



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## INCREMENTO DE LA RESISTENCIA AL CREEP EN ACERO 1Cr 0.5Mo TRATADO TÉRMICAMENTE

G. González <sup>1\*</sup>, D. Alessio <sup>\*2</sup>, R. Molina <sup>1</sup>, L. Iurman <sup>1,2</sup>, L. Moro <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional.  
Grupo de Estudios de Materiales (GEMAT)  
11 de Abril 465, Bahía Blanca, 8000.  
[lmoro@frbb.utn.edu.ar](mailto:lmoro@frbb.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería  
Av. Alem 1253, Bahía Blanca (8000), Argentina  
[dalessio@uns.edu.ar](mailto:dalessio@uns.edu.ar)

### RESUMEN

El acero 1Cr 0.5Mo se utiliza en carcasas de turbinas de vapor y colectores de alta presión de plantas generadoras de energía y en refinerías de petróleo, donde los componentes están expuestos durante largos períodos de trabajo a altas temperaturas y presiones; situación que provoca un mayor riesgo de pérdida de la resistencia mecánica del material. Generalmente se utilizan en servicio, luego de haber sido sometidos a un tratamiento térmico de austenizado con posterior enfriado al aire, lo que provoca la aparición de distintos precipitados en la microestructura; que le confieren mayor durabilidad. Esta estructura inicial influirá en las transformaciones que se observan al ser sometido a condiciones de creep [1].

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento al creep del acero 1Cr 0.5 Mo y comparar la resistencia del mismo cuando previo a su uso se le realiza un tratamiento térmico, que permite mejorar sus condiciones de servicio. Se realizan ensayos de termofluencia por tracción, en un rango de temperaturas entre 843 y 923 K, y tensiones aplicadas entre 131 y 205 MPa en el material en condiciones de recepción y en el tratado térmicamente [2].

Se analiza también la variación microestructural del material original, luego de los tratamientos térmicos y de los ensayos de creep. Se caracterizan las muestras mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM) con análisis de espectroscopia dispersiva de rayos X (EDAX), a efectos de evaluar las transformaciones cinéticas que ocurren en las fases precipitadas y la presencia de daños a nivel micro estructural, tales como la nucleación, crecimiento y coalescencia de micro cavidades. Se mide también la microdureza de las fases presentes en las distintas muestras.

**Palabras Claves:** Creep, tratamientos térmicos, acero 1Cr 0.5Mo, microestructura



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

## 1. INTRODUCCIÓN

En las plantas generadoras de energía, se utiliza la combustión del carburante o la fisión nuclear para producir vapor a presión; el proceso de transformación de la energía cinética del vapor en energía eléctrica se realiza en las turbinas y generadores. Para que este procedimiento se ejecute en forma eficiente y cumpla con el ciclo de Carnot se requiere trabajar a altas temperaturas de servicio [1].

Se procura que las turbinas de vapor, tubos de calderas e intercambiadores de calor operen en un período de tiempo mayor a treinta años en servicio. Evans y Wilshire indican que las condiciones de trabajo son a temperaturas entre 450 y 600°C y tensiones que varían de 15 a 100 MPa [2].

Tecnológicamente, se pretende que los equipos y componentes presenten una correcta operación durante todo el período de trabajo ya que la rotura de los mismos, significa un alto costo de mantenimiento para las industrias. Entre los procesos críticos que afectan la integridad de los componentes podemos mencionar a la oxidación, la corrosión y la fatiga pero el de mayor importancia es la termofluencia (creep). Este fenómeno que se produce a alta temperatura y a tensiones menores que el límite elástico, provoca una deformación progresiva a medida que transcurre el tiempo y la pérdida de su resistencia mecánica que se evidencia con transformaciones en la microestructura [1].

Los aceros al carbono y de baja aleación son materiales que presentan una microestructura que se mantiene estable a pesar de estar sometidos a altas temperaturas y presiones. Esta estabilidad favorece la resistencia del material a la degradación. En particular los aceros ferríticos, poseen una estructura con finos carburos aleados que impiden el movimiento de las dislocaciones; sin embargo es inevitable, que durante largos períodos de servicio o condiciones muy críticas, se produzcan transformaciones que provocan la pérdida de resistencia del material. Entre las modificaciones de la estructura se puede mencionar: precipitación y transformación de carburos, descomposición de áreas de perlita/bainita, cambios en la morfología de los carburos y variación en la composición química de la matriz. El predominio de alguna transformación determinada, dependerá de la microestructura que presenta el material en estado original. Badeshia y Thompson estudiaron la morfología de aceros ferríticos, luego de haber sido sometidos a distintos tratamientos térmicos y encontraron que los carburos precipitados, cuando la muestra inicial tenía estructura bainítica, diferían de los obtenidos a partir de un material con una estructura inicial compuesta por bainita y ferrita alotrópica [3].

Si bien en décadas pasadas se utilizaba el acero 1Cr 0.5 Mo, en la actualidad y con la finalidad de aumentar la resistencia mecánica se lo ha reemplazado por otros aceros ferríticos con



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

mayor contenido de Cr y Mo y el agregado de microaleantes. El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento al creep por tracción del acero 1Cr0.5 Mo y comparar la resistencia del mismo en condiciones de recepción con otra muestra, donde previo a su uso, se le realiza un tratamiento térmico, que permitirá mejorar sus condiciones de servicio y así lograr con su utilización, un beneficio desde el punto de vista económico.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las muestras del acero 1Cr – 0,5Mo se tomaron de tubos sin costura de 73 mm de diámetro externo y 12 mm de espesor. Para realizar el estudio de la microestructura las probetas fueron desbastadas con papeles abrasivos de diferentes granulometrías y atacadas químicamente por inmersión, con Nital al 2%. La observación de la microestructura del material, se realizó mediante microscopía óptica y de barrido (SEM), utilizando un microscopio marca JEOL 35 CF, el cual tiene adosado un sistema de microanálisis del tipo EDX.

En la figura 1, se muestra la estructura del acero ferrítico 1Cr - 0,5Mo en su estado original, donde se observa la presencia de ferritas y bainitas, como así también una importante dispersión de carburos. Se sabe que la estructura inicial de un acero de baja aleación resistente al creep, depende no solo de su composición química sino también de la velocidad de enfriamiento después del proceso de fabricación, así podrá consistir en ferrita + perlita, ferrita + perlita + bainita o bainita + ferrita [4].

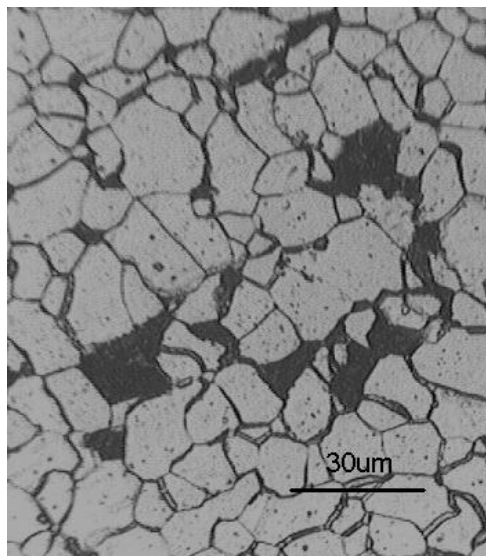


Figura 1 Microestructura del acero en su estado original.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

Se determinó la composición química de las muestras mediante un espectrómetro de emisión por plasma, marca Spectromax modelo X. En la Tabla 1, se presentan los elementos componentes y los valores medidos de las concentraciones (% en peso) del material

Tabla 1 Análisis composicional real (% en peso) del acero.

| C      | Cr    | Mo   | Si    | Ni    | Mn    | S     | Cu   | Otros     | Fe      |
|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|-----------|---------|
| 0.0490 | 1.080 | 0.36 | 0.704 | 0.040 | 0.395 | 0.354 | 0.01 | S, P <0.2 | Balance |

El acero 1 Cr 0.5 Mo presenta una buena resistencia mecánica a alta temperatura por efecto de la precipitación de carburos pero una baja resistencia a la corrosión a temperaturas alrededor de 823 K por su bajo contenido de cromo. Dado que su utilización resulta de mucho interés desde el punto de vista económico se realizó un tratamiento térmico para mejorar su resistencia al creep. Este tratamiento consistió en una austenización a 1223K seguida de un enfriamiento en aire y luego un revenido a 1023K durante 3 horas y enfriamiento nuevamente al aire. La secuencia del tratamiento térmico realizado, se muestra en la Figura 2.

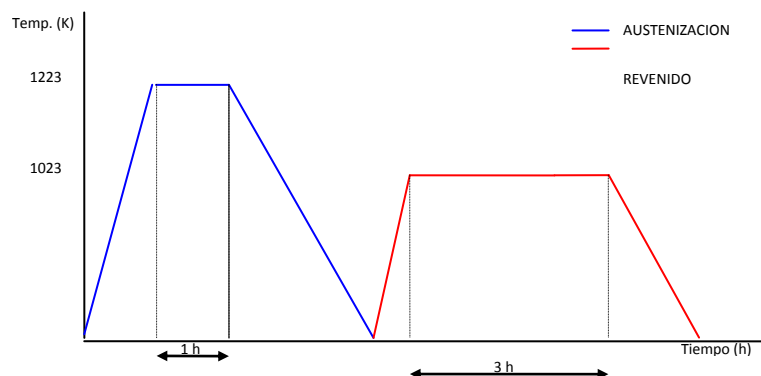


Figura 2 Ciclos térmicos realizados

Para determinar el comportamiento del material en función del tratamiento térmico, se realizaron ensayos de termofluencia en probetas de material en estado de recepción y del material tratado térmicamente. Estos ensayos se realizaron con un equipo de tracción donde se mantiene la tensión y temperatura constantes respetando las condiciones de la norma ASTM E 139 [5].



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

El equipo consta de una barra principal pivotante, con una leva de radio constante en su brazo de menor longitud y un peso de trazabilidad controlada en su brazo mayor que permite el desplazamiento sobre el mismo para lograr la tensión elegida, en función de la distancia al centro de pivot. La deformación de la zona calibrada de la probeta, se mide por medio de dos transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) Marca Solartron con un sensibilidad de 0.01 mm, que produce una salida de corriente continua con una amplitud proporcional al desplazamiento de un núcleo movable. La señal de salida de los LVDT es adquirida por un sistema analógico- digital [6,7].

Se realizaron ensayos de creep hasta la rotura, trabajando en un rango de temperaturas entre 843 y 923K y tensiones efectivas entre 82 y 205 MPa, manteniendo ambas variables constantes durante cada ensayo. Se determina la velocidad de deformación equivalente, la cual se vincula con la temperatura y la tensión aplicadas, a partir de la ecuación empírica o ley de potencias 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 [2].

Por último se realizaron mediciones de dureza Vickers, con un microdurómetro marca Future-TECH modelo FM – 300, a las muestras en forma original y a la tratada térmicamente.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se caracterizó el comportamiento al creep del material sin tratamiento térmico con otro tratado térmicamente. En la Figura 3 se presenta la deformación específica en función del tiempo en un rango de temperaturas de 843 a 923 K, y a una tensión aplicada de 168 MPa y en la Figura 4 se puede observar la variación de la deformación específica con el tiempo a la temperatura constante de 873 K y tensiones aplicadas de 82 a 205 MPa.

A partir de las gráficas trazadas se calcularon las velocidades de deformación de la zona del creep secundario (estado estacionario) donde la pendiente de la curva se mantiene prácticamente constante. Con estos valores para la tensión equivalente de 168 MPa y temperaturas de 843, 873 y 923 K se trazó la gráfica que permite, a partir de la ecuación (1), calcular un valor para la energía de activación (Figura 5).



# IV CAIM 2014

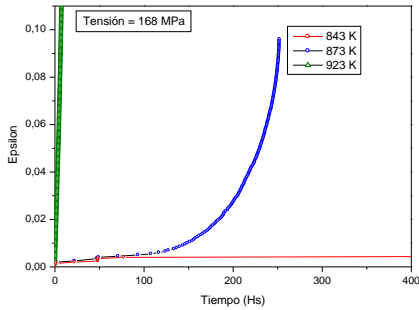
Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



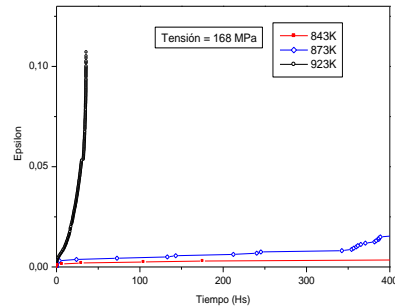
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

# FoDAMI

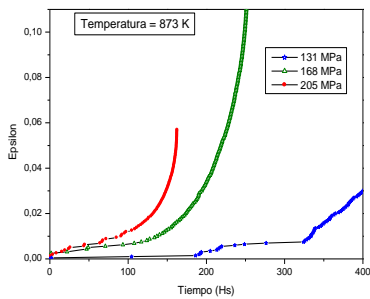


(a)

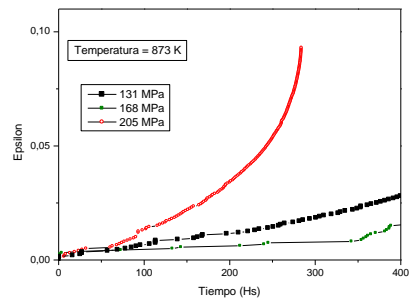


(b)

Figura 3 Gráfica de la deformación específica por creep en función del tiempo a distintas temperaturas y a una tensión de 168 MPa. a) material sin tratamiento térmico b) material tratado térmicamente.

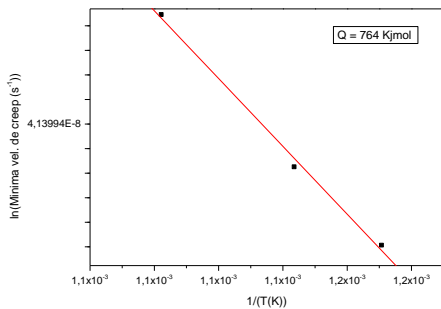


(a)

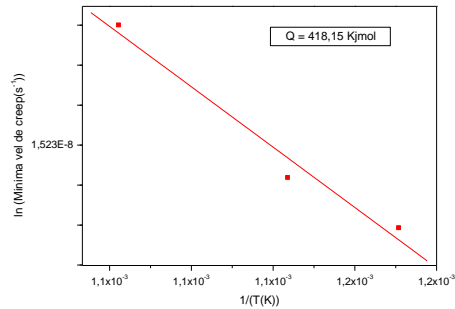


(b)

Figura 4 Gráfica de la deformación específica por creep en función del tiempo a tensiones y a una temperatura de 873 K. a) material sin tratamiento térmico b) material tratado térmicamente.



(a)



(b)

Figura 5 Gráfica del logaritmo natural de la velocidad de deformación por creep en función de la temperatura recíproca a) material en estado de recepción b) material tratado térmicamente.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

## FoDAMI

Con un procedimiento similar, utilizando los datos obtenidos de los ensayos realizados a la temperatura de 873K y tensiones de 82, 168 y 205 MPa se obtiene el gráfico de las Figura 6, que permite obtener un valor del exponente de tensión.

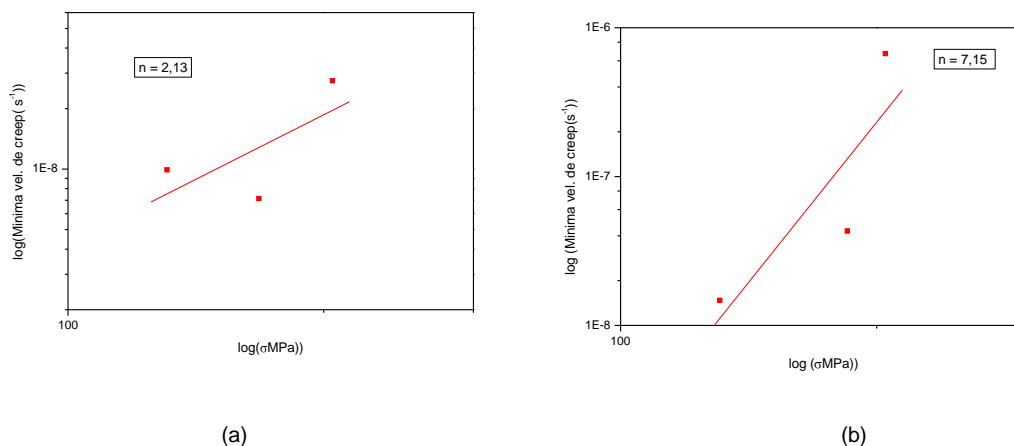


Figura 6: Gráfica del logaritmo de la velocidad de deformación por creep en función del logaritmo de la tensión aplicada a) material sin tratamiento térmico b) material tratado térmicamente.

A partir de la comparación de los valores de estos dos parámetros para el acero sin tratamiento térmico con oro tratado térmicamente y como se muestra en la Tabla 2, se evidencia un aumento del coeficiente de tensión y una disminución de la energía de activación que verifica la mayor resistencia mecánica en el acero tratado.

Tabla 2 Valores de la energía de activación y de los coeficientes de tensión

| Acero 1Cr 0.5 Mo               | Sin tratamiento térmico | Con tratamiento térmico |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Energía de activación (KJ/mol) | 764                     | 418                     |
| Coefficiente de tensión        | 2.13                    | 7.15                    |

Se estudió la microestructura del material tratado térmicamente. En la figura 7 (a) se muestra la estructura del material luego de la austenización a 1223K, en ella se observa una matriz de ferrita con granos de mayor tamaño que en el material original, un disperso de bainita y una mayor cantidad de precipitado en el borde de grano. Mientras que en la figura (b) se observa el material luego del revenido donde se aprecia una matriz de granos equiaxiales de ferrita y un disperso de colonias de bainita más disgregadas que en la estructura del material original.



# IV CAIM 2014

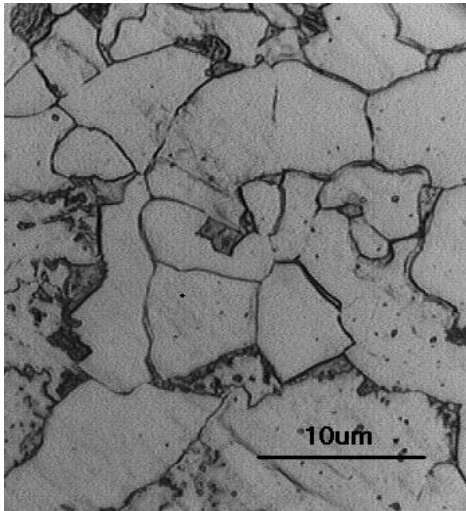
Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



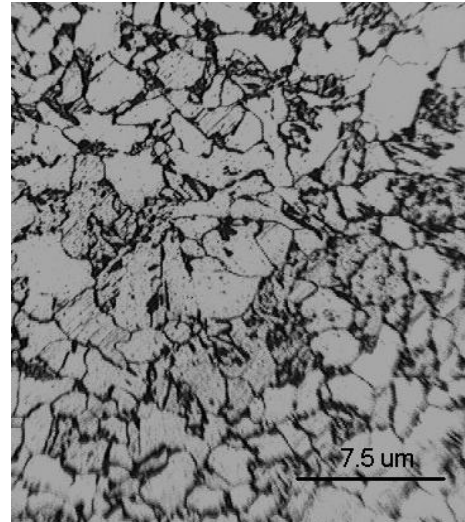
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI



(a)



(b)

Figura 7. Estructura del acero: a) Luego de una austenización a 1223K y b) Posterior al revenido a 1023K durante 3 hs. (100X).

En la Figura 8 se puede observar la estructura y el análisis EDX de un carburo del acero con tratamiento de revenido. Nutting y colaboradores presentan un mapa de temperatura – tiempo donde indican las distintas fases estables precipitadas en los aceros Cr – Mo y proponen que para un tratamiento térmico como el utilizado los carburos serían del tipo  $M_3C$ ,  $M_2C$  y  $M_7C_3$  [8].

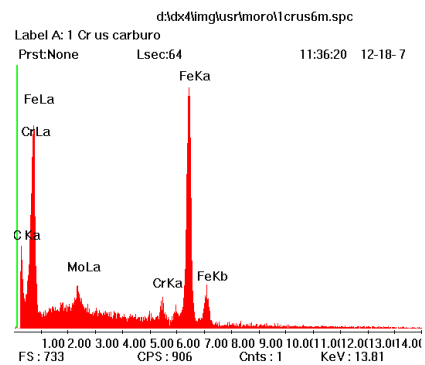
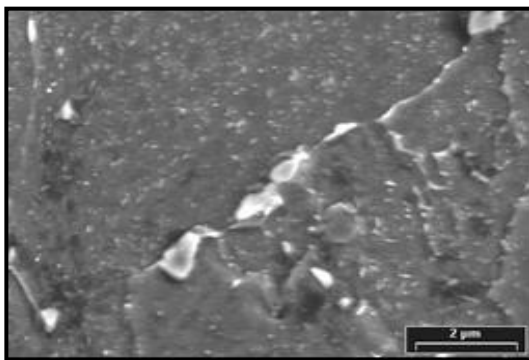


Figura 8: Microscopía electrónica SEM y espectrometría EDX de un carburo.

Al material sin tratamiento térmico con otro tratado térmicamente se le midió la dureza Vickers. En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos, donde se indica que en el material



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

austenizado disminuye el valor respecto del obtenido en el material original lo que indica la disolución de algunos precipitados. Sin embargo en las muestras con revenido, la dureza Vickers aumenta ya que en la bainita, luego de un tiempo de exposición a 1023 K, los carburos  $M_2C$  coexisten con el  $M_6C$  y con el  $M_{23}C_6$  [9].

Tabla 3 Valores de dureza Vickers

| MATERIAL       | En estado de recepción | Austenizado | Revenido |
|----------------|------------------------|-------------|----------|
| DUREZA VICKERS | 164                    | 153         | 184      |

### 3. CONCLUSIONES

- El estudio de la estructura indicó que en el acero tratado térmicamente aumenta la cantidad de colonias de bainitas y los carburos precipitados.
- Los valores de las microdurezas obtenidas están en relación con las micrografías, disminuyendo el valor en el acero austenizado y aumentando luego del revenido respecto del acero original donde se observa una estructura con mayor cantidad de carburos precipitados.
- De la graficas de los ensayos de creep se puede observar que en el material con tratamiento térmico la deformación total se logra en un mayor tiempo de ensayo y es menor la velocidad de deformación de la etapa secundaria. Esto indica un aumento de la resistencia del material.
- La rotura dúctil en los aceros de baja aleación resistentes a la fluencia se basa principalmente en la nucleación y crecimiento de los carburos aleados, como así también en los huecos que se forman en los límites de grano

### 4. REFERENCIAS

- [1] R. Viswanathan "Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components" ASM International Metals, Park Ohio, USA (1989).
- [2] R. Evans and B. Wilshire "Creep of metals and alloys". The Institute of Metals, England. (1985)



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

- [3] R.C. Thomson, H.K.D.H. Bhadeshia, "Carbide Precipitation in 12Cr1MoV Power Plant Steel" *Metallurgical Transactions A*, vol. 23A, 1171-1179. (1992)
- [4] M.F. Ashby, C. Gandhi; D.M.R. Taplin. "Fracture Mechanism Maps and Their Construction for f.c.c. Metals and Alloys", *Acta Metallurgica*, 27, 699-729. (1979).
- [5] ASTM E 139-70 American National Standard..(2011).
- [6] J.C.E. Earthman, "Introduction to Creep and Stress-Relaxation Testing", *ASM Metals Handbook*, 10<sup>th</sup> Ed. USA ASM Tnternational. (1990)
- [7] R. Molina, T. Piovan, L. Moro, L.lurman, "Estudio del fenómeno de temofluencia usando un equipo de tensión constante de diseño propio" *Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica*. San Juan. Argentina. (2010).
- [8] J. Nutting, J. M. Arrowsmith, "Structural Processes in Creep" Special Report 70, Iron Steel Inst., London; 246 (1961).
- [9] H.K.D.H. Bhadeshia "Bainite in steels, transformations, microstructure and properties", 2nd Ed. Thomson, R.C. (2001)