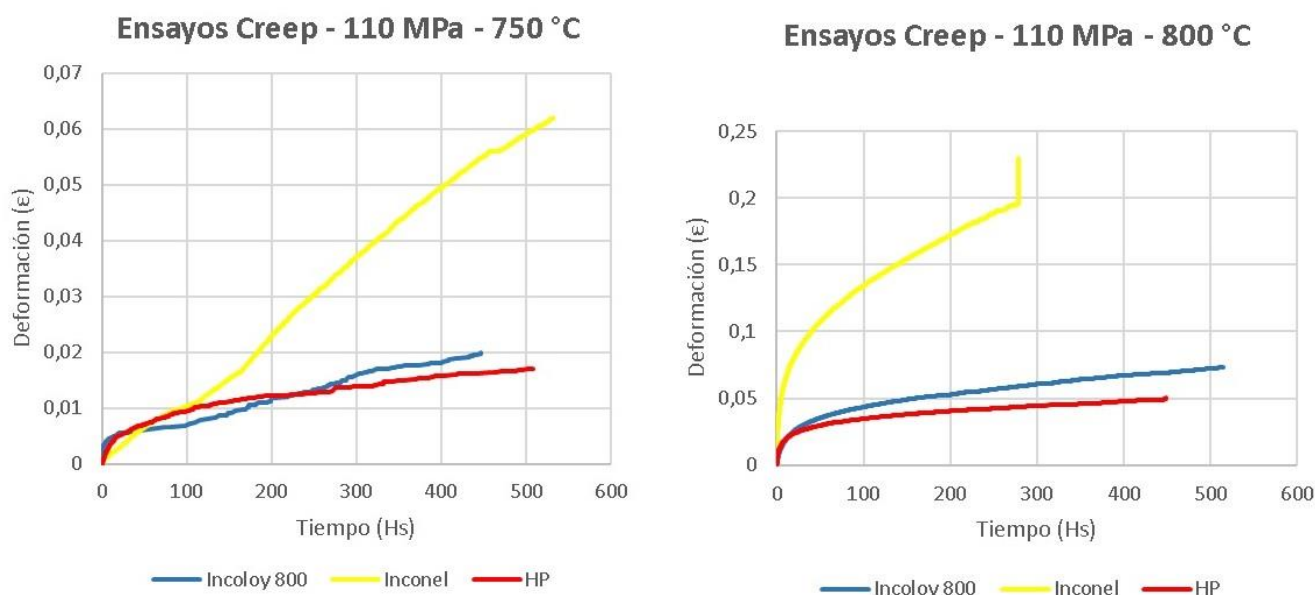


Figura 1: Gráficas Deformación-Tiempo

Como resultado de los ensayos se calcula la velocidad de deformación de la etapa secundaria, que se basa en identificar el período lineal en la curva de creep y calcular la pendiente de esa sección, lo que permite evaluar la

resistencia al creep del material bajo las condiciones específicas del ensayo, la cual se vincula con la temperatura y la tensión aplicadas. Este cálculo se realiza a partir de la ecuación empírica o ley de potencias (Callister & Rethwisch, 2018; Dieter, 1986; ASTM E139-11 (2018); Monkman & Grant, 1956; Shankar, Rao, & Mannan, 2001) que se expresa como:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n e^{-Q/RT} \quad (1)$$

donde:

$\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación equivalente, A una constante función de la estructura, n el exponente de tensión, Q la energía de activación del creep, R la constante universal de los gases T la temperatura absoluta. El coeficiente de tensión σ es un parámetro que está relacionado con la resistencia al creep de cada material originada por la acumulación de dislocaciones en imperfecciones o en bordes de grano.

En la Tabla 2 se observa la tasa de variación de la deformación en los materiales ensayados, en ellas se evidencia que, a medida que la temperatura aumenta de 750 °C a 800 °C, hay un incremento general en la velocidad de deformación para el HP y el Inconel. Esto es consistente con la tendencia típica de que la deformación por creep aumenta con la temperatura, ya que los materiales tienden a deformarse más rápidamente a temperaturas más elevadas (Dieter, 1986; Dowling, 2013).

Sin embargo, el Incoloy presenta un comportamiento anómalo, dónde la velocidad de deformación es mayor a 750 °C que a 800 °C, lo que podría ser atribuido a varios factores, como cambios en la microestructura del material a diferentes temperaturas (Pint et al., 2013), efectos de la dureza en el comportamiento del creep (Shankar et al., 2001).

ALEACIÓN	750°C	800°C
HP	2.87E-05	4.77E-05
INCONEL	1.27E-04	5.36E-04
INCOLOY	3.78E-05	1.01E-04

Tabla 2: Velocidades de deformación

Ensayos de microdureza

El ensayo de microdureza se realizó con un durómetro FUTURE TECH FM 300, con una carga de 200 gramos, según Norma IRAM U 500-110, sobre las probetas de referencia. Los resultados luego de los ensayos de muestran en la tabla 3, con la equivalencia a dureza Rockwell.

ALEACIÓN	Dureza a 750 °		Dureza a 800°C	
	HV	HRB	HV	HRB
HP	214	96	231	99
INCONEL	183	90	192	91
INCOLOY	183	90	175	88

Tabla 3: Valores de microdureza

En general, una mayor dureza tiende a asociarse con una menor velocidad de deformación. Esto es consistente con la teoría de que los materiales más duros resisten mejor el creep debido a su estructura más rígida (Dieter, 1986; Dowling, 2013)).

Si bien existen diferencias en los valores de microdureza, mostrando en algunos casos un incremento con la temperatura, la equivalencia de valores llevados a dureza Rockwell, demuestran que los mismos no resultan significativos para establecer una diferencia en el comportamiento. Otros aspectos, como la microestructura del material, pueden jugar un papel crucial (Pint et al., 2013; Shankar et al., 2001).

Análisis metalográfico

La observación microscópica se realizó empleando probetas metalografías extraídas de los materiales en estado de recepción (figura 2) y de especímenes de creep (figura 3). Las mismas fueron pulidas mecánicamente con lijas al agua de granulometría 240, 360, 400, 500, 600 y 1000, posteriormente el pulido final con paño sintético y alúmina grados 1 y 2 (Lloyd, 1991; Haines, 2000). El reactivo empleado para revelar la microestructura ha sido Glicerregia (10 ml de HNO_3 , 35 ml de HCl y 30 ml de glicerina) (Callister & Rethwisch, 2018). Para la obtención de las micrografías se utilizó un microscopio metalográfico Leica MC 120 (Smith 2007).

En las micrografías siguientes se muestra la microestructura de los materiales, en estado de recepción, donde se observa que el Inconel 601 presenta una matriz de granos deformados de solución sólida gamma, con precipitados de carburos complejos (Micrografías N°1 y 4), el Incoloy 800 una matriz de granos equiaxiales de solución sólida gamma, con presencia de maclas en el seno de los mismos y un disperso de carburos complejos (Micrografías N°2 y 5) y el HP modificado, una estructura dendrítica de granos de solución sólida gamma, con precipitados complejos interdendríticos (Micrografías N°3 y 6).

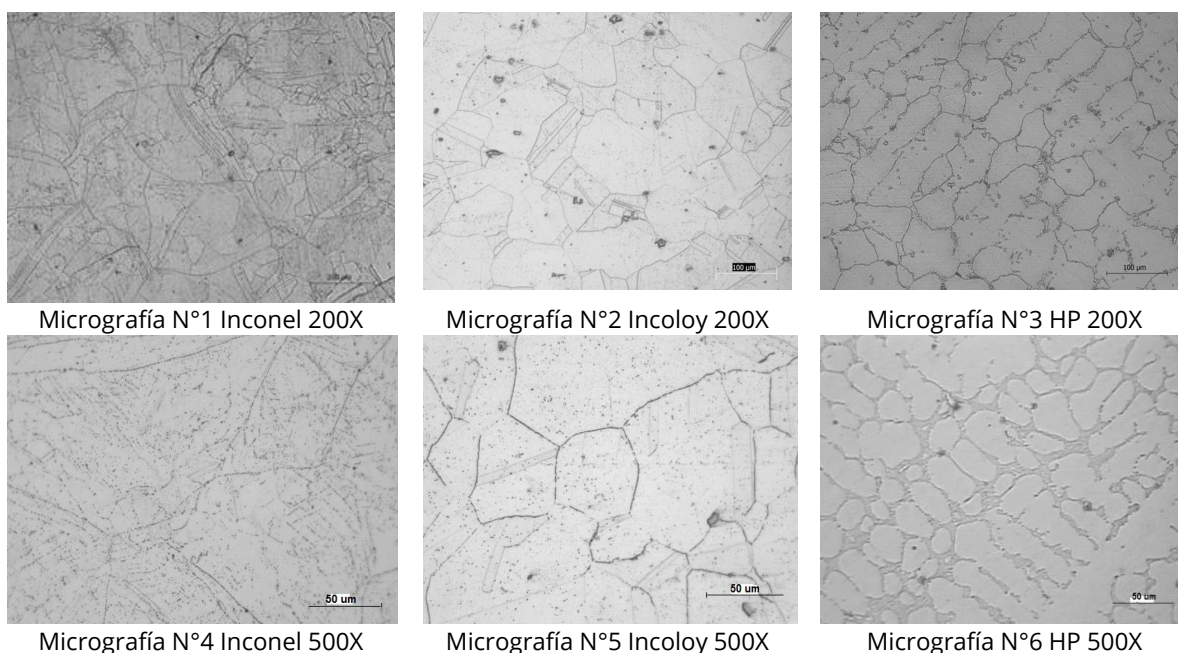


Figura 2: Microestructura de los materiales en estado de recepción.

Luego de los ensayos de creep se verifican cambios estructurales los cuales inciden en el comportamiento mecánico. Así se observa tanto en el Inconel como en el Incoloy una masiva precipitación de carburos, tanto en el seno como en el borde de los granos, con coalescencia de los mismos, bajo las distintas tensiones y temperaturas de ensayos, sin modificación aparente en el tamaño de grano (Micrografías N° 7, 8, 10 y 11). En el caso del HP no se verifica una masiva precipitación de carburos ni alteración en el tamaño de grano (micrografías N°9 y 12).

El empleo de microscopía óptica no resulta suficiente para evaluar modificaciones microestructurales que justifiquen con claridad las diferencias en el comportamiento mecánico, por lo tanto, debe contemplarse para futuras investigaciones la utilización de microscopía electrónica.

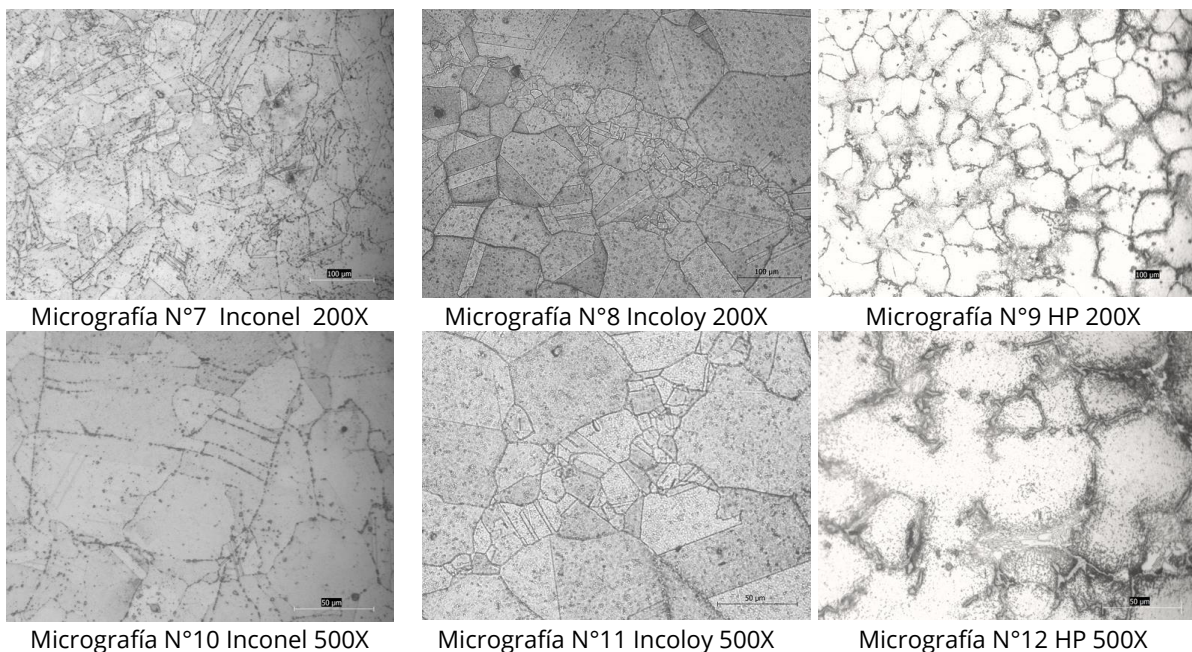


Figura 3: Microestructura de los materiales a 110 Mpa y 750°C

Conclusiones

A la tensión de referencia y bajo las dos temperaturas analizadas se infiere que las aleaciones Incoloy y Hp demuestran el mejor comportamiento al creep, siendo las más aptas bajo estas condiciones de servicio. Se puede visualizar que un incremento de 50°C en la temperatura de ensayo provoca un incremento en la velocidad de deformación secundaria del 50 %.

Es excelente la conducta del HP considerando la diferencia en el tipo y contenido de los elementos aleantes, respecto a los otros materiales.

En el inconel, se puede observar que el incremento de la velocidad de deformación muestra que esta aleación no es apta para trabajar en ese rango de valores.

En los ensayos de incoloy y HP la velocidad de deformación están de acuerdo con valores que han presentados otros autores.

No se verifican diferencias apreciables en los valores de dureza bajo las condiciones de estudio.

Los resultados atípicos en la velocidad de deformación, indican la necesidad de investigaciones más exhaustivas y el uso de técnicas avanzadas para obtener una comprensión más completa y precisa del comportamiento de estos materiales bajo condiciones de servicio severas.

Agradecimientos

Al grupo GEMAT y a sus directivos. Dra. Lilian Moro y al Ingeniero Rene Molina.

Referencias

ASTM E139-11 (2018). Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials. ASTM International.

Callister, W.D., & Rethwisch, D.G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.). John Wiley & Sons.

Dieter, G. E. (1986). Mechanical Metallurgy (3rd ed.). McGraw-Hill.

Dowling, N.E. (2013). *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue* (4th ed.). Pearson.

Haines, A.J. (2000). *Practical Metallography*. CRC Press.

Klueh, R.L., & Harries, D.R. (2001). *High-Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications*. ASTM International.

Lloyd, D.J. (1991). *Metallography: Principles and Practice*. McGraw-Hill.

Monkman, F. C., & Grant, N. J. (1956). An Empirical Relationship Between Rupture Life and Minimum Creep Rate in Creep-Rupture Tests. *Proceedings of the ASTM*, 56, 593-620.

Pint, B.A., Dryepontdt, S.N., Brady, M.P., Yamamoto, Y., & Maziasz, P.J. (2013). Creep Resistance and Microstructural Stability of Advanced Austenitic Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(7), 3102-3113.

Shankar, V., Rao, K.B.S., & Mannan, S.L. (2001). Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 625 Superalloy. *Journal of Nuclear Materials*, 288(2-3), 222-232.

Smith, W.F. (2007). *Foundations of Materials Science and Engineering* (4th ed.). McGraw-Hill.