

# ENSAYO CANTILEVER BEAM EN Zr-2,5%Nb: ESTUDIO COMPARADO ENTRE MATERIAL DE TUBOS OBTENIDOS POR LAMINACIÓN Y POR TREFILADO

A. G. Gómez, W. C. Szieber, P. Vizcaíno<sup>1</sup>, N. Loureiro, D. R. Bianchi, A. D. Banchik

LMFAE, Centro Atómico Ezeiza, Presbítero Juan González y Aragón n° 15 B1802AYA Ezeiza, Buenos Aires, ARGENTINA.

[agomez@cae.cnea.gov.ar](mailto:agomez@cae.cnea.gov.ar)

## ABSTRACT

The Zr-2.5Nb alloy is used in the manufacture of pressure tubes for the CANDU nuclear power reactors. These tubes are subjected to severe service conditions: one of them, the heavy water corrosion due to the coolant generates release of hydrogen, part of which ingress in the material raising its initial concentration and exposing them to a phenomena referred as delay hydrogen cracking.

The results presented in this paper show the performance of a pressure tube of domestic manufacture under conditions of tension and hydrogen content in order to be compared with the behavior of a standard pressure tube in operation in the nuclear power plant.

To do this is, cantilever notched and precracked samples were hydrided from both kinds of tubes. Each one of these samples was subjected to the cantilever beam test, which consists in a bending test performed in a furnace at 250°C. Starting from a stress intensity factor  $K_I$  which determines the propagation start of the crack, the growth is followed by the acoustic emission technique up to the arrest of the crack by controlling the bending load.

This work presents the comparative data such as critical voltages, behavior of hydrides, and DHC parameters from both trials. Although the number of tests is reduced; results show a good performance of the tubes of domestic manufacture.

## RESUMEN

La aleación Zr-2.5Nb es utilizada en la fabricación de tubos de presión de los reactores nucleares tipo CANDU, estos tubos están sometidos a condiciones de servicio de alta exigencia, una de ellas es la elevada corrosión debido al refrigerante (agua pesada). Esto genera liberación de hidrógeno que difunde en el material elevando su concentración inicial y exponiéndolos a fenómenos tales como la *Fisuración Diferida por Hidrógeno*.

Los resultados que se exponen en este trabajo muestran el desempeño de un tubo de presión de Fabricación Nacional bajo condiciones de tensiones y altos contenidos de hidrógeno y se lo compara con el comportamiento de un tubo de presión, bajo las mismas condiciones, de un lote que se encuentran en operación en la Central Nuclear Embalse.

Para ello se hidruraron y maquinaron probetas de ambos tipo de tubos. Cada una de estas probetas fue sometida al ensayo cantiléver beam, el cual consiste en ejercer un esfuerzo de flexión a la probeta mientras es sometida a una rampa térmica prediseñada. A partir de un factor de intensificación de tensiones  $K_I$  inicial, que determina la propagación inicial de la fisura, el método consiste en ir disminuyendo el esfuerzo de flexión y controlando por Emisión Acústica (EA) el arresto de la misma.

---

<sup>1</sup> Integrante de la Carrera de Investigador del CONICET.

Durante el transcurso del experimento se logró detectar por medio de emisión acústica la propagación de la fisura y posterior arresto.

Se exponen los datos comparativos como tensiones críticas, comportamiento de hidruros, fisuración diferida por hidrógeno, etc. de ambos ensayos de los cuales se desprenden resultados que permiten, en primera instancia debido al limitado número de ensayos, mostrar un buen desempeño de los tubos de fabricación Nacional.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los tubos de presión de Zr-2,5%Nb son partes esenciales de los reactores nucleares tipo CANDU y constituyen parte de los canales de combustible de dichos reactores. A partir de la reacción de oxidación entre el agua pesada refrigerante y el metal durante la operación del reactor, se libera hidrógeno (deuterio en realidad), parte del cual ingresa al metal. Al superarse el límite de solubilidad del hidrógeno en la aleación, este precipita formando hidruros de circonio. Estos precipitados tienen forma de placa y son frágiles en relación a la matriz [1], de manera que bajo ciertas condiciones de tensión aplicada constituyen un camino propicio para la propagación de una fisura. Debido a la deformación plástica que sufre este componente como resultado de su proceso de fabricación, las plateletas de hidruro precipitan paralelamente a las direcciones axial-tangenciales del tubo [2]. Este modo de precipitación previene la propagación de fisuras en dirección radial, que de otro modo se verían favorecidas por la presurización del tubo durante la operación del reactor.

Sin embargo, ante la presencia de algún defecto en la pared interna del tubo, la combinación dada por la tensión circunferencial, temperatura de operación y la gradual incorporación de hidrógeno pueden, potencialmente, producir la precipitación de una plateleta en dirección radial, con la consiguiente propagación de una fisura a través del mecanismo conocido como fisuración diferida por hidrógeno [1, 2].

En este trabajo se exponen los resultados del ensayo realizado en dos probetas de tubos de presión, una de ellas obtenida de un tubo de presión de un lote que se encuentran en operación en la Central Nuclear Embalse y la otra de un tubo de presión de fabricación nacional por el método de laminación.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para los estudios se cuenta con un tubo de presión Zr-2.5Nb laminado en frío con un aporte del 27% de deformación en dos pasos sucesivos además de un relevado de tensiones mediante un tratamiento térmico a 400°C y un tubo perteneciente a un lote que se encuentran en operación en la Central Nuclear Embalse obtenido a partir del método de trefilado.

Se cortaron, de ambos tubos, probetas para los estudios de fisuración diferida por hidrógeno en dirección radial del tubo. Se muestra imágenes del una probeta para FDH (Fisuración Diferida por Hidrogeno) y un esquema del corte de dichas probetas. [APENDICE 1- Fig. 1].

En la cara interna de la parte media de la probeta se realiza una entalla y posterior pre-fisura por fatiga. Luego se incorpora hidrógeno a la probeta a concentraciones que adquiere el tubo en el reactor. Se muestra esquemáticamente el diseño del aparato utilizado para los ensayos. [APENDICE 1- Fig. 2].

Sobre la probeta se ejerce un esfuerzo de flexión mientras es sometida a una rampa térmica prediseñada. A partir de una carga inicial, que determina la propagación inicial de la fisura, el método consiste en ir disminuyendo la carga y controlando por Emisión Acústica (EA) el arresto de la misma. El valor de  $K_I$  al cual la fisura se detiene es por

definición  $K_{IH}$ . El valor de  $K_{IH}$  del material, según especificación [3, 4], debe ser mayor que  $7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-0.5}$  obtenidos en un ensayo a  $250^\circ\text{C}$ . Este valor es en principio independiente del contenido de hidrógeno del material, aunque se toma como referencia un contenido de 100 wppm-H para este tipo de ensayos.

### 2.1. Incorporación de hidrógeno

El material virgen contiene de 5 a 10 wppm-H, por lo cual se debe incorporar hidrógeno mediante alguna de las técnicas habitualmente utilizadas para tal fin hasta alcanzar un contenido mínimo de 50 wppm-H. [5]

La incorporación de hidrógeno se realizó por medio del método de carga gaseosa. La cámara donde se realizó la carga fue purgada mediante barrido de bomba mecánica y turbo molecular luego se sometió a una presión de hidrógeno de 1 atm, a  $400^\circ\text{C}$  y un tiempo estimado de 5 horas.

Una metalografía de la superficie de la zona de la entalla en la probeta luego de la carga de hidrógeno revela una distribución homogénea del hidruro. [APENDICE 1- Fig. 3].

### 2.2. Maquinado de la probeta

Mediante fatiga mecánica y control de los límites elásticos del material se generó una pre-fisura en la base de la entalla de longitud homogénea en el volumen de la probeta. [APENDICE 1- Fig. 3].

### 2.3. Ensayo Cantilever Beam

El ensayo consiste en someter a la probeta, dentro de un horno, a una tensión, aproximadamente en la dirección circunferencial del tubo. La tensión se aplicó mediante un brazo de palanca que sujeta a la probeta de uno de los extremos y que se encuentra empotrada en su otro extremo. [APENDICE 1- Fig. 2].

Se utilizó un horno eléctrico que aplicó una rampa térmica que eleva la temperatura hasta un valor máximo, para disolver los hidruros, y luego se enfría hasta la temperatura de ensayo de  $250^\circ\text{C}$ .

Luego de una hora de alcanzada la temperatura de ensayo, se aplicó la carga a través del brazo de palanca.

## 3. RESULTADOS

Una inspección metalográfica, [APENDICE 1- Fig. 4], luego del ensayo muestra un crecimiento de la fisura en dirección radial al tubo provocado por el fenómeno de fisuración diferida por hidrógeno además de reorientación de hidruros.

Las rampas de carga y emisión acústica reflejan tanto la variación de la carga como la emisión de señal acústica dada por la fractura de los hidruros al asistir a la propagación de la fisura en ambos ensayos. [APENDICE 1- Fig. 5].

Las curvas de carga en función del tiempo experimenta dos tipos de descenso, uno es suave debido a la propagación de la fisura y otro un descenso más pronunciado generados por el controlador de carga con el fin de arrestar la fisura.

Se observa de las curvas de carga y emisión acústica, el momento en que la carga se estabiliza y no se captura señal de emisión acústica indicando el arresto de la fisura.

La longitud final de la propagación de la fisura y la carga de arresto permiten estimar el valor del factor de intensificación de tensiones  $K_{IH}$ .

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados más importantes que se pueden obtener de este trabajo son dos:

- a) Se logró una propagación radial en todo el volumen de la probeta por el fenómeno de fisuración diferida por hidrógeno.
- b) Se calculó el valor de  $K_{IH} = 8,5 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^{0.5}$  en el tubo de presión del lote que se encuentran en operación en la Central Nuclear Embalse y un valor de  $K_{IH} = 7,6 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^{0.5}$  en el tubo de fabricación nacional, cumpliendo ambos los requerimientos del fabricante.

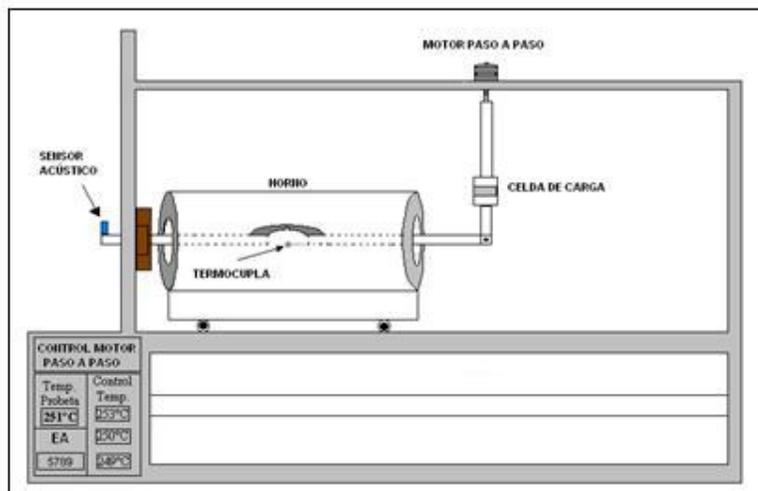
#### 5. REFERENCIAS

1. Northwood, U. Kosasih, "Corrosión and Hydriding Behavior of Zr-2,5 Wt. Pct Nb Alloy Nuclear Reactor Pressure Tubing". Journal Materials for energy systems, vol. 4, No. 1, 3(1982).
2. Y. Bum, Kim Sung Soo, "Effect of Hydride Reorientation on Delayed Hydride Cracking In Zr-2,5Nb Tubes". Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 35, No. 6, 529-536(2003).
3. AECL EACL Informe interno.
4. AECL EACL, Informe interno.
5. J.P. Giroldi, P. Vizcaíno, A.V. Flores, A.D. Banchik. Journal of Alloys and Compounds, 474 (2009) 140-146.

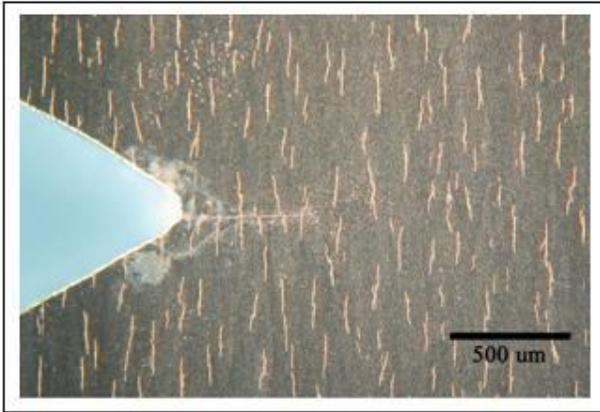
APENDICE 1: Figuras



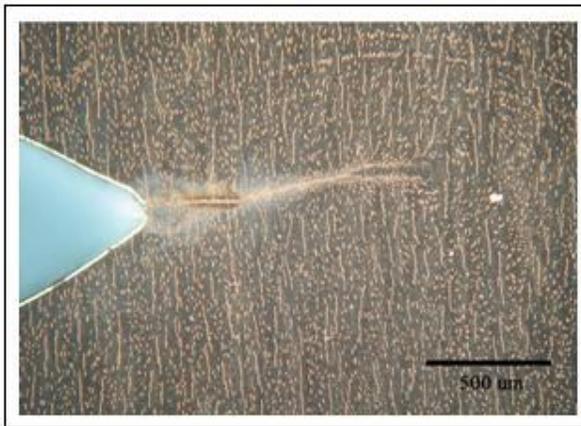
**Figura 1.** Corte de tubo de presión y perfil de la probeta para los estudios de fisuración diferida por hidrógeno, FDH (izq.). Dimensiones de la probeta (der.) en milímetros.



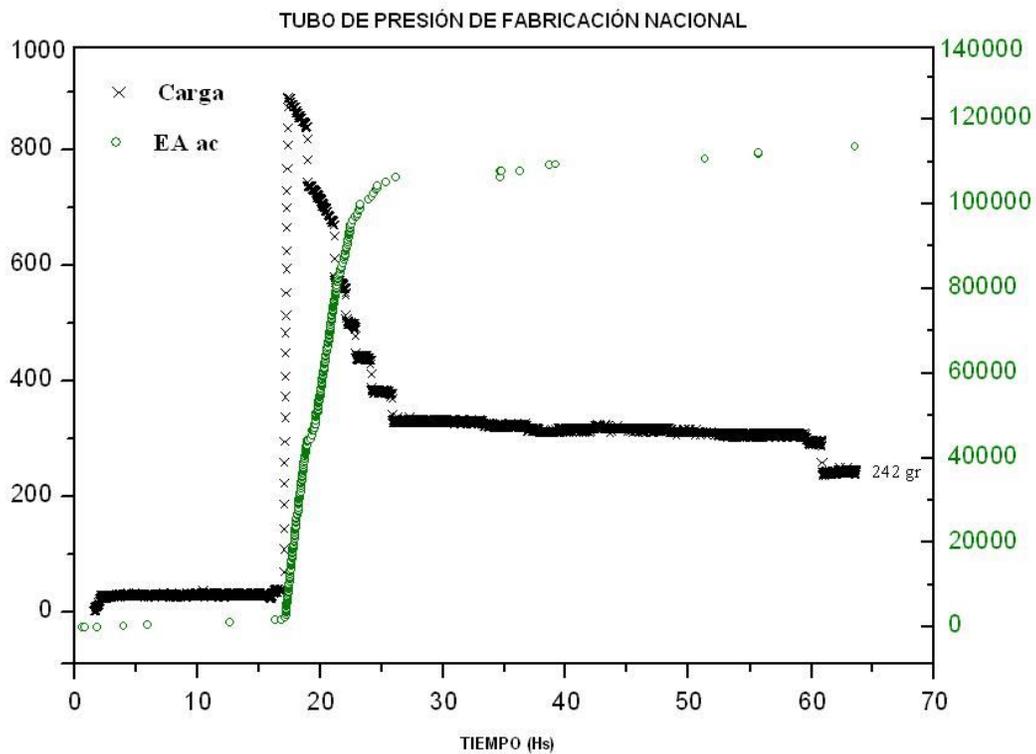
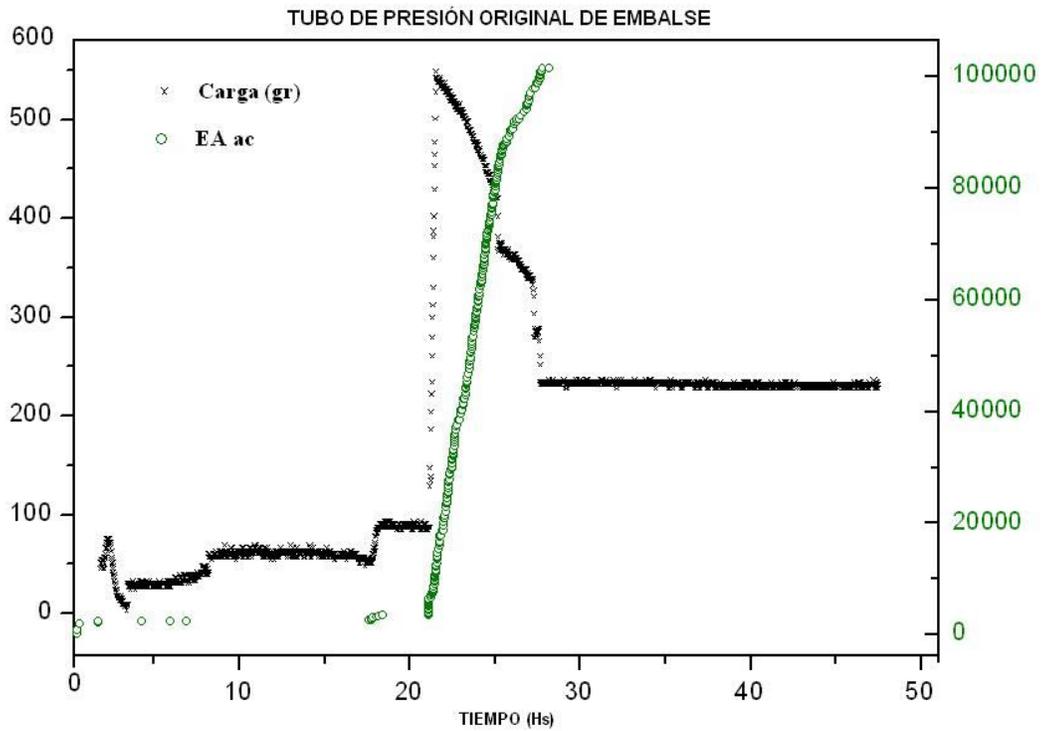
**Figura 2.** Diseño esquemático del aparato para los ensayos de FDH.



**Figura 3.** Metalografía óptica en campo oscuro en la superficie axial normal de la probeta en la zona de entalla, se observa la prefisura y la distribución de hidruros.



**Figura 4.** Metalografía óptica en campo oscuro en la superficie axial normal de la probeta en la zona de entalla luego del ensayo, se observa la prefisura y la redistribución de hidruros.



**Figura 5.** Rampas experimentales de carga, temperatura y emisión acústica durante cada uno de los ensayo cantiléver beam sobre la probeta del tubo original embalse y sobre el tubo de fabricación nacional.