

# Comportamiento mecánico y en fractura de vainas de combustible nuclear en condiciones de transporte y almacenamiento temporal en seco

J. Ruiz Hervías, M.A. Martín Rengel y F.J. Gómez

En el presente trabajo, se muestran los resultados más relevantes del proyecto de investigación sobre propiedades mecánicas y comportamiento en fractura de las vainas de combustible nuclear en condiciones de transporte y almacenamiento en seco.

El proyecto, ha sido desarrollado en la Universidad Politécnica de Madrid en colaboración con Enusa, Enresa y el CSN. El material objeto de la investigación fueron vainas de combustible nuclear sin irradiar.

El principal objetivo de la investigación es determinar un criterio de fallo de las vainas en función del contenido en hidrógeno, la temperatura y la velocidad de deformación.

*In this work, the most relevant results of a research project on the mechanical and fracture behavior of cladding in transport and dry storage conditions are summarized. The project is being carried out at Universidad Politécnica de Madrid in collaboration with ENUSA, ENRESA and CSN. Non-irradiated cladding is investigated.*

*The main objective is to determine a failure criterion of cladding as a function of hydrogen content, temperature and strain rate.*

En este artículo se describen los resultados más relevantes de un proyecto de investigación sobre el comportamiento mecánico y en rotura de vainas de combustible nuclear en condiciones de transporte y de almacenamiento temporal en seco, que se está llevando a cabo en la Universidad Politécnica de Madrid en colaboración con Enusa Industrias Avanzadas, Enresa y el Consejo de Seguridad Nuclear. Las investigaciones se realizan con material de vaina sin irradiar, al que se le introduce hidrógeno por medio de técnicas electroquímicas, que después se hace precipitar en forma de hidruros de circonio según la dirección anular de las vainas. Se trata así de simular la fragilización inducida por el hidrógeno en condiciones de operación. Las muestras se someten a ensayos mecánicos para determinar el efecto del contenido de hidrógeno, la temperatura y la velocidad de sollicitación en las propiedades

mecánicas y en rotura. El comportamiento observado se simula mediante técnicas de elementos finitos con modelos de daño basados en la teoría de la fisura cohesiva. Además se estudian los micromecanismos de rotura mediante microscopía electrónica de barrido. El objetivo último de la investigación es determinar un criterio de rotura de la vaina -en función del contenido de hidrógeno, la temperatura y la velocidad de sollicitación- que permita predecir el comportamiento del combustible frente a cargas que puedan producirse durante el transporte y almacenamiento en seco del combustible irradiado.

## INTRODUCCIÓN

Las vainas de combustible nuclear son tubos de pared delgada en cuyo interior se encuentran las pastillas de combustible. Estos tubos se fabrican con aleaciones de circonio debido a su transparencia al flujo neutrónico, sus



**JESÚS RUIZ HERVÍAS**

Doctor en Ciencias Físicas por la UCM  
Profesor Titular del Dpto. Ciencia de  
Materiales de la E.T.S.I.C.C.P de la UPM.



**MIGUEL ÁNGEL MARTÍN RENDEL**

Doctor Ingeniero Químico por la UPM  
Investigador post-doctoral en el Dpto. de  
Ciencia de Materiales de la E.T.S.I.C.C.P  
de la UPM.



**FRANCISCO JAVIER GÓMEZ SÁNCHEZ**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y  
Puertos por la UPM.  
Actualmente trabaja en Advanced Material  
Simulation, empresa fundada por él  
mismo, realizando tareas de asesoría,  
modelización y caracterización de  
materiales.

buenas propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión.

En el ambiente del primario se genera hidrógeno debido a la reacción de oxidación que se produce entre el circonio de la vaina y el agua de refrigeración. Dicho hidrógeno se absorbe en el interior de la vaina y precipita en forma de hidruros al superarse el límite de solubilidad. La acumulación de hidruros fragiliza el material y puede incluso producir la fisuración lenta y progresiva de la vaina.

Dado que las vainas constituyen la primera barrera de confinamiento para el combustible y los gases de fisión, su integridad estructural debe estar garantizada durante todo el ciclo del combustible. Por ello, es esencial caracterizar de forma precisa el comportamiento mecánico y en rotura de las vainas de combustible nuclear para asegurar la operación incluso en condiciones extremas no previstas y durante las etapas de transporte y almacenamiento en seco.

Además de esto, durante la etapa de almacenamiento en seco, las vainas están sometidas a procesos termomecánicos que implican solicitaciones mecánicas elevadas y alta temperatura. En estas condiciones puede aumentar la fragilidad del material como consecuencia de la reorientación de los hidruros de circonio en la dirección radial. Por ello es muy importante evaluar las condiciones de tensión y temperatura en las que puede producirse la reorientación y cuál es la integridad estructural remanente de las vainas en este caso.

El objetivo último de la investigación es determinar un criterio de rotura de la vaina –en función del contenido de hidrógeno, la temperatura y la velocidad de sollicitación– que permita predecir el comportamiento del combustible frente a cargas que puedan producirse durante el transporte y almacenamiento en seco del combustible irradiado.

## METODOLOGÍA

Las vainas que se investigan son de Zirlo™ trabajado en frío y con tratamiento de alivio de tensiones. Las temperaturas de estudio son tres: 20, 135 y 300°C. Se emplea material sin irradiar en el que se reproducen los estados de fragilización asociados a la presencia de hidruros en las vainas. El hidrógeno se introduce mediante técnicas electroquímicas hasta lograr concentraciones máximas de 2000 ppm. Después se precipitan los hidruros en la dirección circunferencial y radial (mediante tratamientos de reorientación) de las vainas. Además se estudia el efecto de la

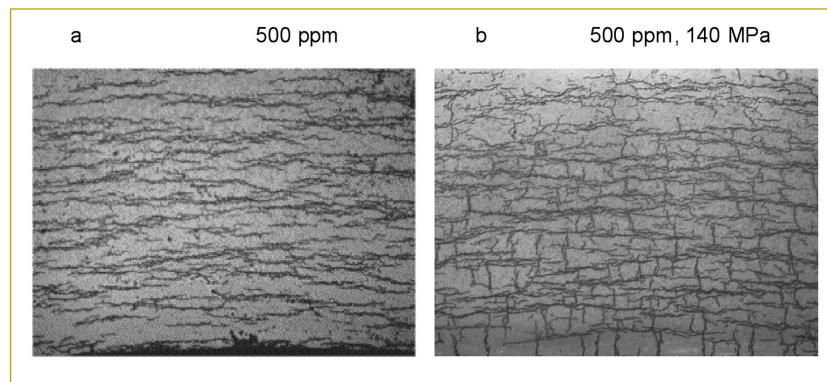


Figura 1. Muestras cargadas con 500 ppm de hidrógeno: (a) hidruros circunferenciales resultantes del proceso de carga, (b) hidruros radiales después de la reorientación.

capa de óxido y de una distribución no homogénea de hidruros (*hydride rim*) en el diámetro externo de la vaina. La caracterización del comportamiento mecánico se hace mediante ensayos de tracción en anillo y de compresión diametral a las tres temperaturas de estudio. En las muestras rotas se realiza un análisis fractográfico mediante microscopía electrónica de barrido para identificar los micromecanismos de rotura. Además se lleva a cabo la simulación numérica de los ensayos mecánicos mediante modelos de elementos finitos que incorporan modelos de daño basados en la teoría de la fisura cohesiva. De este modo se puede obtener un criterio de rotura que tenga en cuenta el efecto del nivel de fragilización en la seguridad estructural de vainas hidruadas. El objetivo final es extender este criterio a vainas irradiadas.

## RESULTADOS

### Hidruación de vainas

Para incorporar de forma controlada hidrógeno en muestras de vainas, se recurrió a un proceso de carga catódica en medio básico. Este proceso consiste en realizar la descomposición electrolítica del agua utilizando como cátodo de la reacción la muestra de vaina. Como consecuencia, parte del hidrógeno que se desprende en la reacción se absorbe en el material en función de la temperatura de la disolución, la intensidad de carga y el tiempo. Se determinaron las combinaciones óptimas de estos tres parámetros para obtener muestras con 150, 250, 500, 1200 y 2000 ppm de hidrógeno. La concentración se midió con un analizador de hidrógeno por el método de extracción en caliente.

En la Figura 1 se muestran un ejemplo del aspecto que presentan los hidruros que se obtienen (vetas oscuras) cuando se observan en el microscopio óptico. En este caso se trata de muestras cargadas con 500 ppm de

hidrógeno mediante el proceso descrito. La muestra correspondiente a la Figura 1b ha sido sometida a un proceso de reorientación de hidruros (tensión circunferencial de 140 MPa durante el enfriamiento) posterior y puede observarse que una gran parte de los mismos han precipitado en la dirección radial de la vaina.

### Ensayos mecánicos

Los ensayos que se han realizado para caracterizar el comportamiento mecánico de las vainas han sido de dos tipos: tracción en anillo y compresión diametral. En el primero la carga se aplica mediante dos vigas semicilíndricas en contacto con la superficie interior de las muestras, que tienen forma de anillo con dos secciones reducidas simétricas. Entre las vigas se introduce un centrador que impide que la sección reducida de la muestra entre en flexión al comienzo del ensayo. El dispositivo experimental se puede ver en la Figura 2a.

En el ensayo de compresión diametral se emplean muestras de vaina en forma de anillo de altura constante, que son sometidas a compresión a lo largo de una generatriz, tal como se aprecia en la Figura 2b. Este ensayo es más fácil de realizar que el ensayo de tracción en anillo y las muestras también son más fáciles de obtener.

En la Figura 3 se representa un ejemplo de los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de compresión diametral en función del contenido de hidrógeno y la temperatura de ensayo para hidruros de orientación circunferencial.

Se observa que los registros experimentales tienen un tramo lineal inicial hasta que se produce una incurvación y después la carga sigue creciendo hasta llegar al valor máximo. A partir de entonces se produce un descenso suave de la carga y un aumento final debido al contacto de

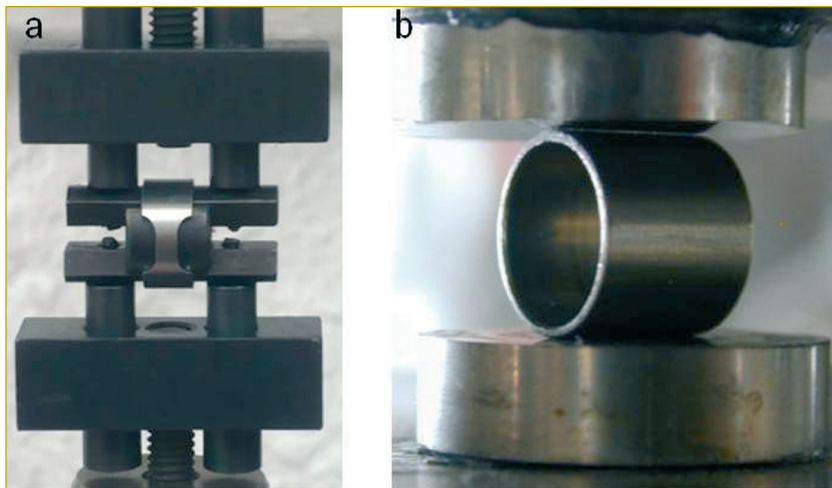


Figura 2. Dispositivos experimentales empleados en los ensayos mecánicos: (a) tracción en anillo, (b) compresión diametral.

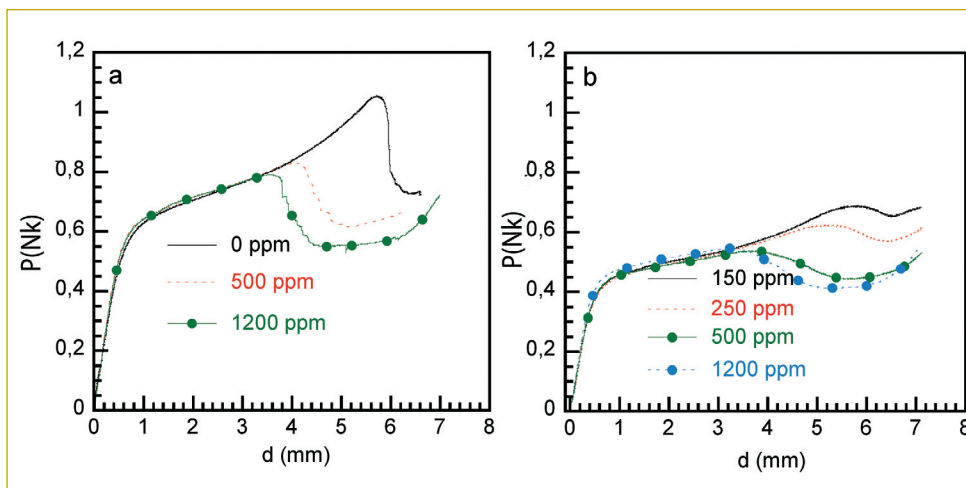


Figura 3. Curvas experimentales carga-desplazamiento de ensayos de compresión diametral para diferentes contenidos de hidrógeno y dos temperaturas: (a) 20°C y (b) 300°C.

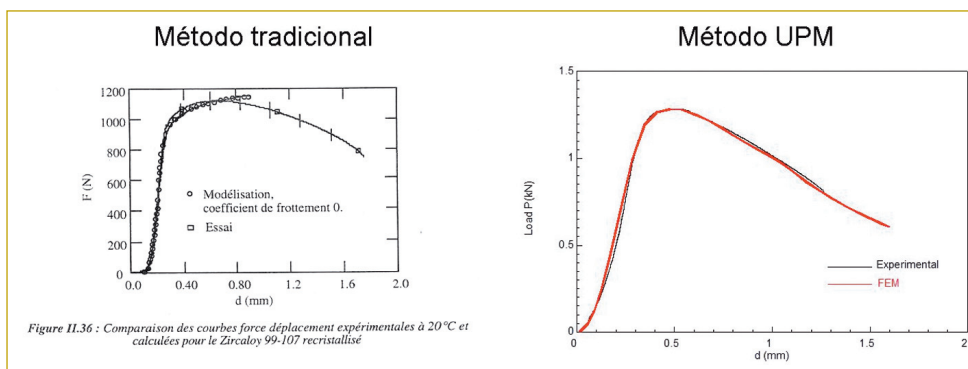


Figura 4. Registros experimentales y simulaciones numéricas del ensayo de tracción en anillo ajustados por el método tradicional y por el método desarrollado en este proyecto.

las dos superficies de la muestra. El tramo de bajada de la carga es particularmente interesante para estudiar el comportamiento en fractura de las vainas, debido a que en esta etapa se inicia una fisura en la generatriz ecuatorial externa de la vaina que se propaga de modo estable. A medida que aumenta el contenido en hidrógeno

disminuye el valor de la carga máxima que la probeta puede soportar, así como el valor del desplazamiento al que se produce dicha carga máxima. Sin embargo, el comportamiento en la zona lineal y en la posterior incurvación no depende del contenido de hidrógeno. Al aumentar la temperatura a 300°C, la carga máxima del ensayo

disminuye apreciablemente y se sigue apreciando que el efecto fragilizador aumenta con la concentración de hidrógeno.

Tanto en el ensayo de tracción en anillo como en el de compresión diametral, los estados de tensión son complejos y por ello es imprescindible realizar simulaciones numéricas por medio de modelos de elementos finitos para obtener las propiedades mecánicas del material en la dirección circunferencial. En el caso del ensayo de tracción en anillo, en la literatura se propone un método que postula dos curvas universales para ajustar los resultados. Se ha demostrado en este proyecto que dichas curvas no son universales y se ha propuesto un procedimiento de cálculo iterativo que proporciona

un ajuste sobresaliente de los resultados, tal como se aprecia en la Figura 4. A partir del ajuste numérico de los resultados del ensayo de tracción en anillo se pueden obtener las curvas tensión-deformación del material en la dirección circunferencial. Los resultados indican que hasta 2000 ppm de hidrógeno la presencia de hidruros no modifica de forma sustancial las propiedades mecánicas de las vainas hidruadas, tal como se observa en la Figura 5.

Por lo que respecta al ensayo de compresión diametral, se ha desarrollado un nuevo procedimiento que permite obtener la ecuación constitutiva del material a partir de los registros experimentales carga-desplazamiento mediante un algoritmo iterativo. Las simulaciones correspondientes a los resultados de la Figura 3 pueden verse en la Figura 6. Se puede apreciar que las simu-

laciones numéricas ajustan muy bien los resultados de los ensayos de compresión diametral, incluyendo la zona de descarga que se produce después del máximo de carga. Para modelizar el comportamiento en esa zona se introdujo un modelo daño basado en la teoría de la fisura cohesiva. De este modo se puede reproducir el proceso

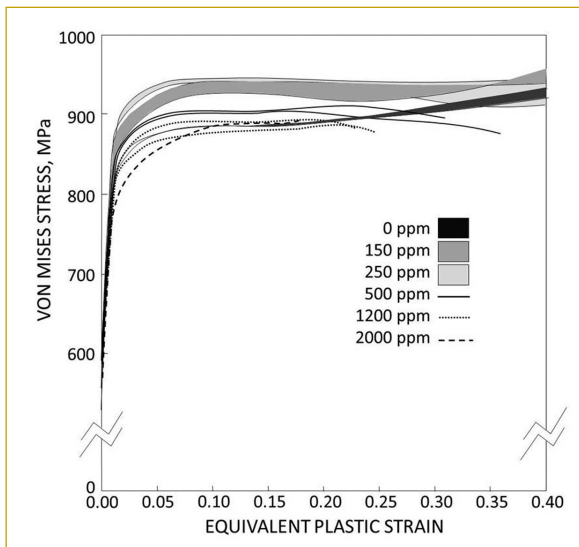


Figura 5. Curvas tensión-deformación equivalente para vainas hidruradas hasta 2000 ppm de hidrógeno.

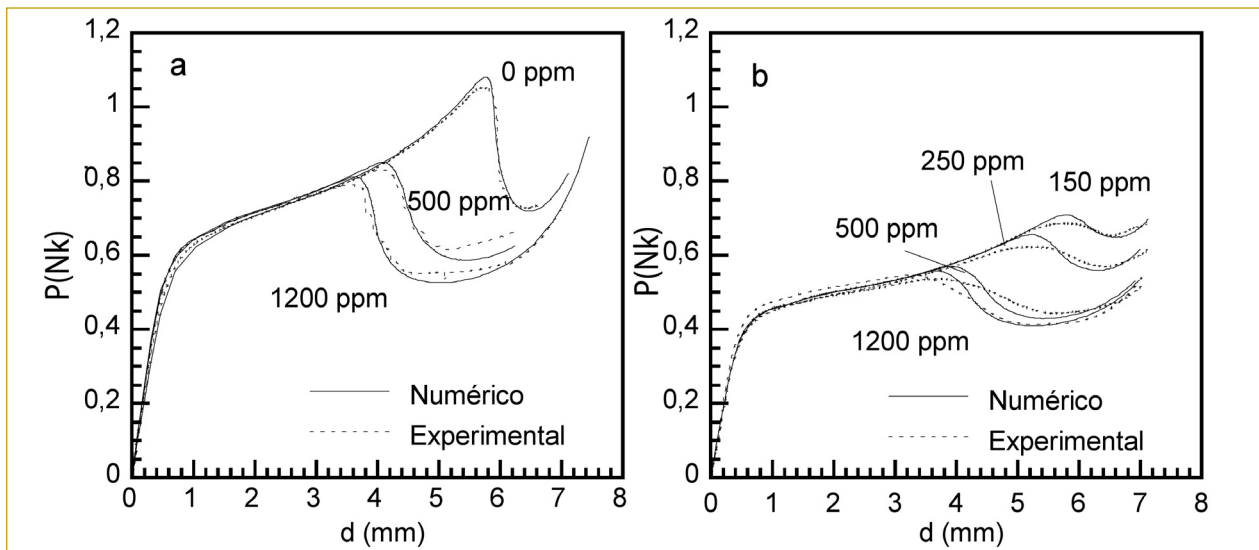


Figura 6. Registros experimentales y simulaciones numéricas del ensayo de compresión diametral para diferentes contenidos de hidrógeno: (a) 20°C y (b) 300°C.

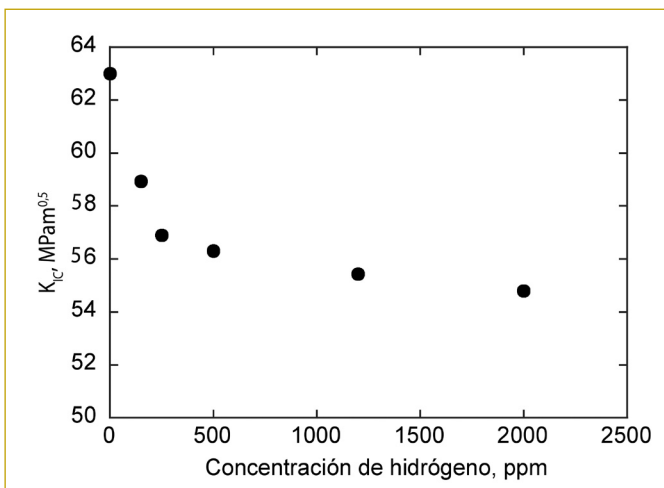


Figura 7. Tenacidad de fractura en función del contenido de hidrógeno a 20°C.

de fisuración estable que se observa en los ensayos después de la carga máxima.

A partir del ajuste numérico de la zona de descarga se puede obtener la tenacidad de fractura del material de la vaina en dirección circunferencial en función del contenido de hidrógeno, tal como se representa en la Figura 7.

## CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método experimental que permite introducir hidrógeno de forma controlada en las muestras de vaina, simulando la fragilización que se produce en las distintas etapas del ciclo de combustible.

Se ha propuesto un nuevo método de ajuste numérico para el ensayo de tracción en anillo que prescinde del uso de curvas universales y recoge la no linealidad geométrica, con resultados muy satisfactorios. Como resultado se han obtenido las propiedades mecánicas de las vainas en dirección circunferencial y se ha observado que éstas no dependen de manera sustancial del contenido de hidrógeno hasta 2000 ppm.

Se ha desarrollado un nuevo método de cálculo iterativo que permite obtener la curva tensión-deformación en

dirección circunferencial de las vainas a partir del ensayo de compresión diametral con un ajuste excelente de los resultados experimentales. De esta forma se puede prescindir del ensayo de tracción en anillo, que es más difícil de realizar y presenta bastantes incertidumbres.

Se ha obtenido la tenacidad de fractura en la dirección circunferencial de las vainas, en función del contenido en hidrógeno a partir de los resultados del ensayo de compresión diametral. Para ello se ha empleado un modelo de daño basado en la teoría de la fisura cohesiva.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Enusa Industrias Avanzadas, Enresa y al Consejo de Seguridad Nuclear por la financiación concedida para la realización de este proyecto y su apoyo constante. También desean reconocer la colaboración y ayuda de los profesores Andrés Valiente Cancho y Luis Caballero Molano, así como la de la doctora Elena Torres Álvarez.