

DEUTERIUM INGRESS AT ROLLED JOINTS IN EMBALSE NUCLEAR POWER PLANT.

¹Ramos Nervi, J. E. ¹ Schroeter, F.
¹Nucleoeléctrica Argentina S.A.

Abstract

Deuterium ingress model at the Rolled Joint has been extensively used for CANDU Nuclear Power Plants Operators in the Life Management of the Pressure Tubes. The importance of understanding the model is vital to avoid delayed hydride cracking at the Rolled Joint. This work reports the first step on develop the model presented on literature to be used in Argentinean CANDU 6, Embalse Nuclear Power Plant.

MODELO DE CAPTACIÓN DE DEUTERIO EN LAS JUNTAS ROLADAS DE LA CENTRAL NUCLEAR EMBALSE.

¹Ramos Nervi, J. E. ¹ Schroeter, F.
¹Nucleoeléctrica Argentina S.A.

Introducción

Los Tubos de Presión de las Centrales tipo CANDU constituyen, en la zona del núcleo del reactor, la superficie límite de presión del Sistema Primario de Transporte de Calor. El refrigerante que circula por su interior es D₂O a 112 atm, la misma atraviesa los Elementos Combustibles de los cuales recibe calor para aumentar su temperatura en promedio de 265 C (Inlet) a 311 C (Outlet). Los tubos son de una aleación Zr-2.5 Nb conectados fuera del núcleo a los “End Fitting” de Acero Inoxidable 403 a través de la Junta Rolada de los extremos del tubo. En las centrales Pickering y Bruce se han reportado fallas de los Tubos Presión por el mecanismo de DHC (delayed hydride cracking), iniciándose la mayoría de éstas en la Junta Rolada. Estas fallas se atribuyeron al alto grado de tensiones residuales que se generaba en el proceso de rolado. Posteriormente se subsanó la situación limitando la zona del rolado disminuyendo los perfiles de tensiones residuales.

Los análisis de “raspado” de los tubos revelan que en los extremos se acumula mayor cantidad de Deuterio respecto de la zona central. Cuando la concentración de deuterio supera el límite de solubilidad, se produce la precipitación de hidruros que son necesarios para la ocurrencia de DHC [1]. Por lo expuesto anteriormente es necesario comprender como se produce la captación de deuterio a lo largo de las Juntas Roladas a través de un modelo semiempírico para lograr una operación más segura e incrementar el tiempo de vida de los tubos.

Durante el segundo ciclo de operación de CNE (Central Nuclear Embalse) se deberá realizar el raspado de los tubos cada seis años aproximadamente acorde a la última revisión de la norma CSA N 285.4. El pos-procesamiento de estos resultados a través del modelo semiempírico permite ajustar la curva de captación de Deuterio utilizada en la evaluación de la vida del tubo y lograr predecir a corto plazo la tendencia de la misma.

Alcance.

En este trabajo se reproduce la metodología de cálculo para hallar la cantidad de Deuterio captada por la Junta Rolada como función del tiempo de uso del tubo en caliente, con distribución constante de captación de deuterio siguiendo la ley de que la tasa de absorción es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo en caliente. De esta forma se busca desarrollar el modelo semi-empírico presentado en la referencia [2] utilizado actualmente en el manejo de vida de los tubos. El modelo se valida con valores presentes en la bibliografía.

Procedimientos.

Se parte de hipótesis básicas utilizadas en la literatura y se plantea que la tasa de ingreso de Deuterio es constante a través de la Junta Rolada. Se plantea la ley de ingreso de Deuterio como la inversa de la raíz cuadrada del tiempo y se integra obteniendo una función que representa la cantidad de Deuterio absorbida en la Junta en función del tiempo de funcionamiento en caliente. Las constantes de la función obtenida $M_{(t)}$ se ajustan con mediciones experimentales publicadas para ensayos de cantidad de deuterio realizadas en Bruce y Pickering. Dicho ajuste se logra a través de la técnica de cuadrados mínimos no-lineales programado en Compaq Visual Fortran 6.6.

Fuentes de Deuterio

Según trabajos realizados por AECL en “Chalk River Laboratory”, las fuentes de Deuterio que contribuyen al ingreso en la Junta Rolada son:

- Deuterio proveniente de la reacción de corrosión con el refrigerante:
 $Zr + 2D_2O \rightarrow ZrO_2 + 4D$.
- Deuterio proveniente de la corrosión Galvánica y Crevice entre el End-Fitting de Acero Inoxidable 403 y el Tubo de Presión de Zr-2.5Nb.

La captación de Deuterio en la Junta Rolada debido al Crevice o Corrosión Generalizada, es una fuente adicional de ingreso de Deuterio hacia el centro del tubo. Por lo tanto podríamos dividir el perfil de ingreso de Deuterio a lo largo de todo el tubo como la suma de dos componentes como se representa en la Figura 1. La primera es uniforme a lo largo de la longitud del tubo y es causada por la corrosión uniforme de la aleación de Zr-2.5Nb mediante la reacción: $Zr + 2D_2O \rightarrow ZrO_2 + 4D$. La segunda es una componente variable porque depende de la distancia al final de Tubo de Presión. Esta última es la denominada contribución por la Junta Rolada debido a los efectos de Crevice y Corrosión Galvánica. Como la temperatura del refrigerante en el ingreso al Tubo de Presión es menor que a la salida, las cantidades de Deuterio absorbidas en la parte de ingreso (Inlet) son menores que a la salida (Outlet). De esta forma si se obtienen valores de cantidad de Deuterio en la Junta Rolada pueden calcularse cotas experimentales para el comportamiento de toda una población de tubos. Tomando el modelo semiempírico de Captura de Deuterio y ajustándolo para los valores máximos y mínimos de dicha población, pueden obtenerse cotas que son extrapolables para predecir el comportamiento de manera más asertiva que tomando datos de tubos en forma aislada tanto para las juntas Outlet como Inlet.

Con esta partición en la fuente de Deuterio del Tubo, se puede hallar la cantidad de Deuterio absorbida en la Junta Rolada por causa del Crevice y Corrosión Galvánica, restando los valores totales obtenidos en el raspaje y los valores de Deuterio fuera de la Junta Rolada donde únicamente se ve la contribución por Corrosión Uniforme del tubo en contacto con el medio acuoso, es decir, se resta la componente uniforme a la variable.

Desarrollo y Validación del Modelo.

Dado un tubo de densidad ρ , espesor w y radio r , las hipótesis del modelo son las siguientes:

- distribución constante de captación de deuterio en la Junta Rolada del Tubo de Presión cuya zona de captación axial es de $\lambda=50\text{mm}$;
- tasa de absorción de Deuterio ($R_{(t)}$) en la junta rolada inversamente proporcional al crecimiento de la capa de óxido. Éste último sigue una ley inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo:

$$R(t) = \frac{F(\text{distribución del ingreso de deuterio})}{a\sqrt{t+b}} \quad \text{ec.1}$$

Donde a y b son constantes que se ajustan de los valores experimentales, la tasa de ingreso de deuterio es el cociente entre la masa absorbida y la masa de la junta rolada por unidad de tiempo t.

Los coeficientes a y b deben ser determinados al integrar la ec.1 y su posterior ajuste de los valores del raspaje (cantidad total de Deuterio captado en el tiempo de funcionamiento t en caliente de la planta) con el método de cuadrados mínimos no lineales. Por lo tanto la cantidad de deuterio total absorbida $M_{(t)}$ es:

$$M_{(t)} = \int \frac{1}{(a\sqrt{t+b})} dt \quad ec.2$$

Integrando en el tiempo la ec.2 se obtiene una expresión de nuestro modelo:

$$M_{(t)} = 2\pi r w \lambda \rho \beta (\alpha\sqrt{t} - \ln(1 + \alpha\sqrt{t})) + \delta \quad ec.3$$

Donde las constantes α , β y δ dependen de las características geométricas del tubo, β y α son constantes que dependen de a y b en la ec. 1.

$$\alpha = \frac{a}{b} \quad ec.4$$

$$\beta = \frac{2b}{a^2} \quad ec.5$$

Con las ecuaciones 4 y 5 es posible obtener finalmente $R_{(t)}$.
Aplicando la condición inicial a la ec.3 se obtiene

$$M_{(0)} = 0 \quad ec.6$$

Con lo cual $\delta=0$ en la ecuación 3.

Al aplicar la condición inicial (ec.6) a la ec.3, se observa que coincide con la expresión reportada por en [2].

Por último, la ec.3 se ha reescrito y trabajado con cuadrados mínimos no lineales. Tomando valores de tiempo y de cantidad de Deuterio absorbida de las curvas obtenidas en [2], se ajustó la curva de la ec.3 y se obtuvo la figura Figura 2 donde se observa que la cantidad de deuterio absorbido en la Junta Rolada del Tubo de Presión de la Central Nuclear Pickering y Bruce. Los Rombos corresponden a los valores experimentales de los ensayos de captación de deuterio total en la junta Inlet de Pickering. En línea sólida se representa el modelo semiempírico y en discontinua el de la referencia [2]. Como puede observarse los valores experimentales de Pickering no presentan grandes diferencias con la representación de la ec.3 por lo que sirve de validación inicial. Se observa que el modelo de la referencia [2] concuerda con el modelo de la ec.3. Cabe destacar que los valores de cantidad de deuterio corresponden a valores promedio en las respectivas centrales. En la misma figura se representa el ajuste de la ec.3 respecto a los valores publicados en la referencia [2] para la central Bruce observándose gran concordancia.

En la Figura 3 se observan los valores experimentales para la Central Bruce del lado Inlet y Outlet. Se observa en línea sólida gruesa la representación de la ec. 3, observándose que la ley de la tasa de ingreso inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo según ec.1 es adecuada para ajustar la dispersión de valores experimentales.

Realizando ajustes del modelo semiempírico pueden realizarse mapas como la Figura 3 que caracterizan el ingreso de Deuterio en la junta Rolada. Dichos mapas se utilizan para el manejo de Vida de los Tubos [3].

Conclusiones.

- ✓ Se observó un buen ajuste del modelo semi-empírico desarrollado con los valores publicados en la literatura. Este hecho se ha utilizado para validar la reproducción del modelo.
- ✓ Los valores experimentales de absorción de Deuterio en la Junta Rolada siguen la tendencia de la ley inversa del tiempo (ec.1).
- ✓ Este modelo es una herramienta a ser utilizada en la predicción de valores de absorción de Deuterio en la Junta Rolada y utilizado en el manejo de vida de los tubos en el nuevo ciclo de vida de CNE.

Trabajo en Progreso.

Mejorar el modelo considerando distintas distribuciones de captación de Deuterio y obtención de los perfiles de distribución con respecto a la longitud del tubo mediante la resolución de las ecuaciones de transporte.

Referencias.

- [1] R.A. Enrique, Modelado de la precipitación de Hidruros en Aleaciones de Circonio. Trabajo Especial Carrera de Licenciatura en Física, Instituto Balseiro, diciembre 1994.
- [2] V.F. Urbanic, G.M. McDougall, A.J. White, A.A. Bahurmuz, "Deuterium Ingress at Rolled Joints in Candu Reactors". Int. Conf. on Expanded and Rolled Joint Technology, 1993 september 13 and 14, Toronto, Ontario, Canada.
- [3] M.B. Elmoselni, A.A. Bahurmuz, Deuterium Buildup in the rolled joint regions of operating CANDU pressure tubes.

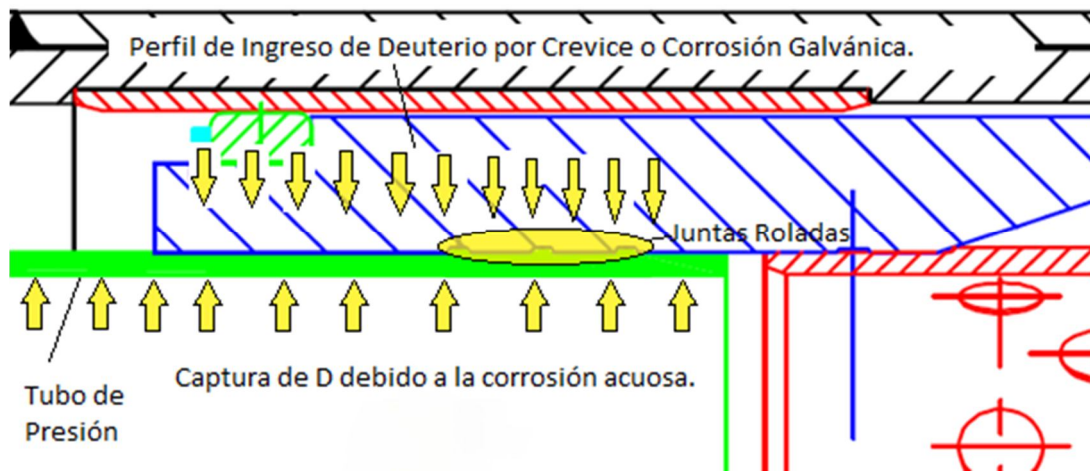


Figura 1. Esquema de Fuentes de Deuterio en el Tubo de Presión. En la parte interna del tubo, se produce corrosión acuosa. En la parte externa, el Deuterio proviene de las reacciones de corrosión por Crevice y Corrosión Galvánica producto de la junta con el End-Fitting.

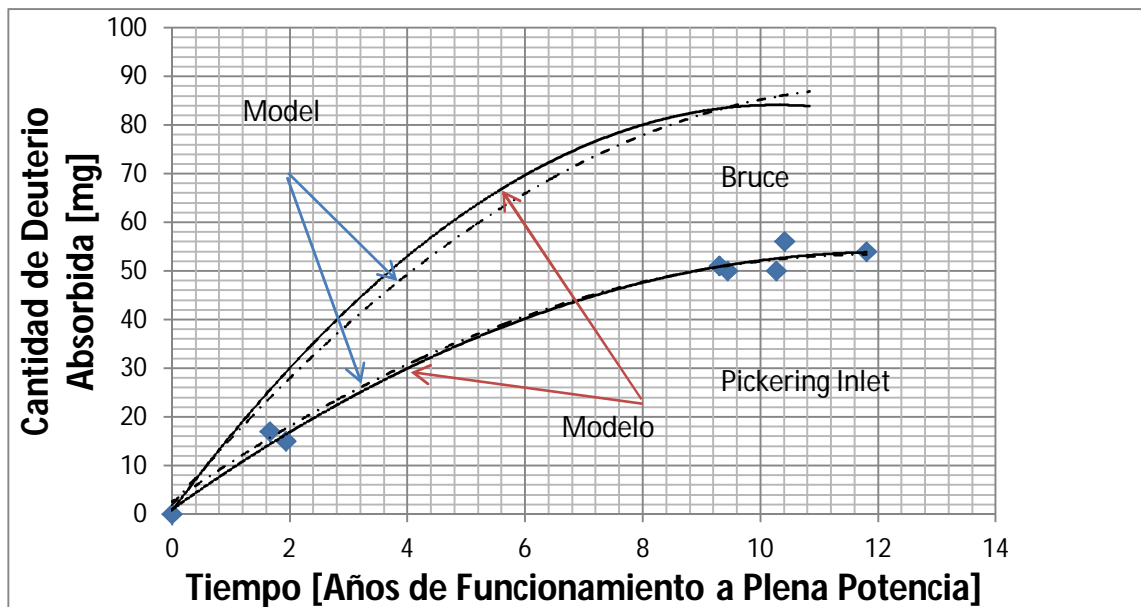


Figura 2. Validación de la ec.3 y de la metodología de cuadrados mínimos no lineales (representados por las líneas sólidas "Modelo Semiempírico"). Se observan valores experimentales para canales promedio en Pickering Inlet obtenidos de la bibliografía. Se representa en línea discontinua los valores reportados en [2]. Se observa que el modelo semiempírico ajusta a los valores experimentales de Pickering Inlet y no presenta grandes diferencias con el modelo de [2] en el caso de Bruce Inlet.

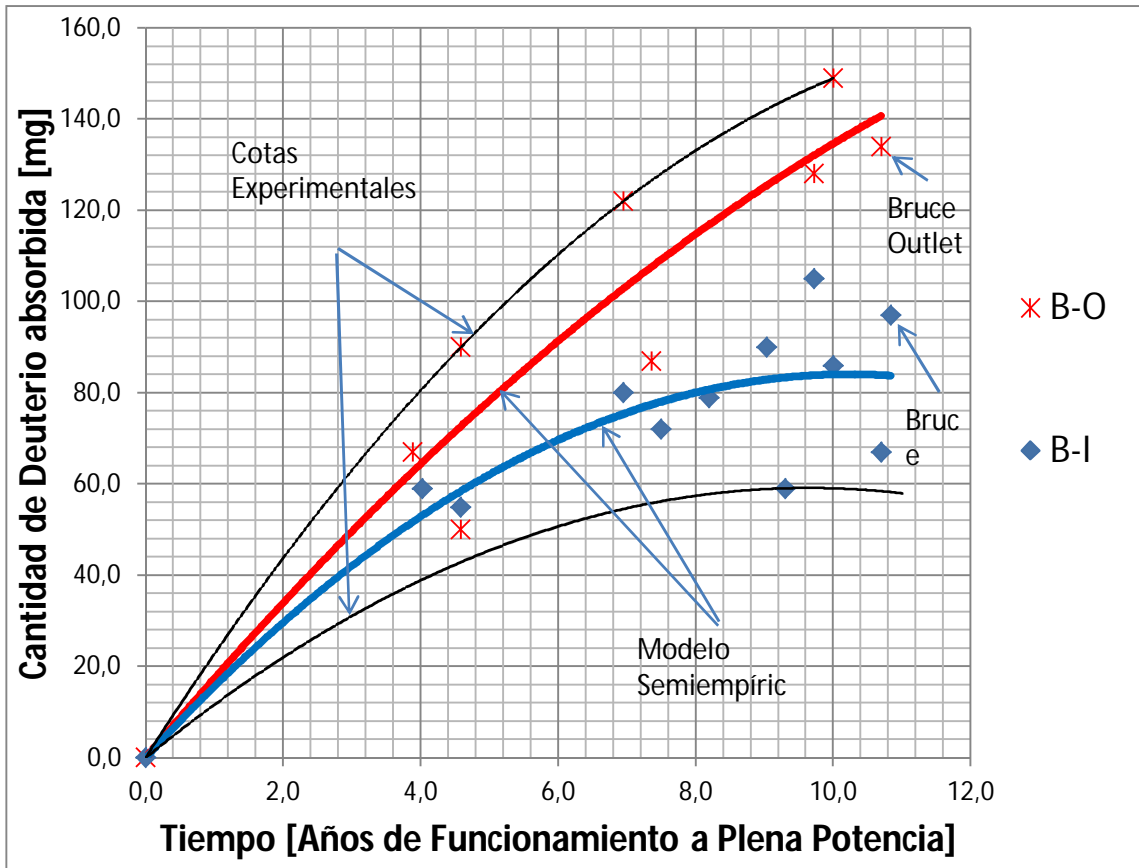


Figura 3. Ajustes y cotas experimentales de los valores promedio de la Central Bruce lados Inlet y Outlet. Se observa que el modelo semiempírico basado en la ec.1 ajusta dentro de los valores experimentales.