

## FISURACIÓN DIFERIDA POR HIDRÓGENO: ENSAYO CANTILEVER BEAM PARA DETERMINAR $K_{IH}$ EN DIRECCIÓN RADIAL EN TUBOS DE PRESIÓN ZR-2,5% NB TIPO CANDU

A. G. Gómez, W. C. Szieber, M. Ilarri, R. Samper, P. Vizcaíno<sup>(1)</sup>, A. V. Flores, A. D. Banchik

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

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

### RESUMEN

*En el marco del proyecto de desarrollo de la tecnología de fabricación de tubos de presión para reactores CANDU se está trabajando en la puesta a punto del ensayo Cantilever Beam a fin de determinar el factor de intensidades  $K_{IH}$ . Esta determinación permite establecer las condiciones fractomecánicas para el arresto de una fisura que se propaga por de Fisuración Diferida por Hidrógeno (DHC, en inglés) en la dirección radial del tubo.*

*Este ensayo se realiza a temperatura en una probeta hidrurada previamente. Para un factor de intensificación de tensiones  $K_I$  dado la fisura se propagará en la medida que precipiten hidruros en la pre-fisura. Para determinar el factor  $K_{IH}$ , por definición el valor de tensiones ( $K_I$ ) para el cual la propagación de la fisura en la dirección radial se detiene, se aplica un momento flector que produce factores  $K_I$  superiores al valor especificado de  $7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-0.5}$  a  $250^\circ\text{C}$  luego se reduce muy gradualmente el momento hasta el arresto de la fisura donde el valor de  $K_I$  al cual la fisura se detiene es por definición  $K_{IH}$ .*

*En este trabajo se logró detectar la propagación de la fisura mediante EA (emisión acústica) lo cual permite estimar un intervalo de tiempo de propagación*

*En este trabajo se exponen los avances realizados hasta el presente en la detección de la propagación de una fisura y los estudios microestructurales que permiten establecer la forma de propagación de la misma*

**Tópico 2:** Materiales Metálicos

**Palabras clave:** Tubos de presión – DHC.

### 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,

---

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

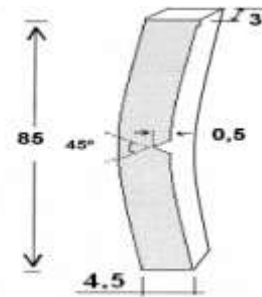
producir la precipitación de una plateleta en dirección radial, con la consiguiente propagación de una fisura a través del mecanismo conocido como fisuración diferida por hidrógeno [1, 2].

En este trabajo se exponen los avances realizados hasta el presente en la detección de la propagación de una fisura empleando el método cantilever beam [2], tendientes a determinar el factor de intensidad de tensiones que garantiza el arresto de una fisura que se propaga en dirección radial según el citado mecanismo,  $K_{IH}$ .

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 El ensayo: dispositivo experimental, corte y preparación de probetas

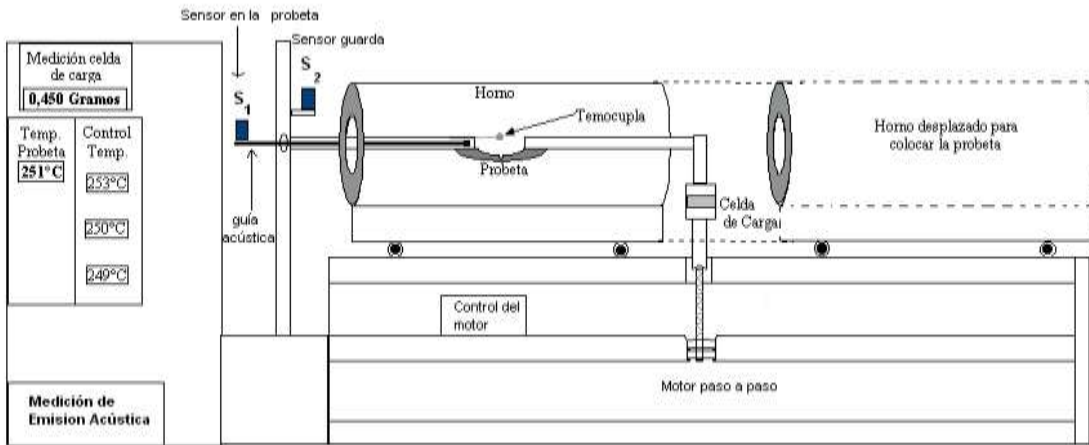
Se cortaron probetas para los estudios de fisuración diferida por hidrógeno en dirección radial del tubo ECLT (Extrudado Corto Laminado y Tratado Térmicamente). La Figura 1 muestra imágenes del una probeta para FDH (Fisuración Diferida por Hidrogeno) y un esquema del corte de dichas probetas.



**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.

Como indica la Figura 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 de manera de generar una distribución uniforme de hidruros a concentraciones que adquiere el tubo en el reactor. La Figura 2 muestra esquemáticamente el diseño del aparato utilizado para los ensayos.

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 60 wppm-H para este tipo de ensayos. En esta etapa del ensayo se incrementa la carga hasta un valor especificado y mediante EA se estima el  $K_I$  de inicio de propagación de la fisura y su velocidad radial.



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

## 2.2 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.

La incorporación de hidrógeno se realizó por medio del método de carga catódica. La probeta (cátodo) se sumerge en una solución diluida de ácido sulfúrico 0,05M, cerrándose el circuito con un ánodo de platino. Ambos electrodos se conectan a una fuente de corriente, mientras la solución diluida se mantiene a una temperatura constante de 80°C. La incorporación de hidrógeno a la probeta es función de la intensidad de corriente, de la relación área/volumen de la probeta y del tiempo de carga, luego de esto es sometida a un tratamiento térmico de manera de generar una difusión de hidrógeno hasta alcanzar las concentraciones buscadas.

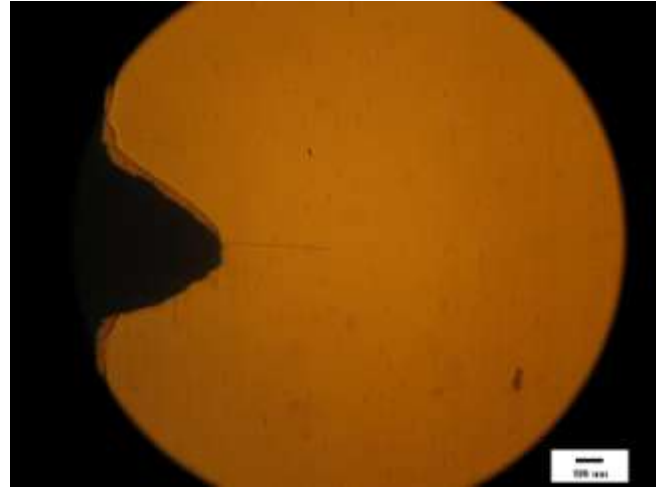
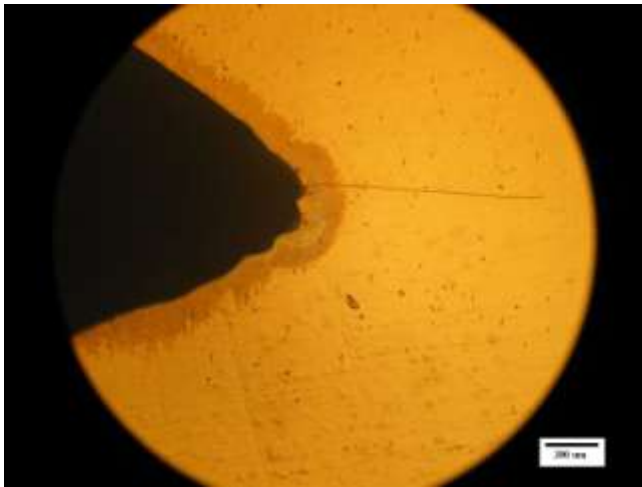
## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Carga de hidrógeno

La carga catódica produce una delgada capa de hidruro de algunas decenas de micrones sobre la superficie de la probeta. El espesor de la misma depende de los valores de corriente y tiempo que dura el proceso. En la Figura 3 se muestra antes y después de la carga catódica. En la imagen de la derecha se observan una capa de hidruros en la región de la superficie interna de la probeta debido a que no difundió totalmente el hidruro luego del tratamiento térmico a 250°C durante 24 horas, las concentraciones de hidrógeno que difunden a ésta temperatura se encuentran en el intervalo de 40-70 wppm-H [5].

### 3.2 Maquinado de la probeta

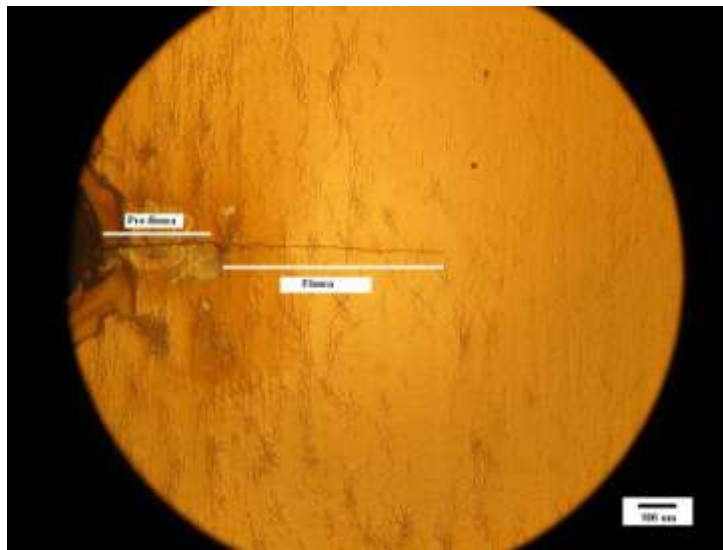
Mediante fatiga mecánica y control de los límites elásticos del material se generó una pre-fisura en la base de la entalla de longitud homogénea en el volumen de la probeta. Figura 3 (izq.)



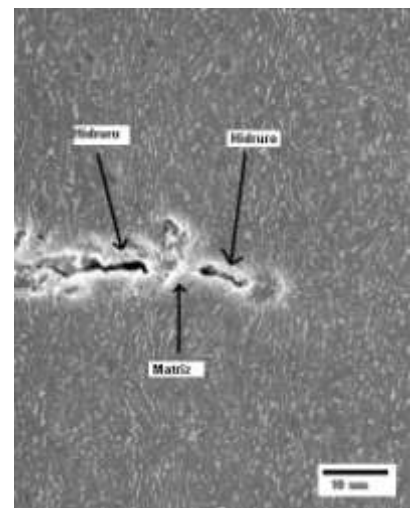
**Figura 3.** La imagen izquierda muestra la probeta con pre-fisura ante de la carga de hidrógeno (*izq*). Distribución de hidruros y capa sin difundir luego de tratamiento térmico (*der.*).

### 3.3 Ensayo Cantilever Beam

Una inspección metalográfica, Figura 4, luego del ensayo muestra un crecimiento de la fisura en dirección radial al tubo, el incremento de la fisura provoco un descenso de la carga el cual se ve reflejado en la Figura 5.



(a)



(b)

**Figura 4.** (a) Metalografía óptica de la zona circundante a la entalla, se observa el crecimiento de la fisura en dirección radial. (b) Micrografía electrónica de barrido en la punta de la fisura muestra la propagación de la fisura asistida por los hidruros.

En la figura 5 se observan las rampas experimentales de temperatura a la que se desarrollo el ensayo, evolución de la carga y señal de emisión acústica detectada durante la experiencia.

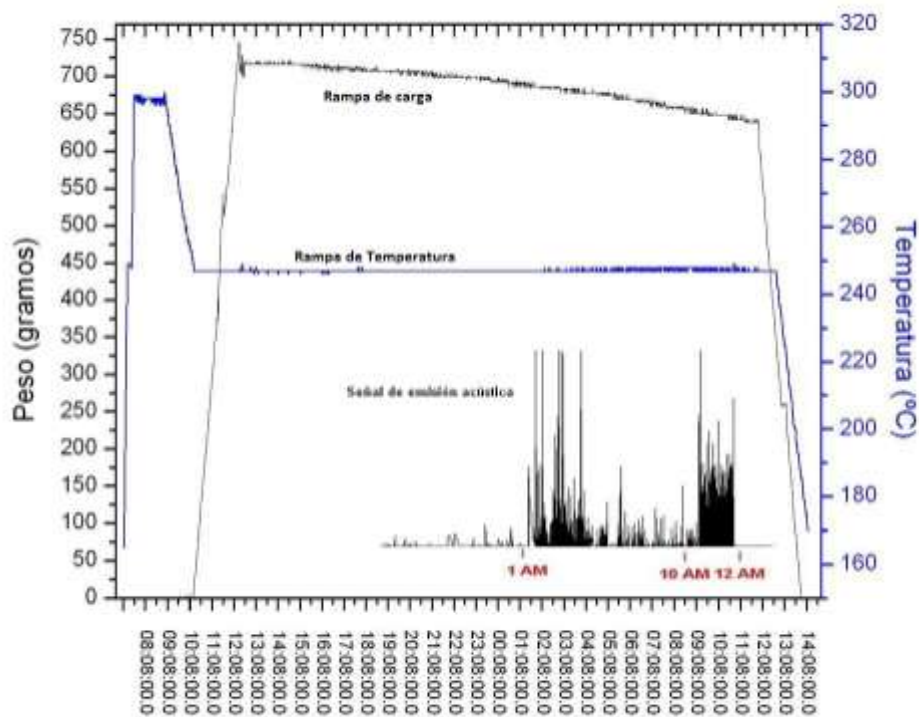
La curva de carga en función del tiempo muestra un descenso debido al incremento de la pre-fisura, la emisión acústica de este crecimiento fue detectado en un intervalo de tiempo de 11 horas, dicha señal de emisión acústica se expone dentro del mismo gráfico de evolución de carga y temperatura en función del tiempo.[Figura 5].

La longitud final de la propagación de la pre-fisura y el tiempo obtenido de la emisión acústica permite establecer una velocidad de propagación de la fisura en dirección radial de los tubos de presión del orden de  $1,7 \cdot 10^{-8}$  m/s.

Otro resultado importante es el poder estimar el intervalo de valores próximos donde se encontraría  $K_{IH}$ , este intervalo se obtiene en base a los valores máximos y mínimos que alcanza la carga dichos valores son  $20 \text{ MPa/m}^{1/2}$  y  $27 \text{ MPa/m}^{1/2}$  respectivamente.

Aún no se logro controlar la propagación de la fisura lo cual permitirá establecer el valor de carga crítico que inicia la propagación y por lo tanto  $K_{IH}$ .

El último paso en el ensayo consistirá en una interacción entre la detección de emisión acústica (propagación de la fisura) y el descenso gradual de la carga, es decir, disminuir la carga hasta no detectar señal de Emisión Acústica (EA) punto en el cual se da el arresto de la misma y es el valor de carga que permite calcular  $K_{IH}$ .



**Figura 5.** Rampas experimentales de carga, temperatura y emisión acústica durante el ensayo cantiléver beam.

#### 4. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden obtener de este trabajo son:

1. Se logro una propagación radial en todo el volumen de la probeta la cual fue asistida por hidruros.
2. Se estimó un intervalo de valores próximo a  $K_{IH}$ .
3. En base a la longitud de la propagación de la fisura y el tiempo de detección de emisión acústica se logró obtener el valor de velocidad de la propagación.

#### 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 Qualification Requirements. Pressure Tube Manufacturer Qualification. CANDU COMMON 00-31110-TD-001. Revision 0.
4. AECL EACL, 'Extruded, cold worked and autoclaved Zr-2.5Nb Pressure Tubes', Technical Specifications. Retube RT-31110-TS-001. Revision 2.
5. J.P. Giroldi, P. Vizcaíno, A.V. Flores, A.D. Banchik. Journal of Alloys and Compounds, 474 (2009) 140-146.