

DETERMINACIÓN DE TENSIONES POR CRECIMIENTO DIFERENCIAL BAJO IRRADIACION EN ZONA DE BAJA TEMPERATURA EN EL NUCLEO DE UN REACTOR EXPERIMENTAL MEDIANTE EL CÓDIGO DIONISIO

DETERMINATION OF STRESSES BY DIFFERENTIAL GROWTH UNDER IRRADIATION AT THE LOW TEMPERATURE ZONE IN THE CORE OF AN EXPERIMENTAL REACTOR USING THE DIONISIO CODE

Ezequiel Goldberg^a, Javier Kees^b, Esteban A. Estévez^b y Alejandro Soba^a

^a *Sección Códigos y Modelos, Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear, Comisión Nacional de Energía Atómica, <http://www.cnea.gov.ar/>, ezequielgoldberg@cnea.gov.ar, soba@cnea.gov.ar*

^b *División Diseño e Ingeniería de Elementos Combustibles, Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear, Comisión Nacional de Energía Atómica, <http://www.cnea.gov.ar/>, javier.kees@cab.cnea.gov.ar, estevez@cab.cnea.gov.ar*

Palabras clave: placas, Zircaloy, elementos finitos, combustibles nucleares.

Resumen. Es conocida la deformación sin cambio de volumen bajo el flujo de neutrones de alta energía y en ausencia de tensiones aplicadas, fenómeno denominado crecimiento bajo irradiación. Para constituir las cubas y los soportes que encierran a los elementos combustibles de reactores de investigación se han propuesto como candidatos materiales como el circonio y sus aleaciones, que tienen un comportamiento anisotrópico. Es necesario determinar si las altas fluencias neutrónicas, a relativamente bajas temperaturas (40 °C), pueden provocar una aceleración de su ritmo de deformación, como sucede por efecto de las altas temperaturas obtenidas en reactores de potencia bajo irradiación (300 °C aproximadamente) (el llamado breakaway de los Zircaloy recristalizados). Para vincular la deformación con la fluencia neutrónica se adoptó una relación empírica basada en modelos y datos experimentales hallados en la literatura. Los resultados evidencian claramente que las tensiones en la dirección axial son considerablemente mayores que en la dirección transversal, tal como era de esperar debido a que la textura del material se encuentra orientada en la dirección longitudinal (z) de la placa. Se observa que la intensidad de las tensiones que se producen en la placa se relaciona con la distribución de irradiación no uniforme a la que ella es sometida, concentrándose inicialmente en el centro de la zona activa (zona de mayor fluencia) para propagarse posteriormente hacia los contornos.

Keywords: plates, Zircaloy, finite elements, nuclear fuels.

Abstract. Deformation without volume change under high energy neutron fluxes and in the absence of applied voltages is a known phenomenon, called growth under irradiation. To constitute the vats and supports that enclose the fuel elements of research reactors, materials such as zirconium and its alloys, which have anisotropic behavior, have been proposed as candidates. It is necessary to determine if the high neutron fluences, at relatively low temperatures (40°C), can cause an acceleration of their deformation rate, as happens due to high temperatures obtained in power reactors under irradiation (300 °C approximately) (the so-called breakaway of the recrystallized Zircaloy). To link the deformation with the neutron fluence, an empirical relationship was adopted based on models and experimental data found in the literature. The results clearly show that the stresses in the axial direction are considerably greater than in the transverse direction, as expected because the texture of the material is oriented in the longitudinal direction (z) of the plate. It is observed that the intensity of the stresses that occur in the plate is related to the distribution of non-uniform irradiation to which it is subjected, concentrating initially in the center of the active zone (area of greater fluence) to later propagate to its contours.

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento bajo irradiación de los elementos que componen los combustibles nucleares es un fenómeno que conlleva una deformación sin alteración del volumen, bajo los efectos del flujo de neutrones de alta energía, sin contar con tensiones externas aplicadas. Este proceso debió ser considerado en el diseño y desarrollo de cubas y soportes que encierran a los elementos combustibles de reactores de investigación. Materiales como el circonio y sus aleaciones, que presentan comportamiento anisotrópico, se han sugerido como candidatos. Resulta necesario comprobar si puede ocurrir una aceleración del ritmo de deformación, producto de las altas fluencias neutrónicas, como ocurre bajo altas temperaturas (el llamado breakaway de los Zircaloy recristalizados) (Fidleris, 1987). Esto permitiría evaluar el comportamiento de estos componentes con tiempo suficiente para prevenir posibles daños y aumentar la eficiencia, la seguridad de las instalaciones y, eventualmente, la extensión de su vida útil.

Es escaso en la literatura el reporte de modelos que den cuenta de este crecimiento para bajas temperaturas y altas fluencias. Los datos conocidos para altas fluencias neutrónicas y a temperaturas alrededor de los 80 °C muestran un comportamiento estacionario hasta fluencias de 1.8×10^{18} n/cm² (Fidleris, 1987). Otros modelos señalan a bajas temperaturas crecimientos apreciables hasta una fluencia de aproximadamente 1×10^{20} n/cm² (Rogerson, 1988), (Fortis, 2004) punto en el que se alcanza una condición estacionaria, de muy bajo crecimiento hasta que comienza un incremento notorio de la velocidad de crecimiento que no depende mayormente de las variaciones del flujo neutrónico (breakaway).

2 MÉTODOS

2.1 Geometría

En la Fig. 1 se presenta el esquema básico de los vínculos externos y sus ubicaciones en la placa de Zry-4. En la misma figura se muestran los ejes de referencia; el eje x tiene la dirección del ancho de la placa (w), con su cero en el plano medio; el eje z tiene la dirección longitudinal de la placa ($L = 3,9120 w$), con su cero a una distancia Z_i , equivalente a $0,3034 L$ del borde inferior. La flecha en el centro de la placa indica el eje de textura del material. El eje y, que no se aprecia en la Fig. 1, tiene la dirección del espesor de la placa ($h = 0,0611 w$).

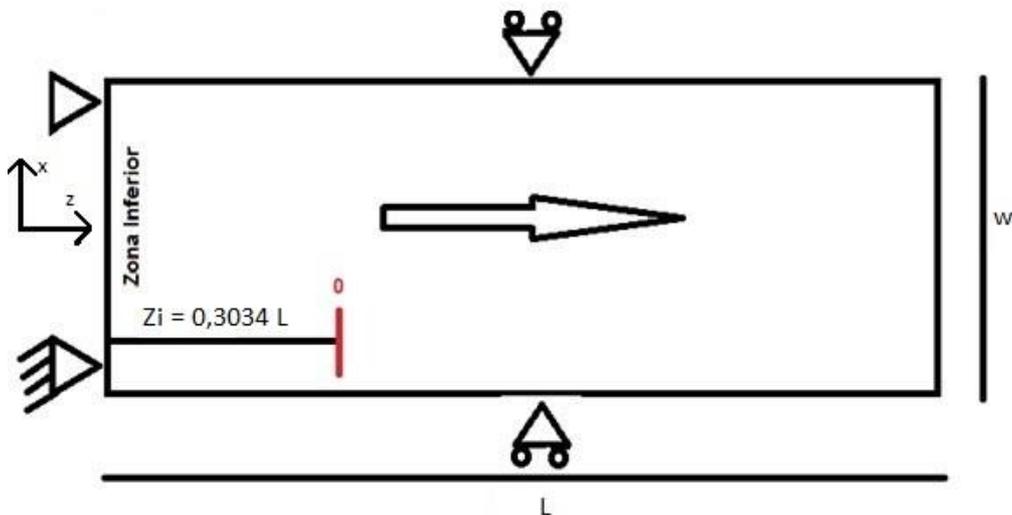


Fig. 1 Dimensiones de la placa y condiciones de vínculo.

2.2 Fluencia y Flujo Neutrónico

En la Fig. 2, se presenta el flujo neutrónico rápido (energías superiores a 0.8MEV) en función de la dirección axial z , recibido por cada una de las zonas en las que se divide la placa en dirección x . Hemos propuesto una división en franjas de ancho uniforme. Para determinar la fluencia en relación con la deformación, se adoptó la relación empírica dada en la Fig. 3. Cabe aclarar que los modelos y datos experimentales hallados en la literatura (Fidleris, 1987; Rogerson, 1988) coinciden con los valores estimados mediante esa correlación. En particular, para este trabajo se ha tenido en cuenta que la textura del material se encuentra orientada en la dirección longitudinal (z) de la placa, por lo que, en el transcurso de la irradiación, la deformación será una expansión en la dirección axial y una contracción en la dirección transversal. Se supone una deformación creciente en la dirección del espesor de la placa, para preservar la conservación del volumen. Se considera el crecimiento en la dirección axial con un valor del 82% de aquel predicho por la Fig. 3, en base a lo establecido experimentalmente para Zircaloy en (Fidleris, 1988). De la misma forma, la deformación equivalente en la sección transversal se considera plana, homogénea y decreciente, con valores absolutos del orden del 20% de lo representado en la Fig. 3.

Respecto de la ley constitutiva utilizada, es necesario aclarar que los factores que influyen en el comportamiento del material bajo irradiación son (Murgatroyd and Rogerson, 1979): textura del material, fluencia neutrónica, temperatura y grado del trabajo en frío del material. El límite de crecimiento se produce aproximadamente entre 1×10^{21} y 3×10^{21} n/cm^2 según lo observado en (Adamson, 1977). Para muestras de placas recocidas, el valor máximo de crecimiento en la dirección paralela a la de laminación es de aproximadamente entre 0.04 y 0.05% para una temperatura de 100 °C (Adamson, 1977).

El mecanismo de crecimiento para las aleaciones de circonio está fuertemente relacionado a la microestructura. Para materiales trabajados en frío el crecimiento por irradiación es mayor que para el material recocido y la magnitud depende de la deformación en frío. Esquemáticamente, el material trabajado en frío crece linealmente con la fluencia, mientras que el material recristalizado crece en 3 etapas con una instancia final denominada *breakaway*. Para temperaturas por debajo de los 80 °C y hasta el valor de fluencia estudiada (1×10^{21} n/cm^2), no se registra el fenómeno de *breakaway*. En los casos en los que sí se presenta el fenómeno, no aparece el efecto de saturación del crecimiento (segundo *plateau*). Hasta las fluencias del orden de 3×10^{21} n/cm^2 el comportamiento se condice con el indicado en la ley utilizada en este trabajo, para una temperatura de 350 K. Este comportamiento con valores de crecimiento inferiores a 0.1% a temperaturas de 330 K, se observa hasta fluencias de al menos 1.4×10^{22} n/cm^2 (Zirat, 2012; Holt, 1988; Fidleris, 1987).

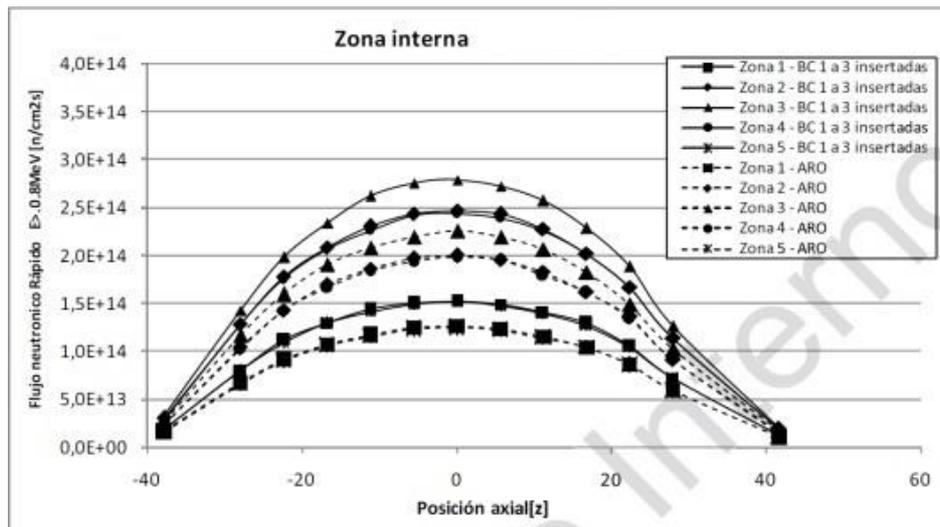


Fig. 2 Flujo neutrónico a través de la caja guía.



Fig. 3 Curva de crecimiento considerada para el estudio [1].

De acuerdo con las características de la placa y las condiciones de evaluación, se realizó un mapa de distribución de flujo en volumen en la zona activa, esto es un rectángulo de $w \times 1,9560w$ a partir de una altura de $0,0534L$ desde el borde inferior de la placa, que corresponde a valores de z entre $-0,9780 w$ y $+0,9780 w$. En las zonas fuera del sector de irradiación se estableció un flujo residual mínimo, entre esos valores y 1×10^9 n/cm² (ver Fig. 2). En la Fig. 4, la Fig. 5 y la Fig. 6 se observan los mapas de flujo y de fluencia en la zona activa en dos modos. El modo 1 establece valores discretos de flujo por zona y el modo 2 adopta un ajuste mediante una función cosenoidal, con el que se logra una variación suave del flujo al recorrer el ancho de la placa (dirección x).

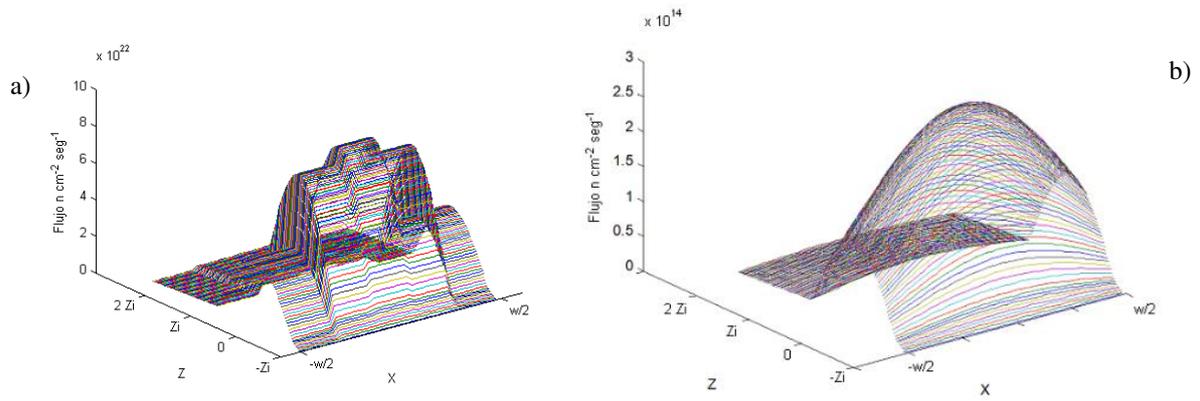


Fig. 4 a) Flujo aplicado sobre la placa en forma de función discreta. Se distingue claramente la diferencia de flujos que reciben las zonas 1 – 5, 2 – 4 y 3. b) Ajuste, utilizando una función cosenoidal, para suavizar el pasaje entre zonas.

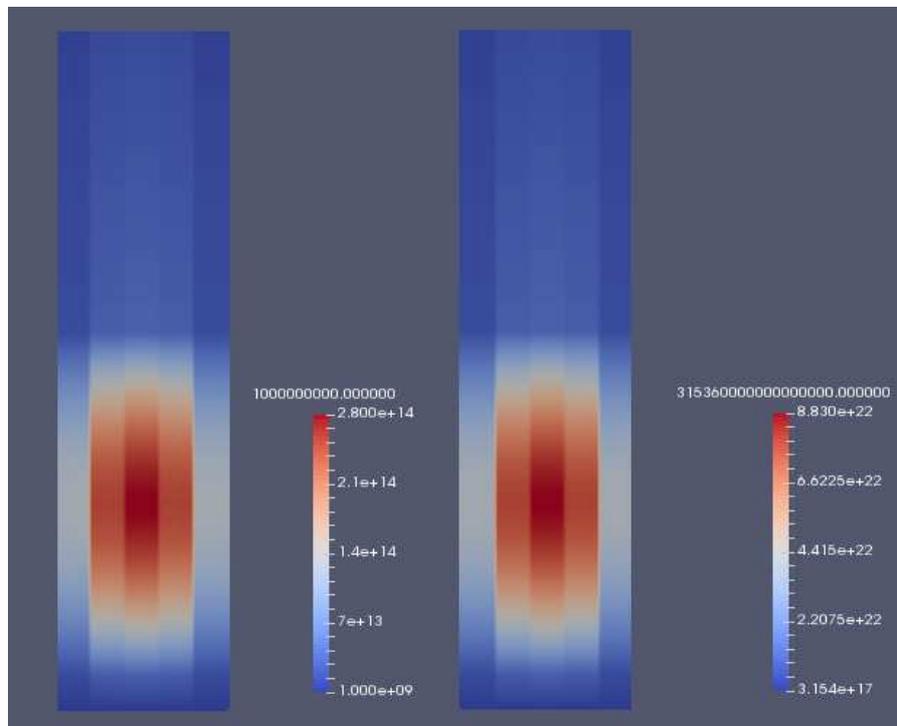


Fig. 5 Mapas de flujo (izquierda), medido en $n/(cm^2 s)$, y fluencia (derecha), medida en n/cm^2 , aplicados sobre la placa según el modo 1.

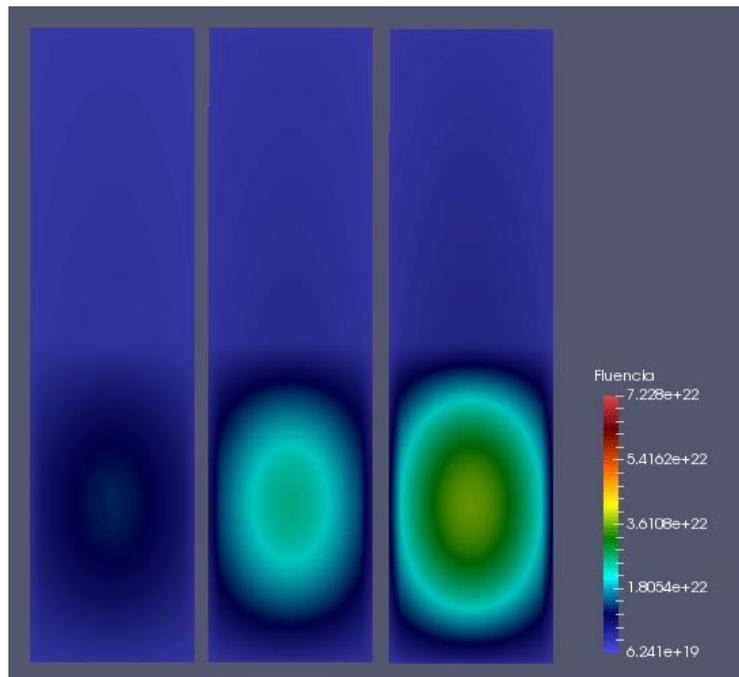


Fig. 6 Fluencia aplicada sobre la placa, medida en n/cm², según el modo 2, para tres instantes: 1000, 2000 y 3000 días.

3 RESULTADOS

En primera instancia, se realizó una batería de pruebas para obtener parámetros ideales del modelo respecto de densidad del mallado de elementos finitos, precisión de los resultados y tiempo de ejecución. Una vez terminada esta etapa, se procedió a evaluar los resultados obtenidos con el modelo respecto de las variaciones en las dimensiones de la placa y los cambios en los valores y las distribuciones de las tensiones que ocurren como consecuencia del flujo neutrónico.

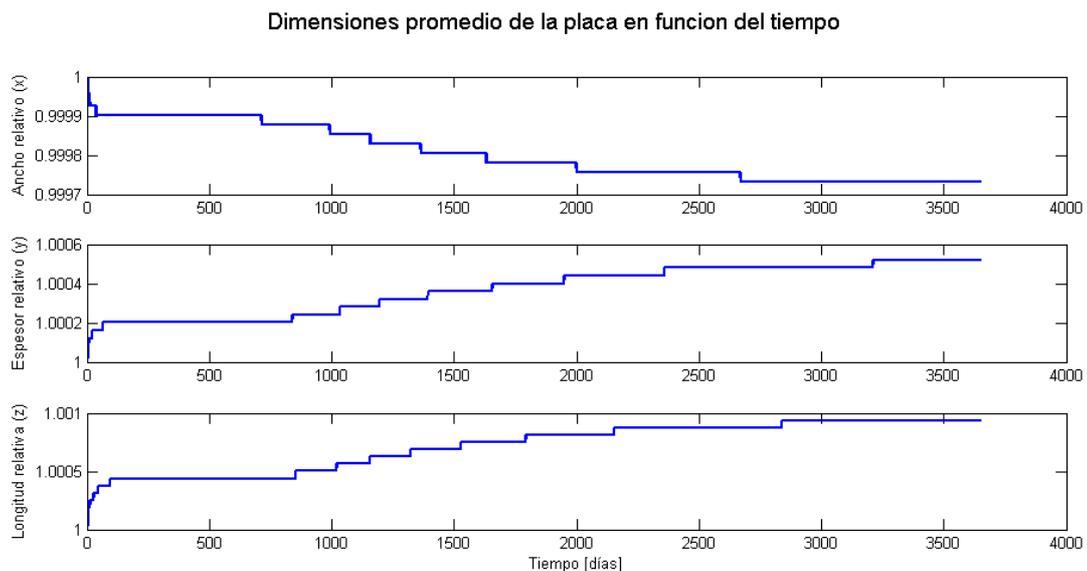


Fig. 7 Variación relativa en las dimensiones promedio de la placa en función del tiempo a lo largo de un proceso de irradiación de 10 años en el modo 2 de fluencia aplicada.

En la Fig. 7 se puede ver claramente que, al cabo de 10 años de irradiación, la placa alcanza un crecimiento longitudinal (dirección z) de aproximadamente 0,1%, acompañado de un decrecimiento transversal (dirección x) de aproximadamente 0,025% y del correspondiente crecimiento en el espesor (dirección y), aproximadamente 0,05%.

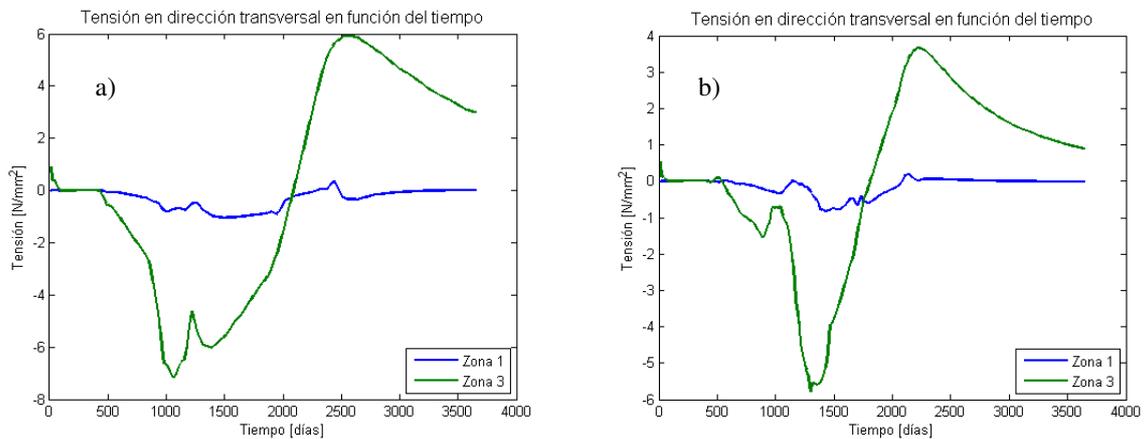


Fig. 8 Componente de tensión σ_{xx} en las zonas 1 (azul) y 3 (verde) de la placa en el centro de la región activa. a) para el modo 1, b) para el modo 2.

Como consecuencia de la condición de contracción en las direcciones transversales, inicialmente se producen tensiones de compresión, principalmente en el interior de la placa, como se muestra en la Fig. 8. Posteriormente, las deformaciones y tensiones en otras direcciones producen una relajación y la aparición de una tensión de tracción en la dirección transversal. En la Fig. 9 se presenta la deformación efectiva en función del tiempo. Puede notarse cómo los picos de máxima tensión coinciden, en el caso del modo 2 suavizado, con las variaciones de las pendientes en la función de deformación.

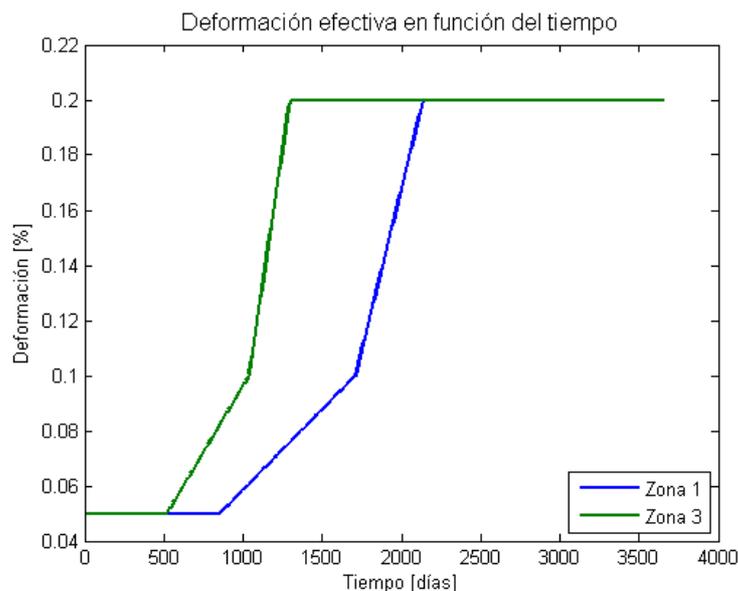


Fig. 9 Deformación efectiva en función del tiempo, según el modo 2, en las zonas 1 (azul) y 3 (verde) de la placa en dirección xx en el centro de la región activa.

En la Fig. 10 a) y b) se puede observar el mapa de tensiones en dirección transversal sobre la placa para tres instantes distintos. Las tensiones comienzan en la zona de máxima fluencia para luego propagarse hacia los contornos de la zona activa.

Respecto de la dirección axial, las tensiones producidas son considerablemente mayores, alcanzando valores de hasta 50 N/mm^2 en el modo 1 y de 70 N/mm^2 en el modo 2. La evolución en el tiempo de las tensiones se asemeja a la previamente observada en las direcciones transversales, concentrándose inicialmente en el centro de la zona activa para propagarse posteriormente hacia los contornos de la misma. Para esta dirección, se puede observar, tal como se muestra en la Fig. 11 a) y b) y en la Fig. 12 a) y b), que se producen tensiones de tracción en las zonas laterales y de compresión en la zona central de la placa.

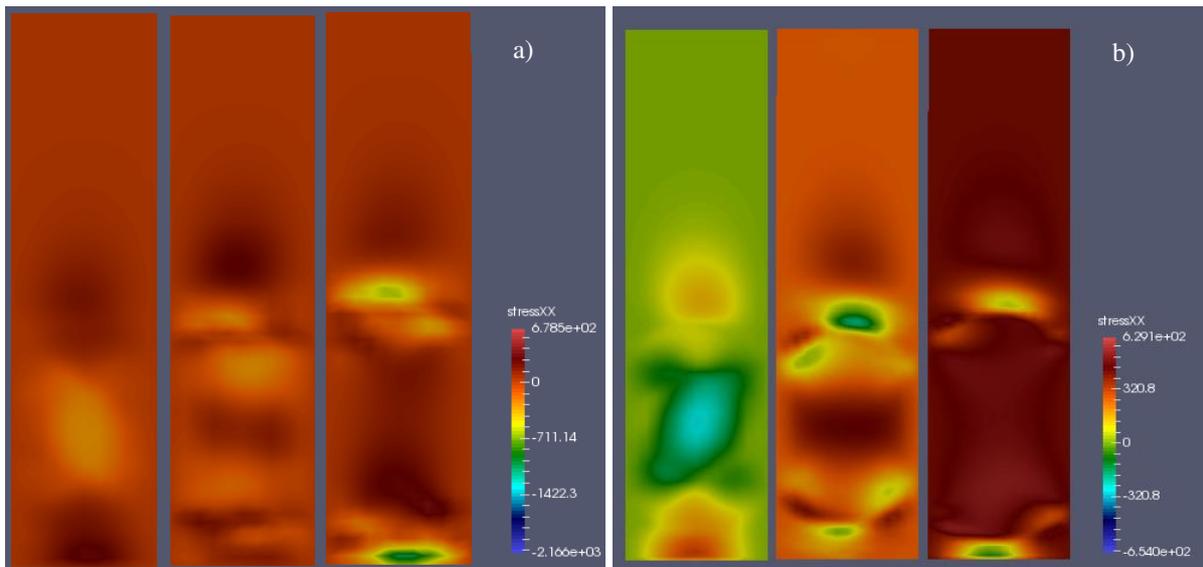


Fig. 10 Mapa de la componente de tensión σ_{xx} , en N/cm^2 , para la placa completa al cabo de diferentes tiempos de irradiación. Izquierda: 1000 días; medio: 2000 días; derecha: 3650 días. a) modo 1; b) modo 2.

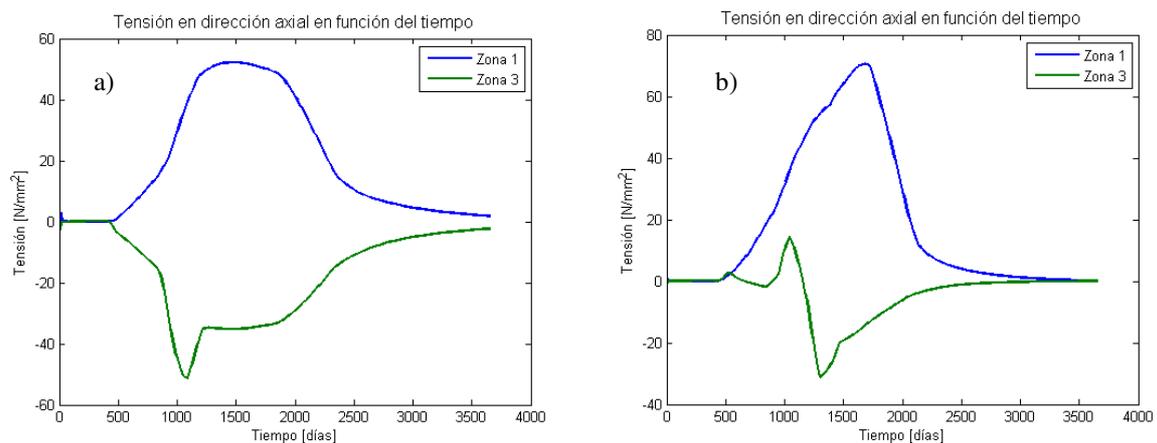


Fig. 11 Componente de tensión σ_{zz} en las zonas 1 (azul) y 3 (verde) de la placa en el centro de la región activa. a) modo 1, b) modo 2.

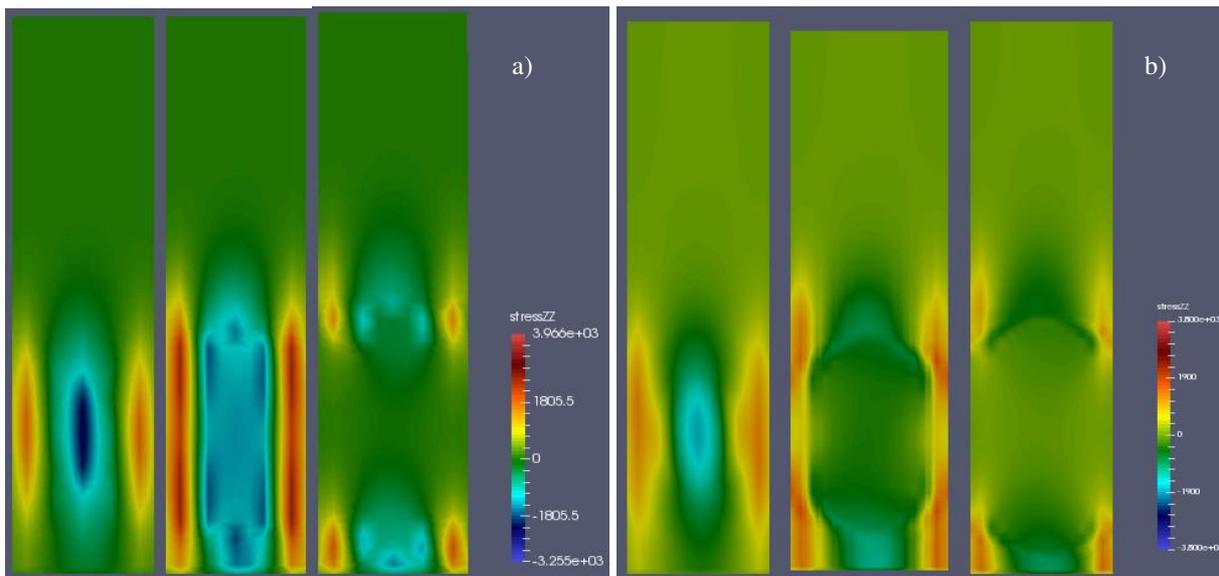


Fig. 12 Mapa de la componente de tensión σ_{zz} , en N/cm^2 , para la placa completa al cabo de diferentes tiempos de irradiación. Izquierda: 1000 días; medio: 2000 días; derecha: 3650 días. a) modo 1; b) modo 2.

Finalmente, la tensión efectiva sigue las formas funcionales de la tensión en la dirección axial en todas las zonas, ya que esta última es la componente que posee mayor valor absoluto. En la Fig. 13 se puede observar que la tensión efectiva en las zonas externas y en el interior de la placa tienen patrones de crecimiento y decrecimiento similares, con la diferencia de que la tensión en las zonas exteriores (zona 1) de la placa alcanza valores más elevados hacia la mitad del proceso de irradiación. Se observa que persiste el incremento inicial de tensión en la zona de máxima fluencia y su posterior propagación hacia los contornos de la zona activa, como se muestra en la Fig. 14 a) y b).

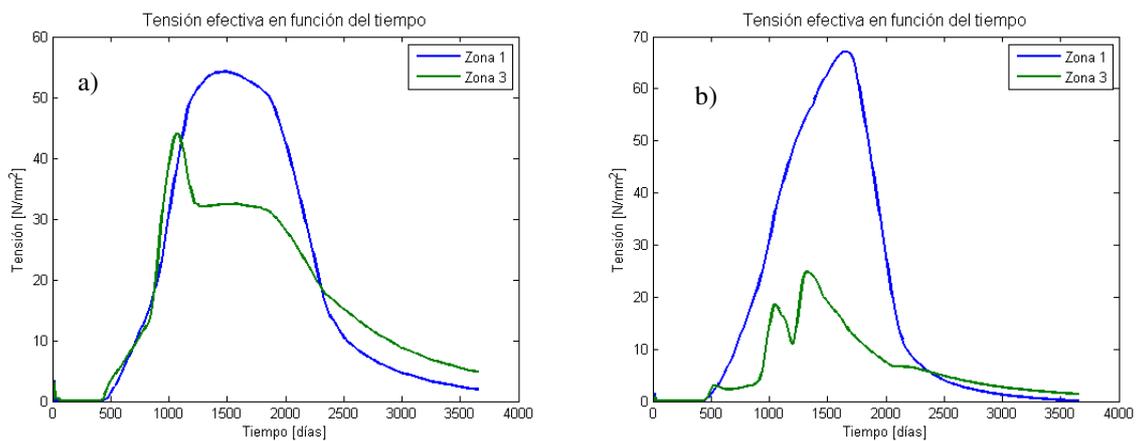


Fig. 13 Tensión efectiva en las zonas 1 (azul) y 3 (verde) de la placa en el centro de la región activa. a) modo 1; b) modo 2.

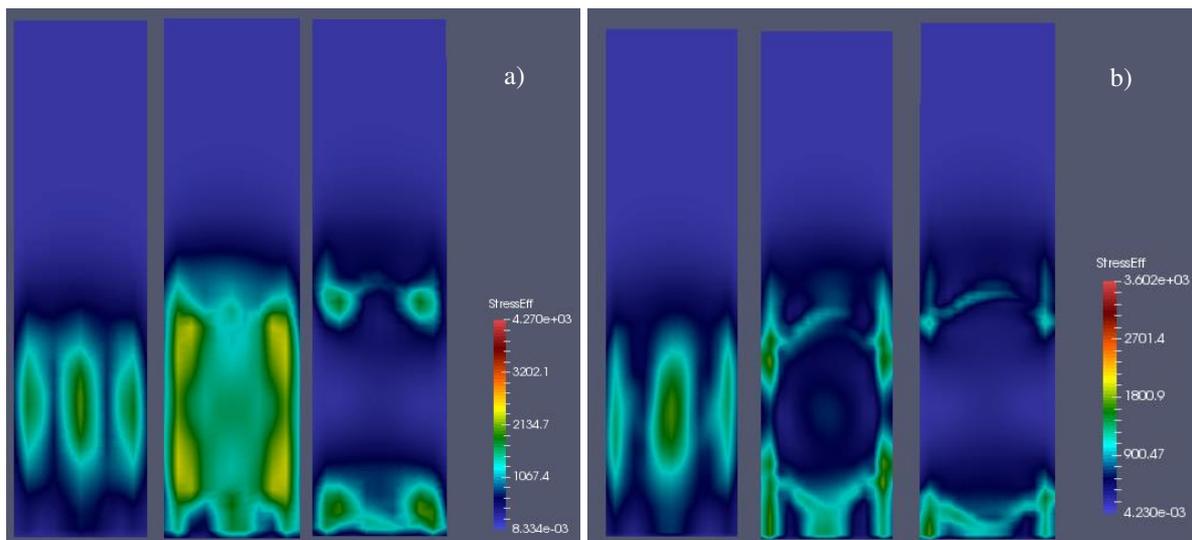


Fig. 14 Mapa de tensiones efectivas (Von Mises) para la placa completa. Izquierda: 1000 días; medio: 2000 días; derecha: 3650 días. a) modo 1; b) modo 2.

En las figuras precedentes se observa que la intensidad de las tensiones que se producen en la placa se relaciona con la distribución de irradiación no uniforme a la que ella es sometida. La [Tabla 1](#) presenta un mapa de fluencia para un instante determinado, según ambos esquemas de cálculo. Se observa cómo, en la región definida por las zonas 2, 3 y 4, la fluencia es máxima, lo que genera diferencias importantes de crecimiento y las consiguientes diferencias en las tensiones.

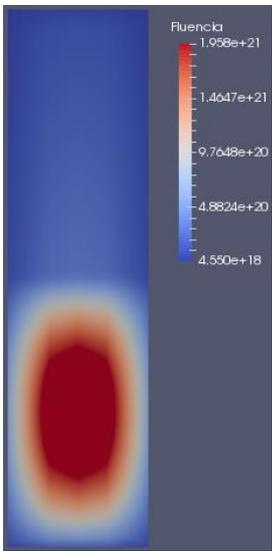
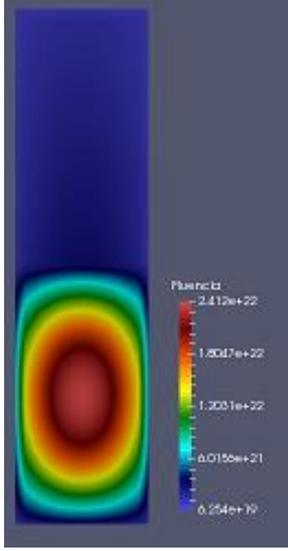
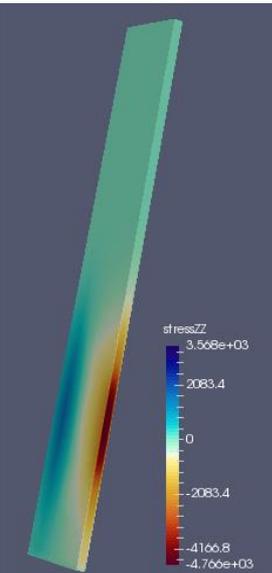
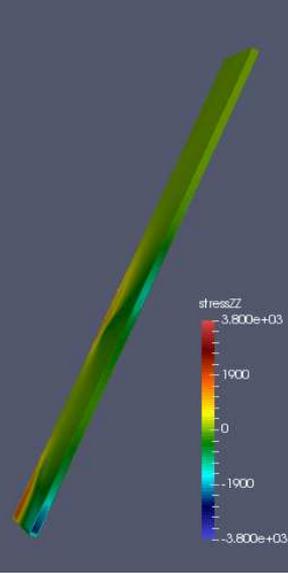
	modo 1	modo 2
<p>La zona de fluencia elevada es responsable de la diferencia de tensiones que se constata en la Fig. 10 a) y b), en la Fig. 12 a) y b) y en la Fig. 14 a) y b).</p> <p>Para el modo 1 de irradiación, tanto en la dirección axial como en la transversal, existen planos de fluencias considerablemente distintas, lo que provoca crecimientos diferenciales y tensiones dispares.</p> <p>En el modo 2 la única diferencia se observa en la dirección axial al pasar de la zona activa a la residual.</p>	fluencia	
		
<p>Hacia el interior de la placa la tensión alcanza los valores máximos.</p> <p>Para el modo 1 la zona central de la región caliente se encuentra en compresión, mientras que en los bordes externos la tensión es positiva.</p> <p>En el modo 2 existe tensión de compresión en los contornos de la zona activa.</p>	tensión axial	
		

Tabla 1: Distribución de fluencia y de tensión axial según los modos 1 y 2 de cálculo.

4 CONCLUSIONES

Mediante una modificación sobre el código DIONISIO 2.3 (Soba, 2014; Soba, 2016) se constató la deformación sufrida por una placa de Zircaloy-4 sometida a una distribución asimétrica de irradiación durante 10 años. La fluencia acumulada en este lapso provoca un crecimiento por irradiación en la dirección axial de 0,1%. En la dirección transversal más significativa (x) el decrecimiento máximo es de 0,025%.

El mapa de fluencia asimétrico produce una diferencia de tensiones sobre la placa que se

vuelve significativo especialmente en los planos axiales que separan las zonas 1 y 5 de las zonas 2 y 4, respectivamente, al igual que en los planos transversales que separan la zona de alta fluencia de la residual, como se constata en las Fig. 10 a) y b), en las Fig. 12 a) y b) y en las Fig. 14 a) y b). Esta tensión es menos elevada en el caso de utilizar para modelar la función de irradiación suavizada (modo 2). Sin embargo, bajo este esquema, puede observarse que el pico máximo de tensión de Von Mises es más alto que en el modo 1. Esto puede deberse a que la fluencia efectiva recibida por la placa resulta ligeramente mayor en valor absoluto en el modo 2. En todo caso, aún con este valor ligeramente elevado en promedio, en ningún caso se observa que la tensión efectiva supere el límite elástico del Zr, cuyo valor se estima en el rango entre 250 y 310 MPa (MATPRO, 1993). Cabe aclarar que no se observa un aumento en la velocidad de crecimiento debido a la fluencia acumulada en ninguna de las etapas estudiadas.

REFERENCIAS

- Adamson, R.B.: "Irradiation Growth of Zircaloy". Proceedings of the Third International Conference Zirconium in the Nuclear Industry, Quebec, Canadá. Lowe, A.L y Parry, G.W editores, ASTM STP 633, 1977, pág. 326-343.
- Fidleris, V., Tucker, R. P., Adamson, R. B., An overview of microstructural and experimental factors that affect the irradiation growth behaviour of zirconium alloys. *ASTM Spec. Techn. Publ.*, 939:49-85, 1987.
- Fidleris, V., The irradiation creep and growth phenomena, *Journal of Nuclear Materials*, 159:22-42, 1988.
- Fortis, A. M., Coccoz, G., Aceleración de la Deformación de Circonio Irradiado a Bajas Temperaturas, *Revista Matéria*, v. 9, n° 2, 138-143, 2004.
- Holt, R.A.: "Mechanisms of irradiation growth of alpha-zirconium alloys". *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 159, 1988, pág. 310-338.
- Murgatroyd, R. A. and Rogerson, A.: "Irradiation Growth in Annealed Zircaloy-2", *Journal of Nuclear Materials* 79 (1979) 302-311.
- Rogerson, A., Irradiation growth in zirconium and its alloys, *Journal of Nuclear Materials*, 159:43-61, 1988.
- SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual Volume IV: MATPRO -- A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis. *NUREG/CR-6150*, EGG-2720, 1993.
- Soba, A., Lemes, M., González, M. E., Denis, A., & Romero, L., Simulation of the behavior of nuclear fuel under high burnup conditions. *Annals of Nuclear Energy*, 70:147-156, 2014.
- Soba, A., Lemes, M., Gonzalez, M. E., Denis, A., DIONISIO 2.0: a code to simulate the behavior of a nuclear fuel rod under irradiation in normal and accident condition. *Mecánica Computacional Vol XXXIV*, págs. 1801-1815, 2016.
- Zirat 17 Annual Report, Chapter 5, ANT Internacional, 2012