



# 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

## DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE PROBETAS NO ESTANDARIZADAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS EN TUBOS DE GENERADORES DE VAPOR

Sergio Soria<sup>\*1,3</sup>, Simón Claramonte<sup>1</sup>, Marcos Bergant<sup>2</sup>, Graciela Bertolino<sup>1,3</sup>,  
Alejandro Yawny<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> División Física de Metales, Centro Atómico Bariloche - Instituto Balseiro, CNEA,  
Av. E. Bustillo 9500, CP 8400, S. C. de Bariloche, Río Negro, Argentina.

<sup>2</sup> Gerencia CAREM, Centro Atómico Bariloche - Instituto Balseiro, CNEA  
Av. E. Bustillo 9500, CP 8400, S. C. de Bariloche, Río Negro, Argentina.

<sup>3</sup> CONICET (CCT Patagonia Norte)

\*correo-e: sergio.soria@ib.edu.ar

### RESUMEN

En este trabajo se evaluaron nuevos diseños de probetas no estandarizados, alternativas a las propuestas en las normas ASTM, para la determinación de propiedades mecánicas relevantes (resistencia mecánica, fatiga y fretting fatiga) de tubos de generador de vapor de Incoloy<sup>®</sup> 800. En los ensayos de tracción se obtuvieron valores de tensión de fluencia y tensión máxima similares a los informados en la literatura para el mismo material en probetas normalizadas. En el caso de fatiga uniaxial se obtuvieron valores de vida a fatiga similares a los informados por otros autores. Sin embargo, se observó que en todos los casos el origen de la falla se produjo en la zona de transición entre la región calibrada y los agarres. En el caso de los ensayos de fretting fatiga, la zona de falla se situó nuevamente en la zona de transición entre la región calibrada y la cabeza de la probeta. Del análisis de las marcas superficiales producidas por fretting se puede observar que el sistema se comporta bajo un régimen de deslizamiento parcial (*stick-slip*).

**Palabras Claves:** Incoloy 800, fatiga en tubos de generadores de vapor, fretting fatiga.



## 1. INTRODUCCIÓN

En los ensayos de tracción y de fatiga uniaxial de tubos de pared delgada se presentan algunos problemas relacionados con el apriete en la zona de las mordazas de la máquina de ensayo.

La norma para ensayos de tracción ASTM E8M [1] establece que para diámetros exteriores de hasta 25 mm se deben utilizar tapones metálicos en ambos extremos del tubo (Figura 1), de manera de evitar el aplastamiento del tubo por las mordazas. Sin embargo, en el caso de materiales de alta ductilidad la falla tiende a producirse, precisamente, en las zonas de contacto entre la probeta y los tapones, como se observa en la Figura 1, resultando en ensayos no válidos. A su vez, la norma para ensayos de fatiga uniaxial de componentes metálicos, ASTM E466 [2] sólo establece las dimensiones y relaciones dimensionales para probetas cilíndricas y planas, sin dar dimensiones para probetas de tubos.

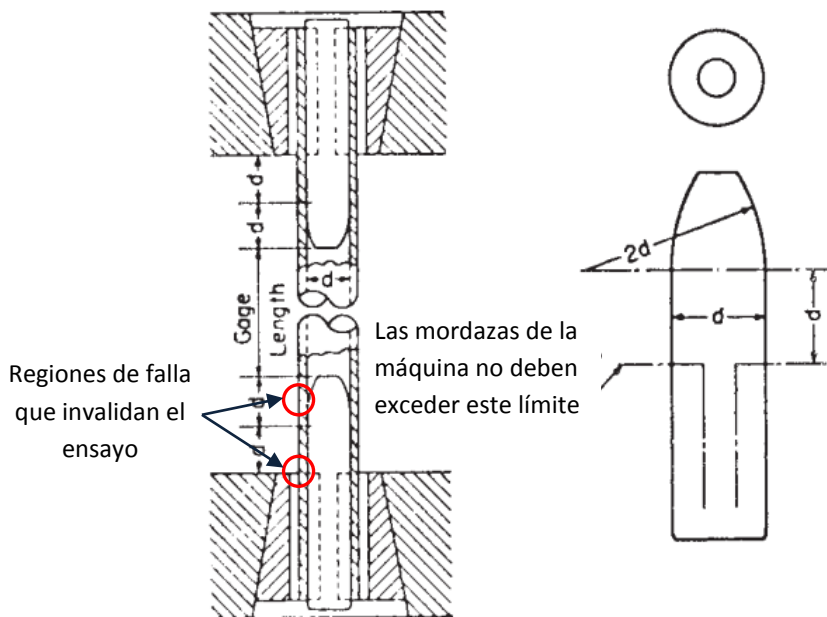


Figura 1. Probeta para ensayos de tracción de tubo con tapones (extraído de ASTM E8M [1])  
y ubicación usual de la región de falla.

Considerando la necesidad de determinar correctamente las propiedades mecánicas básicas del material utilizado en la construcción de tubos generadores de vapor (TGVs) en la condición termo-mecánica final, se considera necesario trabajar en el desarrollo de probetas que puedan suplir las dificultades antes mencionadas y proveer resultados válidos.

Por otro lado, en los TGVs se presenta el fenómeno de fretting y de fretting fatiga [3]. El fretting es un mecanismo de daño superficial que se origina entre dos cuerpos en contacto entre los



# 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

que existe un movimiento relativo de pequeña amplitud (1 a 300  $\mu\text{m}$ ) [4]. En el caso de los TGVs, este movimiento es debido a las vibraciones inducidas por el flujo de agua. El fenómeno de fretting fatiga se presenta cuando uno de los cuerpos en contacto está a su vez sometido a una carga variable, similar a una situación de fatiga tradicional. La caracterización del daño inducido por estos mecanismos es de fundamental importancia en el diseño y la predicción de fallas en TGVs y otros componentes susceptibles. Sin embargo, en la actualidad, el único procedimiento normalizado para la realización de ensayos de fretting fatiga es el establecido por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Mecánicos (JSME) en la norma JSME S015 [5]. Se plantea aquí también la necesidad de desarrollar probetas y métodos de ensayo adecuados.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, en este trabajo se desarrollaron dos tipos de probetas no estandarizados para la realización de ensayos de tracción, fatiga uniaxial y fretting fatiga para TGV, comparando los resultados obtenidos con los diseños de probetas tradicionales.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización y diseño de las probetas se utilizaron tubos de Incoloy<sup>®</sup> 800 de 15,87 mm de diámetro exterior y espesor de pared de 1,13 mm, utilizados para la fabricación de TGVs para la industria nuclear. Con el nombre de Incoloy<sup>®</sup> se conoce a un grupo especial de aleaciones desarrolladas por la empresa *Special Metals Corporation* [6]. Éstas son aleaciones de base Fe-Ni, cuya composición se presenta en la Tabla 1 y son utilizadas como materiales para TGVs debido a su excelente resistencia a la corrosión y adecuada resistencia mecánica a temperaturas de trabajo cercanas a 300°C.

Tabla 1. Composición química (% en peso) de la aleación 800 o Incoloy<sup>®</sup> 800 (UNS N088800) [6].

Ni	Fe	Cr	Cu	Ti	Al	C	Mn	S	Si
30-35	39,5 mín.	19-23	0,75 máx.	0,15- 0,60	0,15- 0,60	0,1 máx.	1,5 máx.	0,015 máx.	1,0 máx.

### 2.1. Geometría de probetas

Se consideraron las dos geometrías de probeta que se muestran en la Figura 2. Las probetas denominadas “¼ de tubo” (Figura 2.A), se obtuvieron al seccionar el tubo longitudinalmente en 4 partes iguales. Las probetas denominadas “dobles” corresponden a una probeta compuesta conformada por dos de ¼ de tubo conectadas mediante una cabeza de sección tubular, la cual se obtuvo realizando el maquinado de dos ventanas longitudinales, tal como se muestra en la Figura 2.B. Estas probetas se ensayan utilizando como respaldo en los extremos de agarre los tapones presentados en la Figura 1. Las probetas ¼ de tubo se diseñaron de acuerdo a la norma ASTM E466 [2] como probetas planas, sin considerar la curvatura propia del tubo,



utilizando el espesor nominal del mismo y respetando las relaciones dimensionales propuestas por la norma. El diseño de las probetas doble, en cambio, surgió de la búsqueda de una probeta simétrica para llevar a cabo ensayos de fatiga y de fretting fatiga.

En el ensayo de las probetas  $\frac{1}{4}$  de tubo, se aplanó la región de la cabeza donde se produce apriete de las mordazas, utilizando una prensa hidráulica. Se eligió una distancia de 15 mm entre la finalización del radio de acuerdo (entre la sección calibrada y la cabeza de la probeta) y la región aplanada para evitar un posible aplastamiento en las cabezas y que dicho efecto afecte los resultados del ensayo.

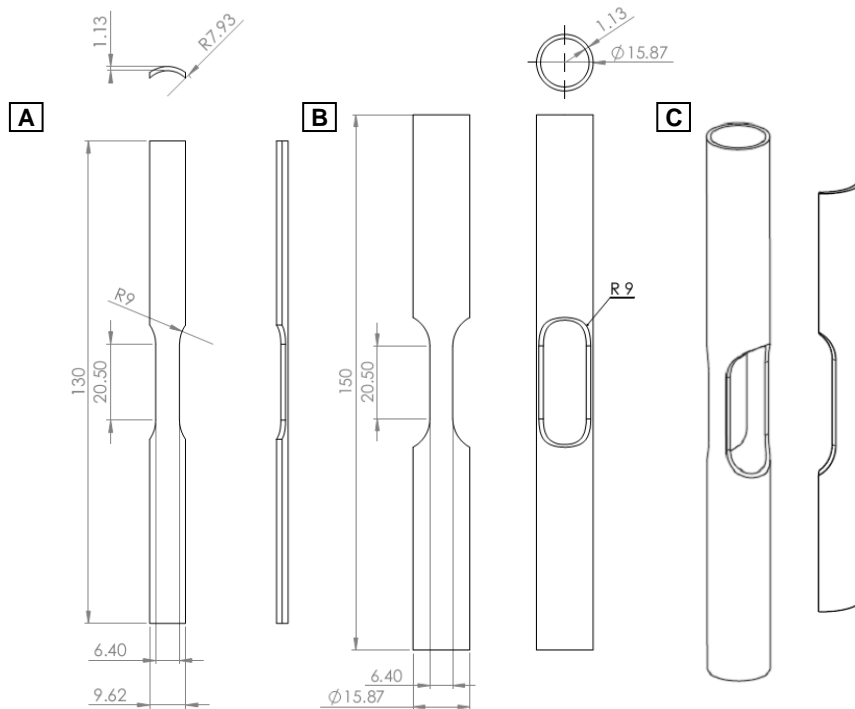


Figura 2. Probetas utilizadas,  $\frac{1}{4}$  de tubo (A) y doble (B) (medidas en mm) y la comparación entre ambas (C).

## 2.2. Dispositivos utilizados y condiciones de ensayo

En los ensayos de tracción se utilizaron tres probetas  $\frac{1}{4}$  de tubo y una probeta doble. Las probetas de  $\frac{1}{4}$  de tubo se ensayaron en una máquina de ensayos electromecánica Instron 5567, utilizando para medir la deformación un extensómetro Instron Modelo 2620-61 de 12,5 mm de longitud calibrada. El ensayo de la probeta doble se realizó en una máquina de ensayos servohidráulica MTS 810 utilizando en una sección calibrada un extensómetro MTS Modelo 632.13F-20, de 10 mm de longitud calibrada, mientras que la otra fue instrumentada con una galga extensométrica marca MicroMeasurement Inc., Serie J2-A, con factor de galga de 2,08 y una resistencia nominal de 350  $\Omega$ . Esta configuración de  $\frac{1}{4}$  de puente fue



complementada con una electrónica *ad-hoc* incluyendo tres resistencias calibradas, una fuente de tensión para la alimentación del puente de 5V, un regulador de tensión ajustable LM317 y un amplificador de precisión para instrumentación INA 114. La adquisición de datos se realizó a través de una entrada auxiliar del controlador MTS FlexTest SE de la máquina de ensayos. De esta manera se pudo registrar la carga y otras variables del ensayo, junto con los valores de tensión de la salida del puente.

Los ensayos de fatiga uniaxial se realizaron en tres probetas  $\frac{1}{4}$  de tubo y una probeta doble. El ciclado se realizó en la máquina de ensayos servo-hidráulica MTS 810 a una frecuencia de 10 Hz utilizando control de carga, con una relación de tensiones  $R = 0,1$  y tensiones máximas de 340 y 410 MPa.

Los ensayos de fretting fatiga fueron realizados también en la máquina MTS 810 utilizando una probeta doble, con un cilindro de teflón colocado en el área de la ventana para proveer mayor rigidez a las zonas calibradas. Se utilizaron idénticas condiciones a las utilizadas en el ensayo de fatiga uniaxial para una tensión máxima de 410 MPa. Para la realización de los ensayos de fretting fatiga se utilizaron dos puentes con patines planos (Figura 3.A) con la carga normal aplicada a través de un anillo de carga (Figura 3.B). Una fotografía del dispositivo utilizado se puede observar en la Figura 3.C. Las dimensiones de los patines se determinaron siguiendo las recomendaciones de la norma JSME S015 [5]. El anillo se instrumentó como celda de carga utilizando galgas extensométricas en la modalidad de puente completo. La excitación, acondicionamiento y adquisición de datos se realizó con un equipo HBM Spider 8.

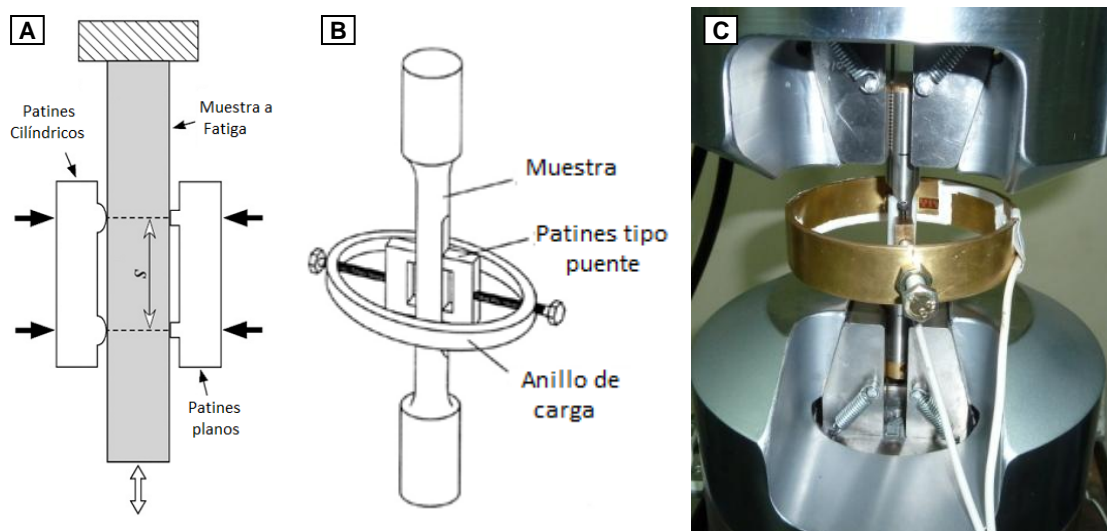


Figura 3. Esquema de diferentes patines (A) así como del dispositivo de anillo para fretting fatiga (B) [7] y fotografía del dispositivo fabricado (C).



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se presentan las curvas Tensión-Deformación nominal ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) de la primera parte del ensayo obtenida con extensómetro, así como las curva de Carga-Desplazamiento ( $P$ - $\delta$ ) de la curva del ensayo completo para una de las probetas  $\frac{1}{4}$  de tubo ensayadas. Para las tres probetas ensayadas se determinaron la tensión de fluencia y la tensión máxima en base a ASTM E8M [1], obteniéndose valores de  $262 \pm 8$  MPa y  $593 \pm 15$  MPa, respectivamente. Estos valores se comparan favorablemente con los reportados por el fabricante de la aleación para el material en estado recocido [6] (fluencia 250 MPa, rotura 590 MPa), así como con valores reportados por Kwon y coautores [8] en un trabajo sobre barras sólidas de Incoloy<sup>®</sup> 800.

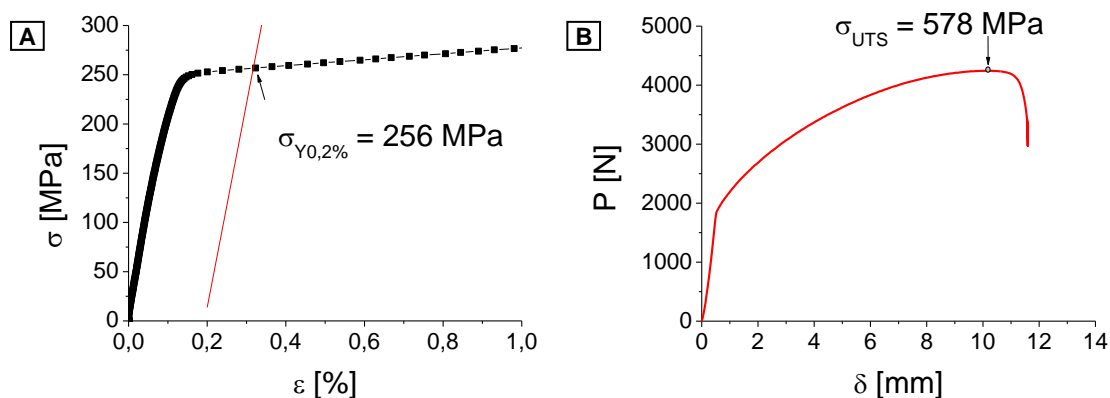


Figura 4. Curvas obtenidas con el extensómetro (A) y el cabezal de la máquina (B) para uno de los ensayos.

En la Figura 5 se presenta una fotografía de las tres probetas  $\frac{1}{4}$  de tubo ensayadas donde se puede observar que en dos casos la falla se produjo en el tercio medio de la zona calibrada, mientras que en la probeta restante ésta ocurrió en la zona del radio de acuerdo en la región calibrada y las cabezas de apriete.

La Figura 6.A muestra la instrumentación utilizada en una probeta doble para el ensayo de tracción. Puede observarse la galga extensométrica adherida a una de las probetas. Se utilizó para ello como adhesivo cianocrilato marca Loctite<sup>®</sup>. La Figura 6.B muestra el despegue de la galga extensométrica registrado luego de una deformación de aproximadamente 0,5 % (ver Figura 7). En la Figura 6.C se observa que ambas secciones calibradas de la probeta doble fallaron en la región central resultando en ensayos válidos, a diferencia de lo que ocurría al ensayar el tubo completo con los tapones.

La comparación entre las curvas Tensión-Deformación nominal ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) obtenidas el extensómetro y la galga extensométrica para la primera parte del ensayo se presenta en la Figura 7. Los



# 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

valores de tensión de fluencia determinados del lado del extensómetro y de la galga fueron respectivamente de 262 y 256 MPa, con una tensión máxima de 611 MPa.



Figura 5. Zona de falla en las probetas  $\frac{1}{4}$  de tubo ensayadas a tracción.

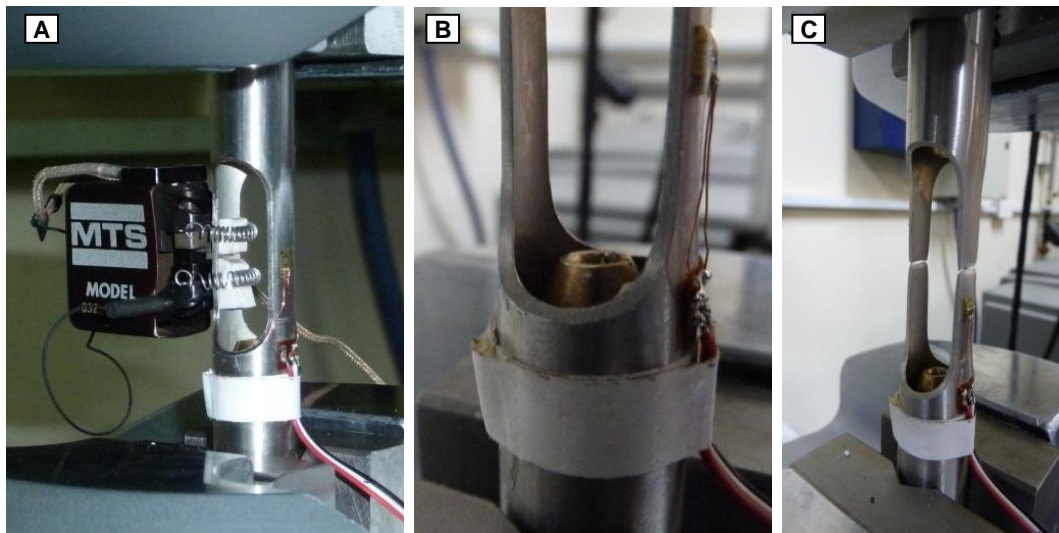


Figura 6. Probeta doble con la Instrumentación utilizada en el ensayo de tracción (A), falla del pegamento (B) y rotura final (C).

De los resultados obtenidos se puede aseverar que tanto la probeta de cuarto  $\frac{1}{4}$  de tubo así como la probeta doble son más adecuadas para la obtención de ensayos de tracción válidos en tubos de pared delgada. La probeta de  $\frac{1}{4}$  de tubo tiene como ventaja el poder obtener cuatro probetas a partir de una misma longitud de tubo, mejorando la estadística de los resultados. La desventaja significativa está relacionada con el mayor trabajo asociado a la fabricación de las probetas, requiriendo la utilización de operaciones de corte de precisión en longitudes de 130 mm y posterior fresado de las cuatro probetas individuales. La probeta doble en cambio es



# 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

menos eficiente en cuanto a número de probetas por longitud de tubo pero su fabricación es mucho más sencilla.

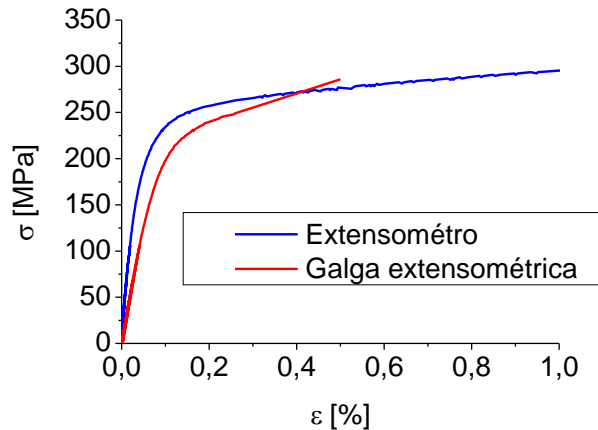


Figura 7. Comparación entre curvas de tracción  $\sigma - \epsilon$  nominal obtenidas con extensómetro y con galga extensométrica.

Los resultados obtenidos durante los ensayos de fatiga uniaxial se presentan en la Tabla 2. Se puede observar que para las probetas  $\frac{1}{4}$  de tubo cicladas a una tensión máxima de 410 MPa, la vida a fatiga de las muestras es prácticamente la misma. En el caso de la probeta doble se observa una pequeña disminución de la vida a fatiga para iguales condiciones. A su vez, con una tensión máxima de 340 MPa se observó, como era lógico esperar, un aumento en la vida a fatiga de la probeta  $\frac{1}{4}$  de tubo.

Tabla 2 Resultados para los ensayos de fatiga uniaxial.

Nº de probeta	Tensión Máxima [MPa] R=0,1	Amplitud de tensiones [MPa]	Vida a fatiga [Nº de ciclos]
Cuarto de tubo	410	184,5	252.804
Cuarto de tubo	410	184,5	254.426
Cuarto de tubo	340	153	697.593
Doble ventana	410	184,5	169.657

En la Figura 8 se observa que, en todos los casos, la rotura se produjo en la zona del radio de acuerdo con la cabeza, invalidando los resultados obtenidos. Evidentemente, la concentración de tensiones en esta zona es determinante en el caso de los ensayos de fatiga, a diferencia de lo que ocurriera en los ensayos de tracción. Sin embargo, los valores de vida a fatiga mostrados en la Tabla 2 para muestras de  $\frac{1}{4}$  de tubo se corresponden con los valores reportados por Kwon y coautores [8] para ensayos de fatiga uniaxial en muestras cilíndricas de

Incoloy® 800 en idénticas condiciones (R, tensión máxima, frecuencia). El resultado para la probeta doble sugiere que este efecto concentrador es aún más significativo.



Figura 8. Probetas ensayadas a fatiga uniaxial con fisura en la región de transición con la mordaza.

En el ensayo de fretting fatiga, la probeta doble falló a los 90.000 ciclos, ubicándose la región de inicio de fisura en el radio de acuerdo entre la zona calibrada y la cabeza de la probeta. Esto invalida el ensayo, ya que es de esperar que la fisura inicie en la zona central, precisamente en la región de interacción de los patines con la probeta. A pesar de que tanto en fatiga uniaxial como en fretting fatiga la probeta de doble ventana brindó resultados inválidos, la reducción de vida por fretting fue del 52%, valor igual al reportado por Kwon y coautores [8] para el caso de fatiga y fretting fatiga a temperatura ambiente, lo que lleva a estimar que el efecto de concentración de tensiones no se ve intensificado por el contacto del TGV con los patines. Del análisis de la superficie de desgaste del tubo mediante por microscopía electrónica de barrido (SEM), como se presenta en la Figura 9, se observó que en los bordes de la misma se evidencia una condición de desgaste por deslizamiento (*slip*), mientras que en la zona central se presenta una adherencia (*stick*), lo que permite determinar que el sistema se encuentra en un régimen de deslizamiento parcial durante el ensayo [4]. Los resultados sugieren que la aplicación de la carga normal a través de los patines estaría generando una contribución adicional por flexión a las tensiones máximas asociadas al concentrador en la zona de transición. Este efecto sería más importante que la introducción de daño local que provocaría la disminución de la vida a la fatiga por el fenómeno de fretting fatiga.

#### 4. CONCLUSIONES

Se propusieron y ensayaron 2 nuevos diseños de probetas que se utilizaron para ensayos de tracción, fatiga uniaxial y fretting fatiga de tubos de generadores de vapor de Incoloy® 800, a los que se denominó probetas de  $\frac{1}{4}$  de tubo y probetas dobles.

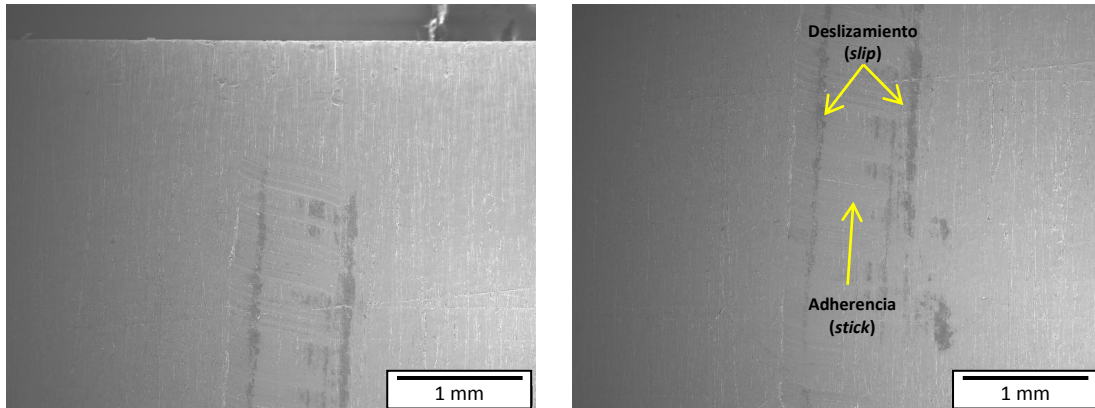


Figura 9. Zona de desgaste en el TGV, cerca del borde y en el centro de la región calibrada.

En los ensayos de tracción se encontró que los valores de tensión de fluencia y tensión máxima obtenidos con ambos tipos de probeta no se alejan más de un 3% y un 10%, respectivamente, de aquellos encontrados en literatura [7, 8], obteniéndose un buen acuerdo entre los resultados obtenidos con ambos diseños, permitiendo afirmar que el diseño de probeta desarrollado es apto para la realización de ensayos de tracción en tubos de pared delgada.

Para el caso de los ensayos de fatiga uniaxial, en todos los casos las fallas presentadas en las probetas generaron resultados inválidos ya que las probetas rompieron en una región de doble curvatura. Se estimó que dicha región presenta en fatiga un efecto de concentración de tensiones que no fue observado durante los ensayos de tracción de probetas similares. Se presentaron diferencias entre las probetas del tipo  $\frac{1}{4}$  cuarto de tubo y doble. Sin embargo, la vida a fatiga de las probetas de  $\frac{1}{4}$  de tubo se encuentra en concordancia con los valores reportados en la bibliografía para probetas cilíndricas.

Los ensayos de fretting fatiga muestran que se debe seguir trabajando en el desarrollo de una probeta adecuada de manera de disminuir los efectos de concentración en la zona de transición con las cabezas. El análisis del daño superficial originado por la interacción patín probeta permite determinar que el sistema se encontraba en un régimen de deslizamiento parcial (*stick-slip*) [4].

## 5. REFERENCIAS

- [1] ASTM E8M, "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials", 2004.
- [2] ASTM E466, "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials", 2004.



# 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] P.L. Ko, "Heat Exchanger Tube Fretting Wear: Review and Application to Design", Journal of Tribology N° 107, pp. 149-156, 1985.
- [4] O. Vingsbo, S. Söderberg; "On fretting maps", Wear N°126, pp. 131-147, 1988.
- [5] JSME S015, "Standard method of fretting fatigue testing", 2002.
- [6] Special Metal Corporation, Publication Number SMC-046: INCOLOY® alloy 800, Special Metal Corporation, 2004.
- [7] R.W. Neu, "Progress in standardization of fretting fatigue terminology and testing", Tribology International N°44, pp. 1371–1377, 2011.
- [8] J.D Kwon, S.W. Woo, I.S. Chung, D.H. Yoon, D.K. Park, "A Study on Fretting Fatigue Life in Elevated Temperature for Incoloy 800", Int. J. Mod. Phys. B, Vol. 24 N°15-16, pp. 2561-2566, 2010.

## Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Sr. Julián Azcarate y David Salas por su colaboración en la instrumentación con galgas extensométricas, a la Srta. Paula Troyon por su colaboración con las micrografías de SEM. Los fondos fueron aportados por ANPCyT Proyecto PICT 0898-2011.