

# **Resultados y lecciones aprendidas del Proyecto de I+D sobre Integridad del material de vaina irradiado con hidruración severa en condiciones de almacenamiento y transporte**

José María Rey Gayo  
Área de Ingeniería del Núcleo

Consejo de Seguridad Nuclear

## **2** | Índice de contenidos

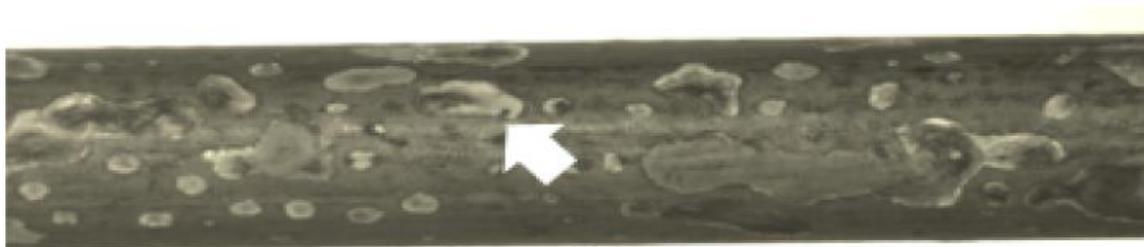
- 1. Aspectos Generales**
- 2. Resultados con Material Irradiado**
- 3. Resultados con Material Fresco y Blister Simulado**
- 4. Aplicaciones en Procesos de Licencia**
- 5. Repercusión internacional**
- 6. Resumen y conclusiones**

### 3 Aspectos generales

- Participantes: **ENUSA, ENRESA y CSN**
- Coste total: 2.169.971,44€ (CSN: 16,66%)
- Proyecto de 4 años finalizado en diciembre del 2017
- Continuación de proyectos y colaboraciones anteriores (desde 2004) sobre comportamiento de combustible gastado en almacenamiento y transporte
- Objetivo: obtener información relevante para comprender los fenómenos asociados a la presencia de spalling en vainas de barras combustibles en condiciones de secado, almacenamiento y transporte
- No era objetivo del proyecto desarrollar criterios de éxito o metodologías

## 4 Aspectos generales. Antecedentes

- En las **centrales españolas PWR-W** puede haber algunos centenares de elementos combustibles gastados (quemados hasta los años 90, con vaina de **Zr4**) que hayan sufrido spalling. No necesariamente de alto quemado
- Valores de corrosión elevados => desprendimientos de la capa de óxido (spalling) => precipitación de hidrógeno (ampollas o blisters de hidruro de zirconio puro).
- La presencia de estos blisters puede reducir las propiedades de la vaina para aguantar las cargas mecánicas durante su gestión como combustible gastado



## 5 Aspectos generales. Desarrollo

- Dos programas paralelos e independientes, aunque con sinergias
  - Barras irradiadas, quemado 46-47 MWd/KgU (2014-2016)
  - Material de vaina fresco (2014-2017)
- Estudios realizados con **barras irradiadas** en CN Españolas y estudios con **material de vaina fresco (ZIRLO)** con simulación de blíster
- Los estudios con material irradiado se han realizado en **Studsvik** Nuclear AB y los de material fresco (ZIRLO) en el **Departamento de Ciencia de Materiales** de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de la UPM

## 6 | Resultados con material irradiado

### Objetivos principales:

- Caracterizar cuantitativa y geoméricamente la exfoliación de óxido y la ampolla de hidruros de circonio (blister) generada por la misma (microscopías, medidas de H, visuales, perfilometrias, espesor de óxido,...)
- Caracterización mecánica del material para las condiciones (temperaturas, cargas...) del secado, almacenamiento y transporte mediante ensayos de reventado (burst), de creep, de flexión (en 4 puntos) y de compresión en anillo (RCT)

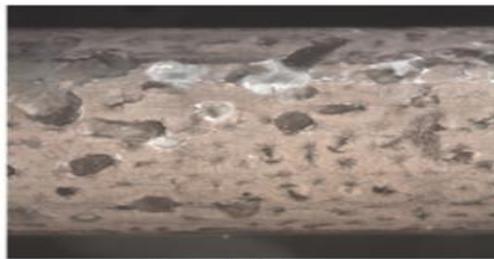
## 7 | Resultados con material irradiado

### Caracterización geométrica

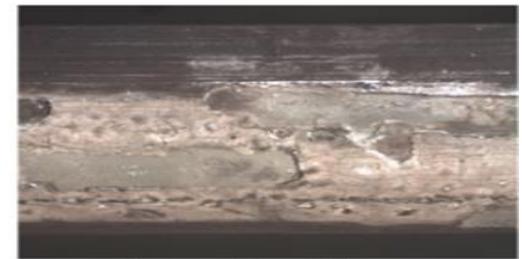
- Spalling correlacionado con espesor de capa de óxido. Por tanto, presente en la parte superior de la barra combustible



Oxide bubbles

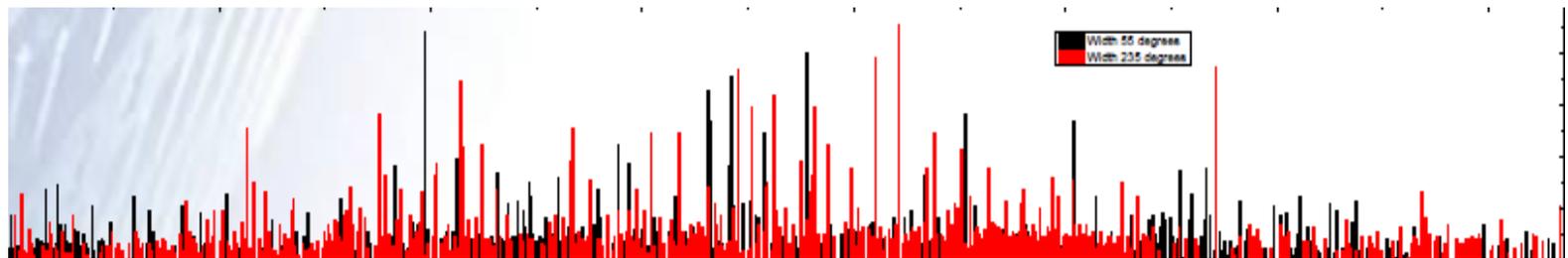


Spallings



Long Spallings

- Se pudieron determinar las longitudes y anchuras del spalling

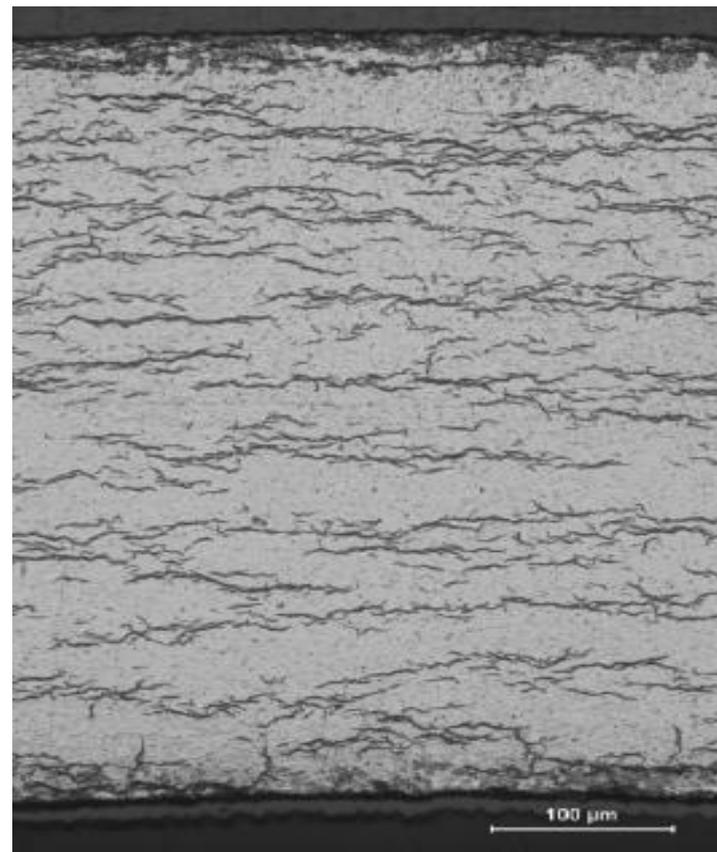


- No hay blíster debajo del spalling de la mayoría de muestras

## 8 | Resultados con material irradiado

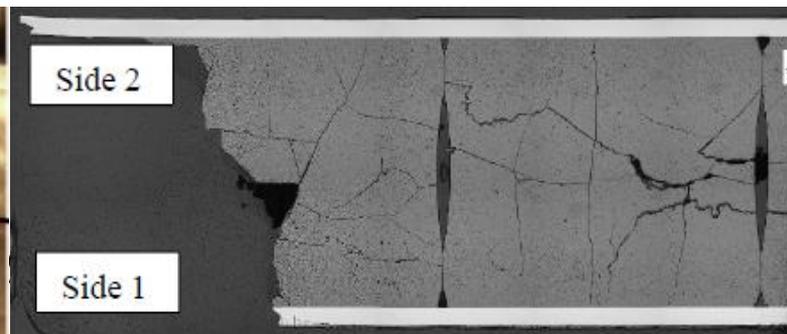
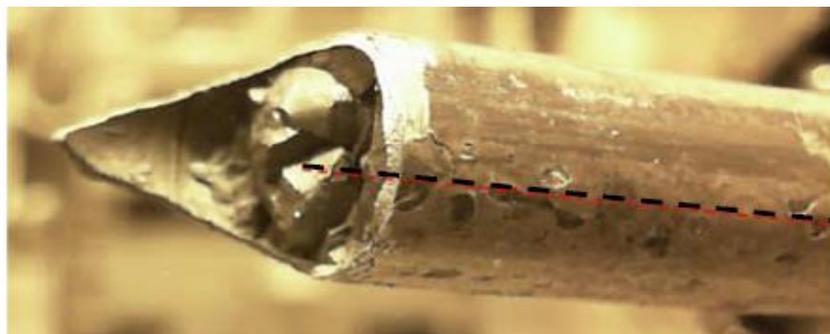
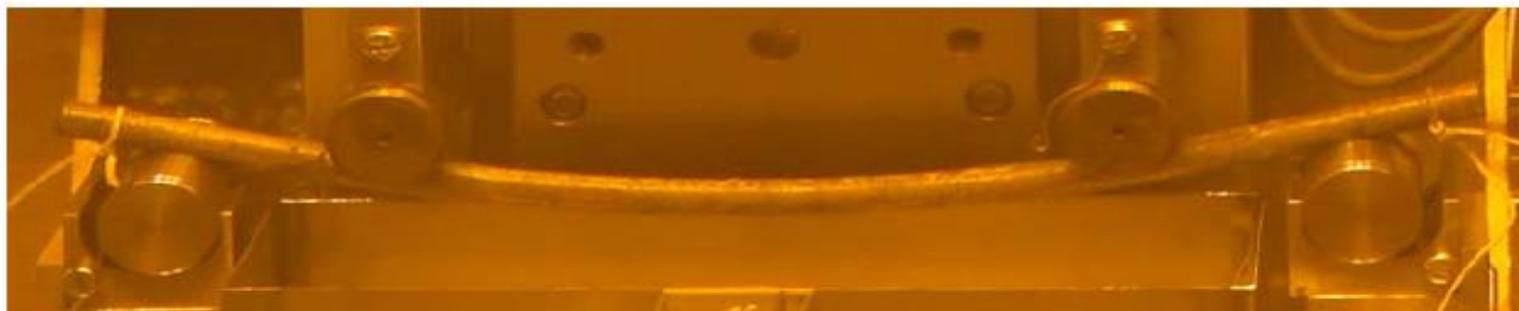
### Ensayo de creep

- (400°C, 90 Mpa)+ bajada de temperatura controlada. Alrededor de 14 días.
- Resultados (no se encontraron blíster)
  - deformación muy baja (menor del 0,1%),
  - no apareció rim de hidruros,
  - hidruros radiales cortos no mensurables.



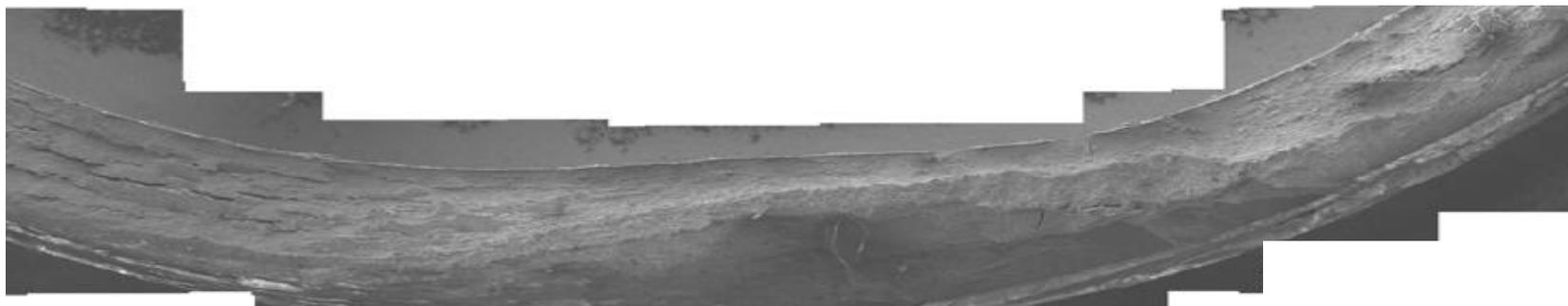
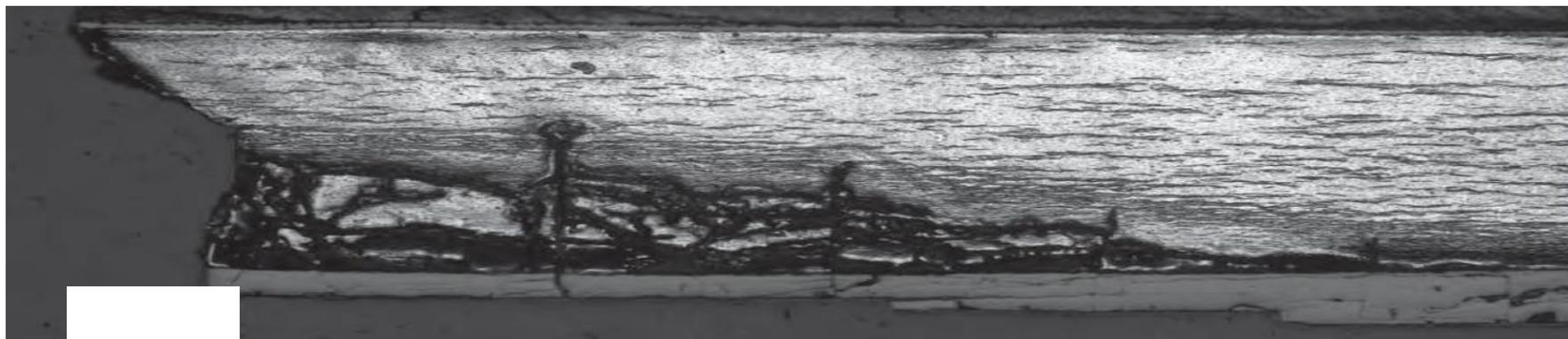
## 9 | Resultados con material irradiado

### Ensayo de flexión en cuatro puntos (1/2)



## 10 | Resultados con material irradiado

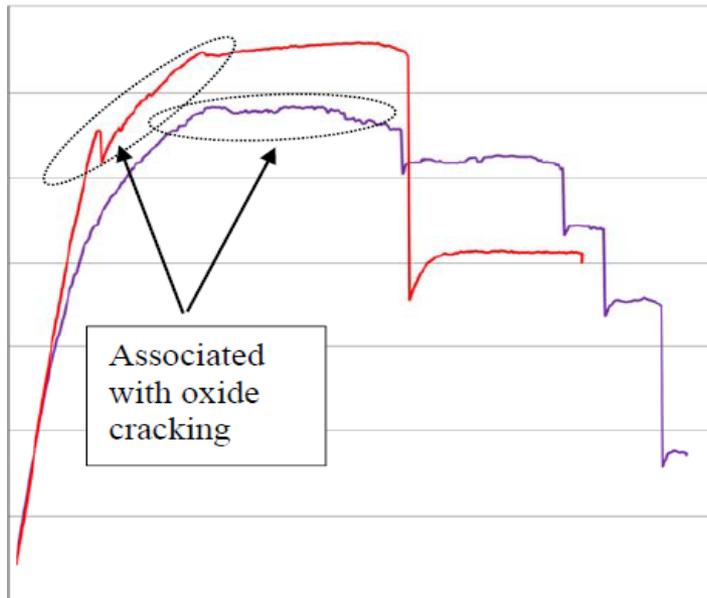
### Ensayo de flexión en cuatro puntos (2/2)



## 11 | Resultados con material irradiado

### Ensayos de compresión diametral (1/2)

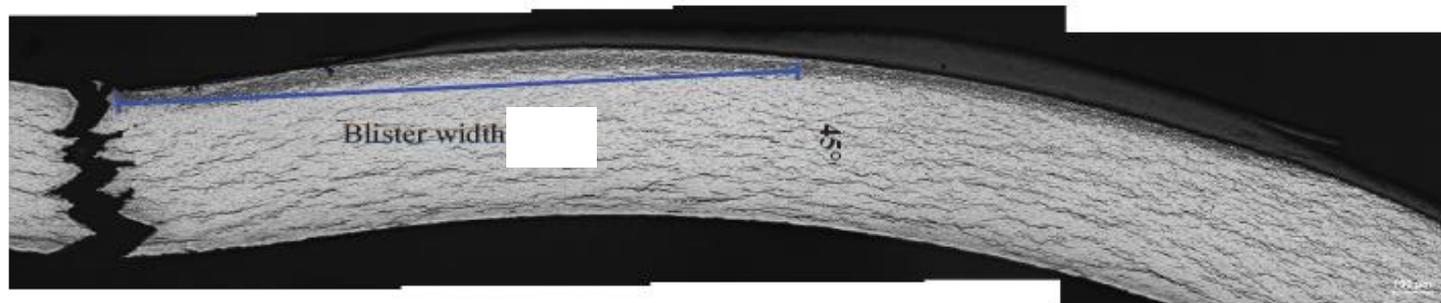
- Dos ensayos: posición 12h y 3h. Distintos valores de óxido.  
Ensayos a 135°C



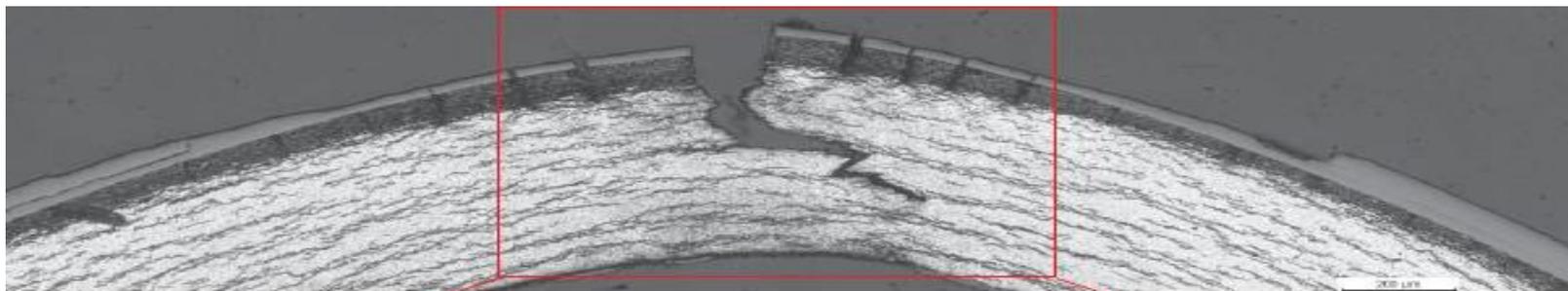
## 12 | Resultados con material irradiado

### Ensayos de compresión diametral (2/2)

- Spalling posición 12h



- Spalling posición 3h



## 13 | Resultados con material irradiado

### Otros resultados:

- Experimentos de reventado (Burst): fallo con poca deformación a tensiones varias veces superiores al valor indicado en la ISG-11, rev. 3 de 90 Mpa. No se encontró la localización del fallo
- Medida del gap
- Microdureza: Determinado en blíster, rim, interfaces y metal base.
- Medidas de concentración y distribución de hidrógeno en la vaina, tanto con blister como sin él

## 14 | Resultados con material fresco

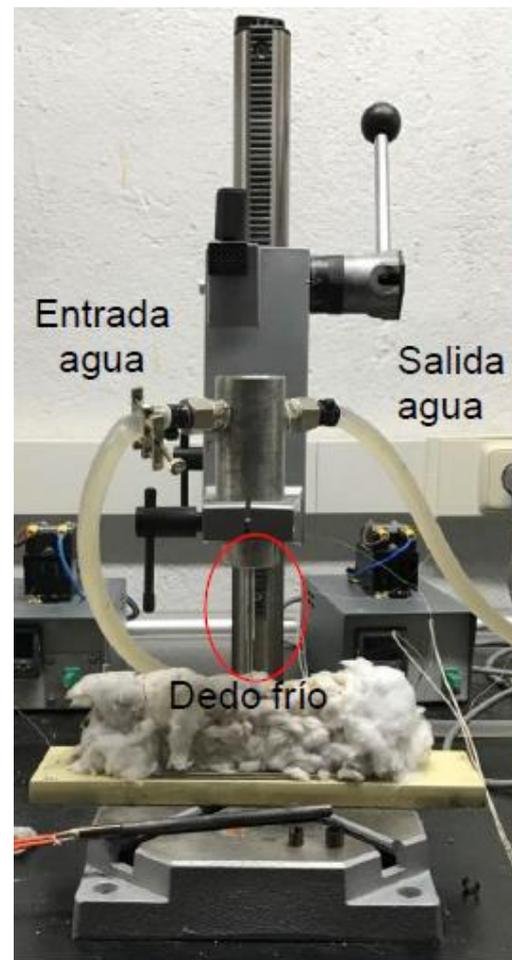
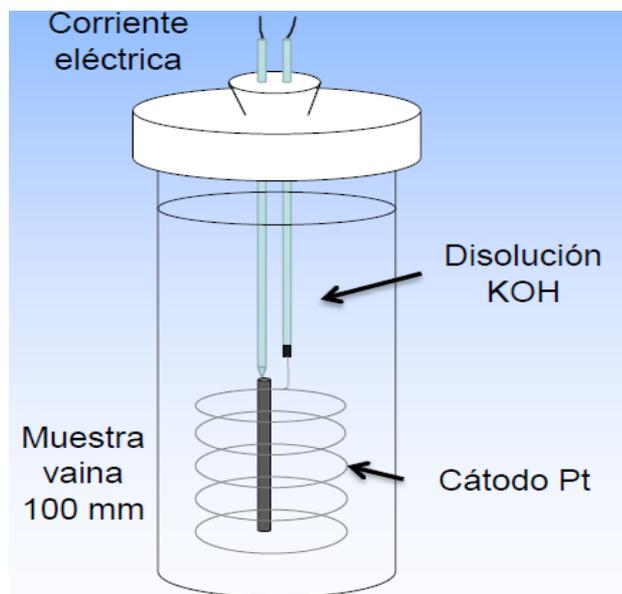
### Objetivos principales:

- Generación del material para ensayar:
  - Carga de hidrógeno en tubos de ZIRLO (técnicas desarrolladas en anteriores proyectos CSN-ENUSA-ENRESA)
  - Desarrollo de equipos específicos (dedos fríos)
  - Generación de blisters representativos del material irradiado (forma, dimensiones, material circundante....).
- Ensayos mecánicos en condiciones similares al del material irradiado (reventado, compresión diametral, flexión 3 puntos)
  - Fractografías
- En algunos casos, ensayos en condiciones especiales:
  - Tratamiento térmico simulando secado
  - Simulación del efecto de la pastilla como reducción de conservadurismo

## 15 | Resultados con material fresco

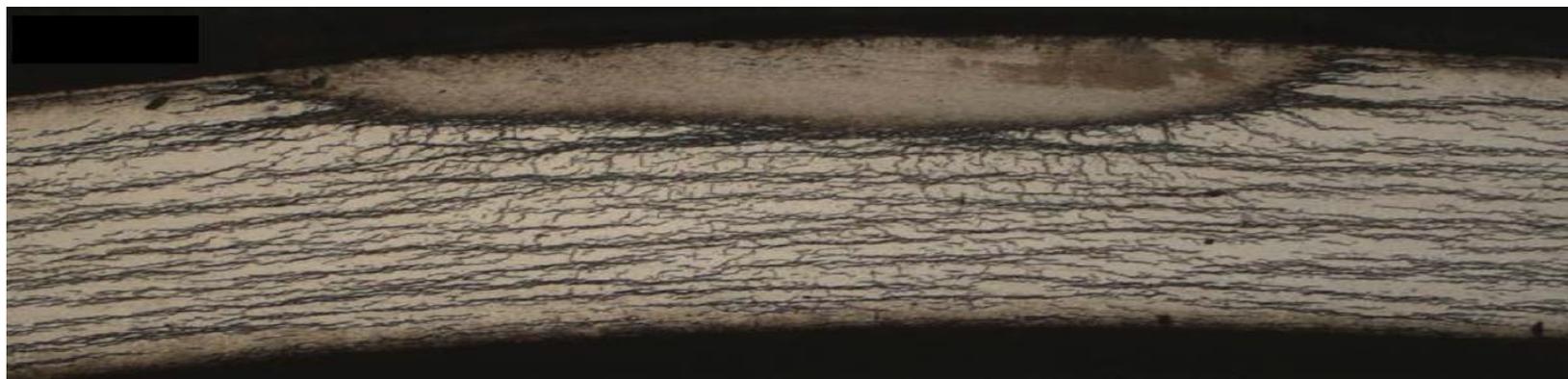
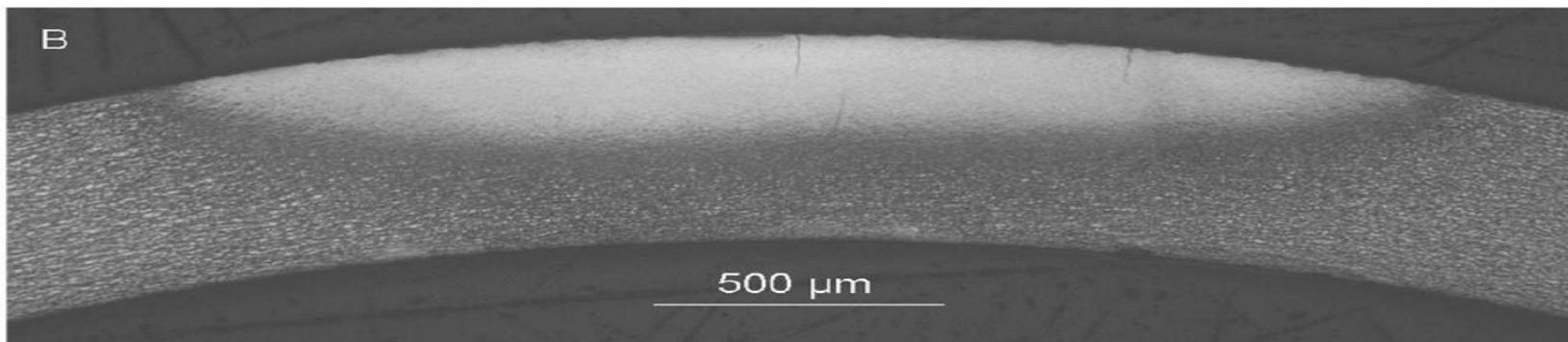
### Nuevas capacidades de investigación:

- Hidruración de muestras de vaina
- Generación de blisters
- Simulación del proceso de secado



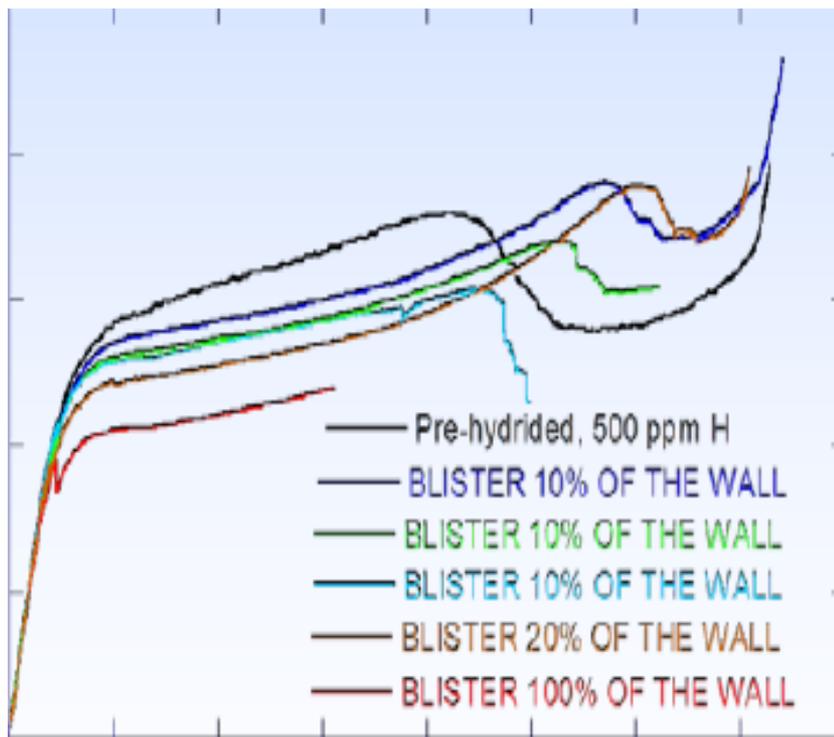
## 16 | Resultados con material fresco

### - Generación de blisters

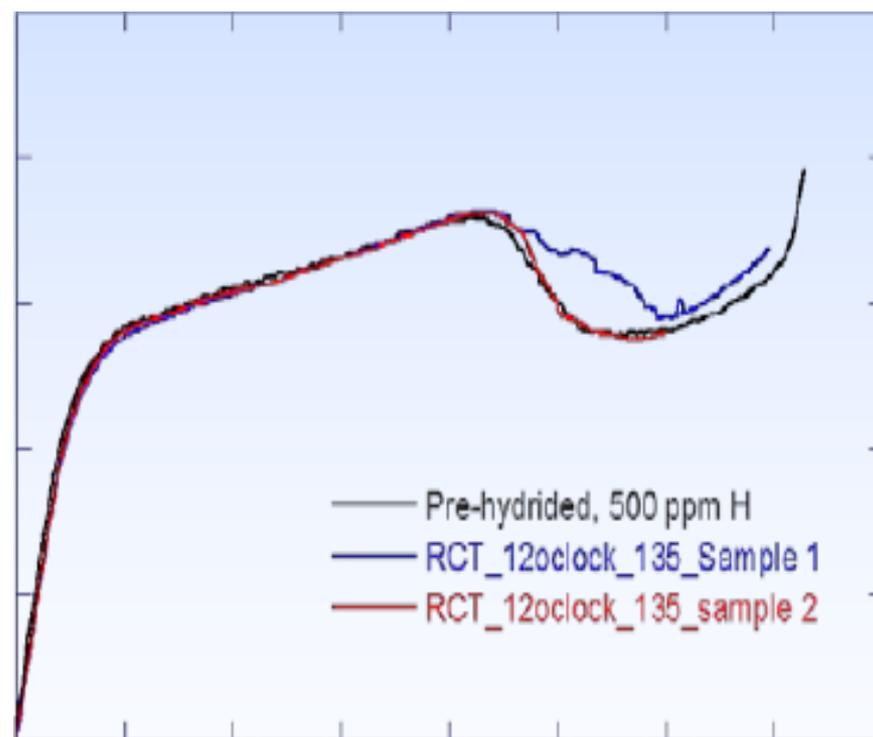


## 17 | Resultados con material fresco

### Ensayos de compresión diametral



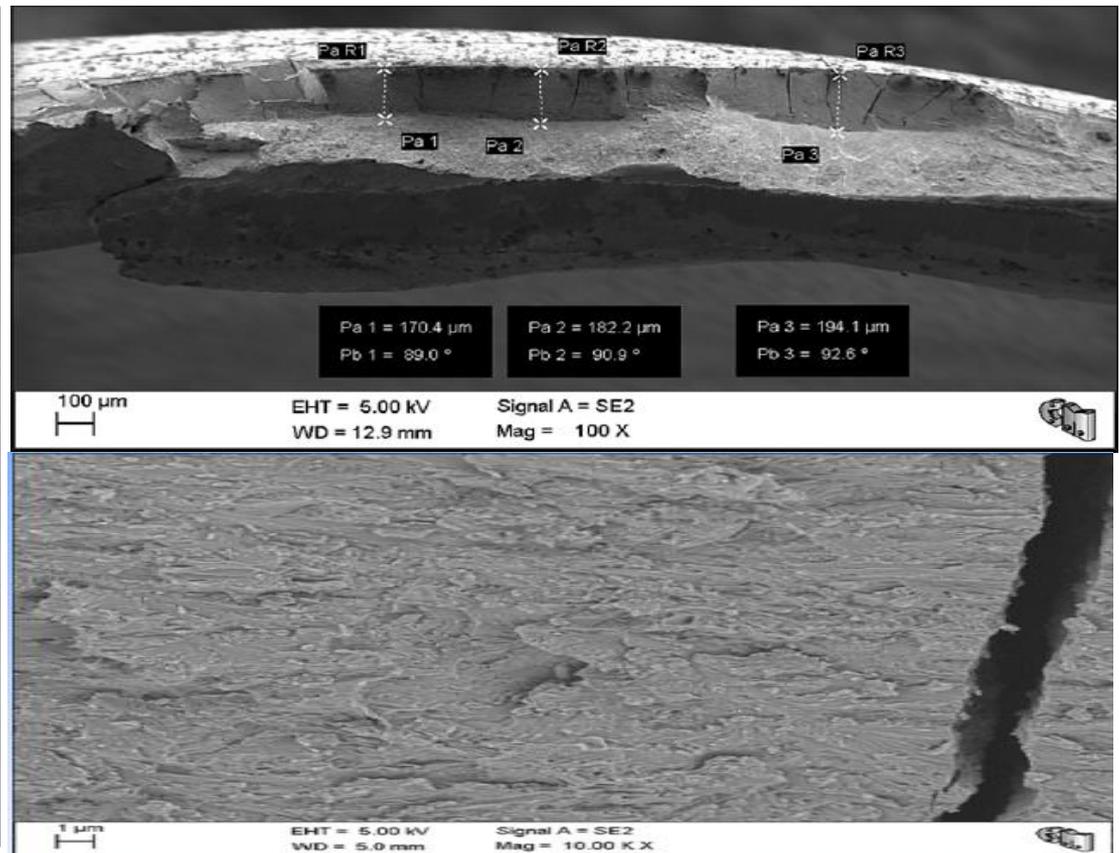
Tipo 1, blister a las 3, 135°C



tipo 2, blister a las 12, 135°C

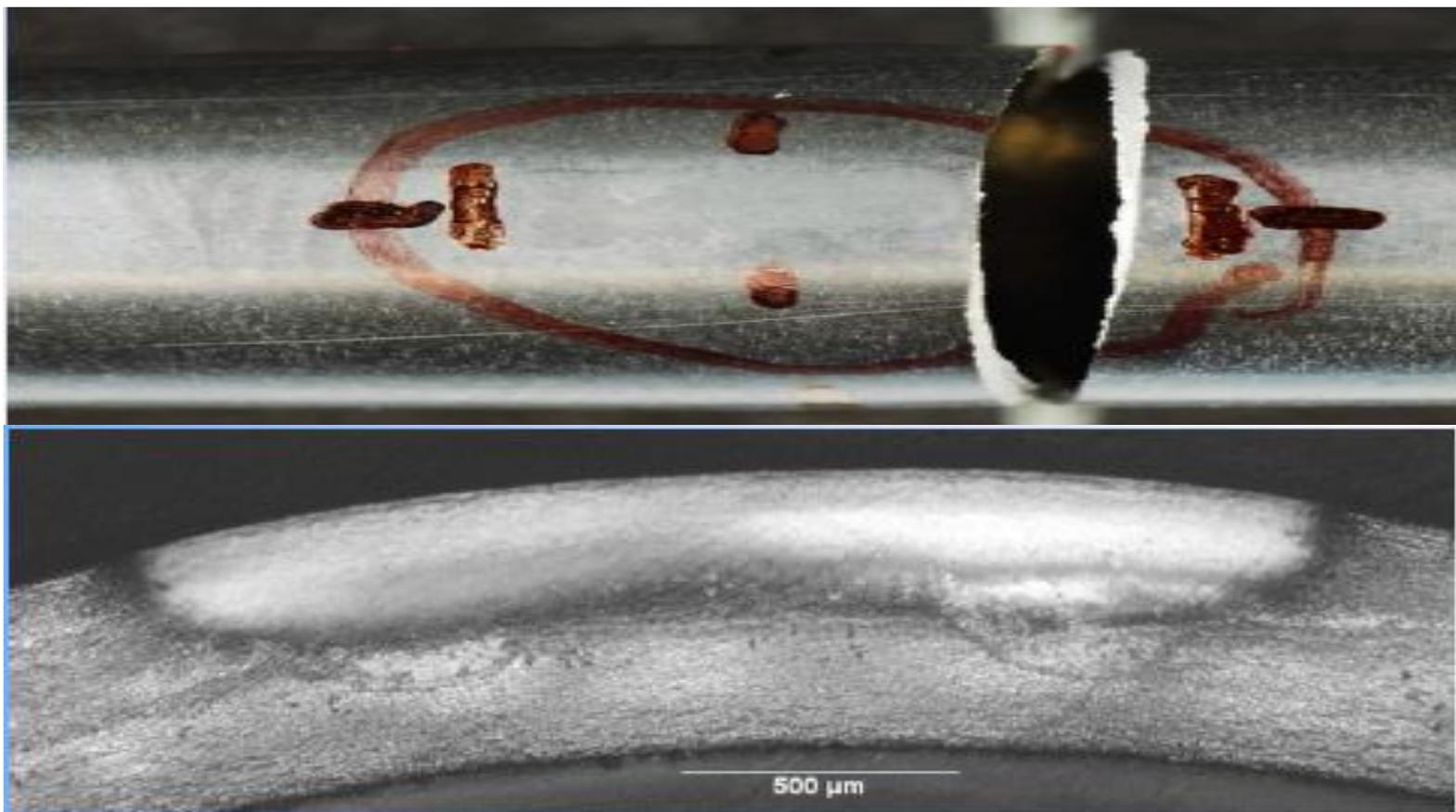
## 18 | Resultados con material fresco

### Ensayos de reventado



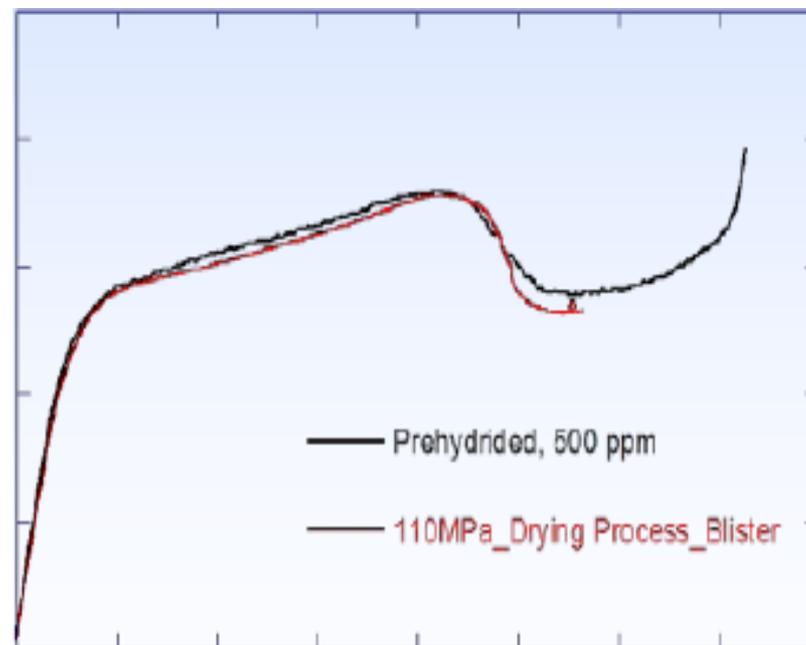
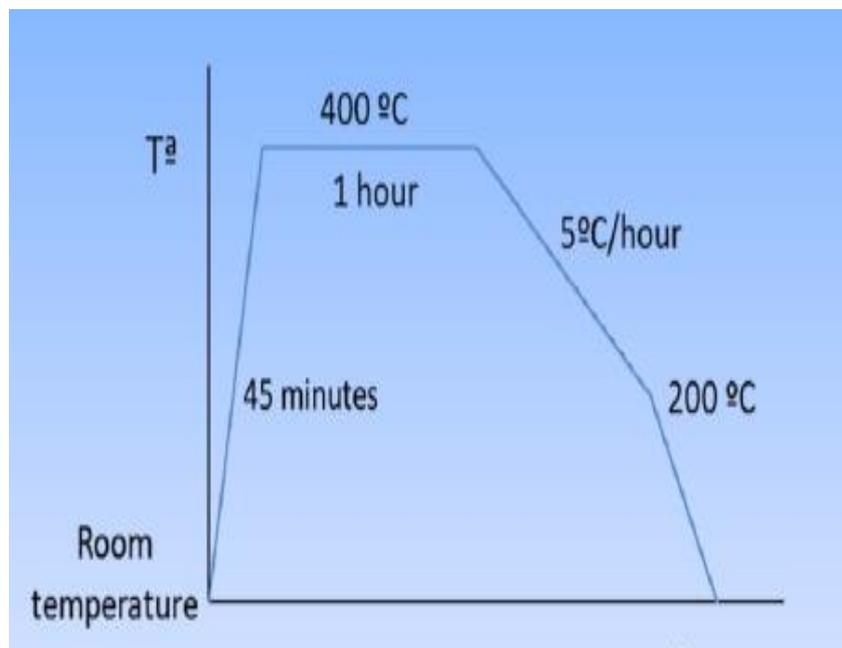
## 19 | Resultados con material fresco

### Ensayos de flexión en tres puntos



## 20 | Resultados con material fresco

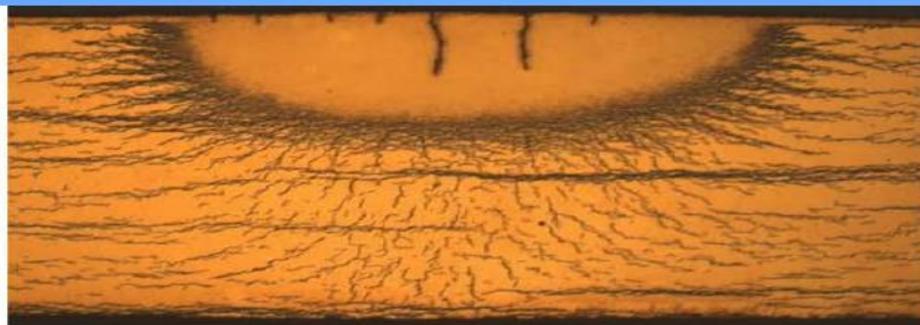
### Simulación de secado + ensayo de compresión diametral



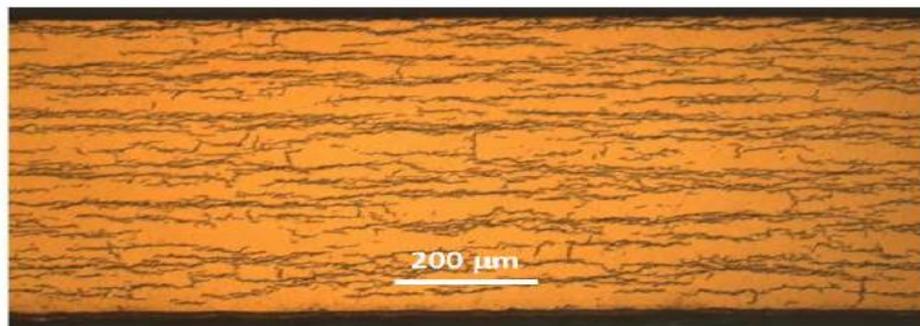
## 21 | Resultados con material fresco

### Simulación de secado

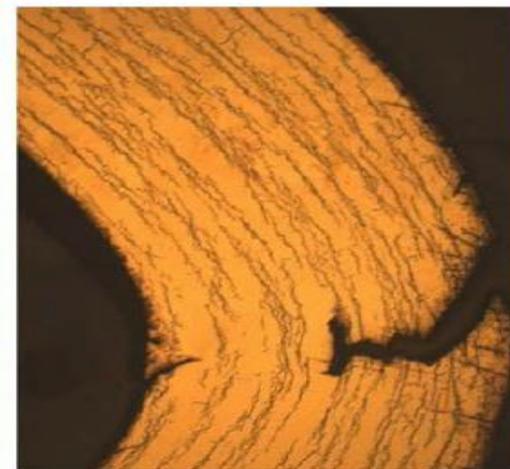
Secado: RCT 135°C,  $\sigma_{\theta, max} = 110 \text{ MPa}$ , blister a las 12



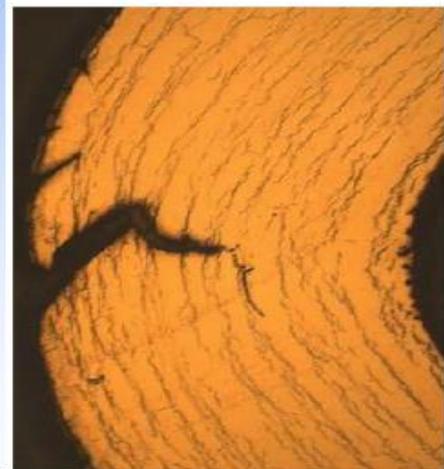
12 o'clock Position



6 o'clock Position



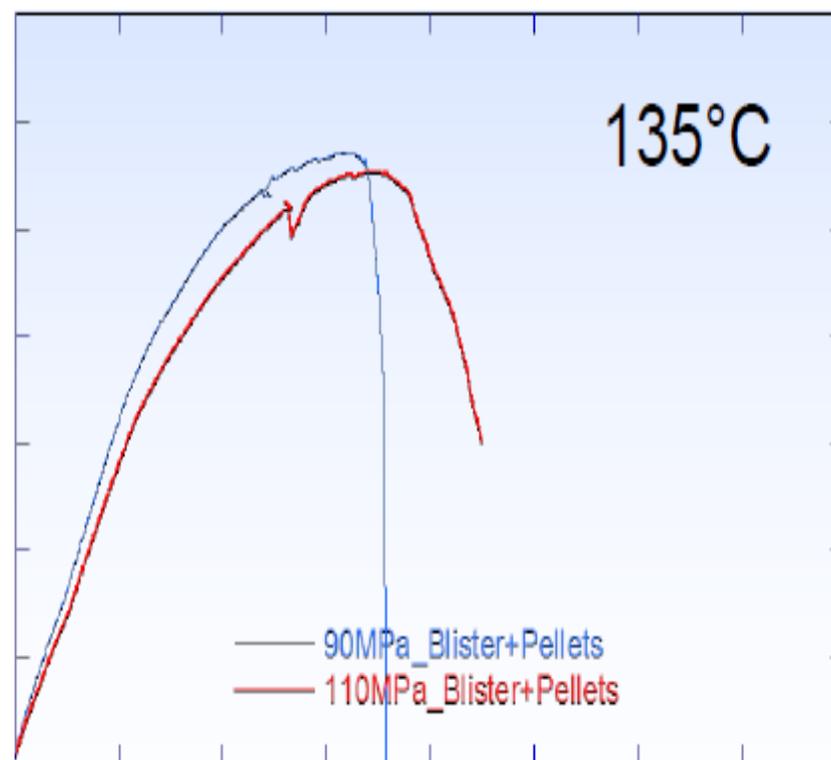
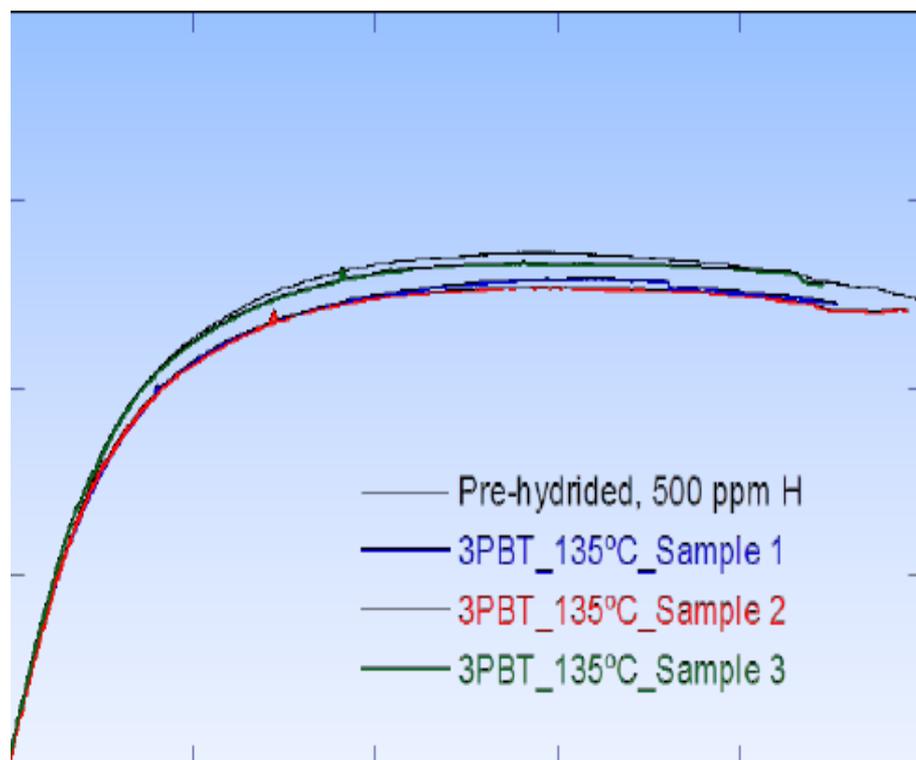
3 o'clock Position



9 o'clock Position

## 22 | Resultados con material fresco

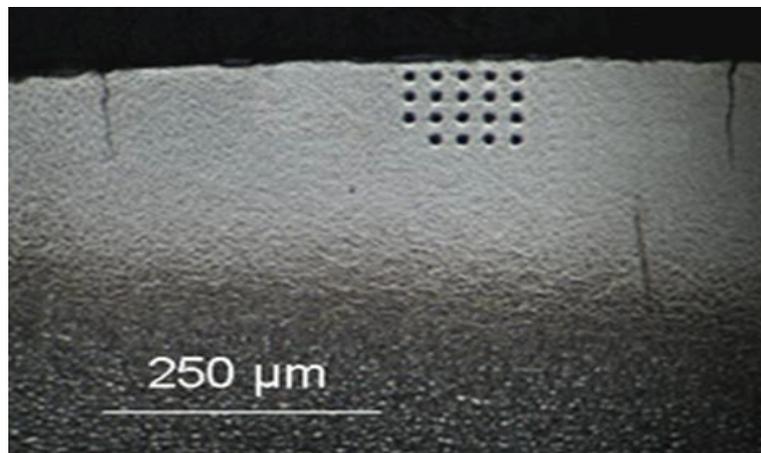
### Simulación de secado + pastilla simulada+ 3PB



## 23 | Resultados con material fresco

### Nanoindentación

- Se pudo calcular
  - el módulo de Young del blister y del material por debajo del mismo, siendo valores similares.
  - La dureza del blister. Los resultados son compatibles con los reportados por Studsvik en el programa de vainas irradiadas
- Combinando estas medidas con un algoritmo iterativo en un modelo de elementos finitos se ha calculado la ecuación constitutiva del blister



## 24 | Aplicaciones en procesos de licencia

- Durante la realización de este proyecto de I+D, se estaba evaluando una solicitud relacionada con presencia de spalling en barras combustibles y su consideración para su tratamiento en contenedores de almacenamiento y transporte
- Los datos obtenidos del proyecto sirvieron para una mejor comprensión del problema planteado (retorno inmediato)
- Es complicado gestionar a la vez ambos procesos, pero sin los resultados del proyecto de I+D, el resultado del proceso de evaluación habría sido muy distinto

## 25 | Repercusión internacional

- La existencia de combustible gastado con spalling es un hecho que ocurre en distintas partes del mundo (aunque no en todas se reconoce, o no se considera un problema)
- No hay muchos resultados experimentales disponibles
- Varias organizaciones mostraron interés por los resultados:
  - CCNN españolas PWR-W
  - Westinghouse
  - IRSN
- Aunque no era un objetivo del proyecto, la venta de resultados ha permitido recuperar más del 46% del coste inicial, lo que incide en el interés de los resultados obtenidos

## 26 | Resumen y conclusiones 1/2

- ENUSA-ENRESA-CSN han realizado un importante proyecto de investigación sobre las características y propiedades mecánicas de combustible gastado con vainas con spalling
- El proyecto ha tenido una fase con combustible irradiado (Studsvik) y otra con vainas frescas con simulación de blister (UPM-Departamento de Ciencia de Materiales)
- A pesar de las dificultades presentes en un programa experimental (entre las que cabe destacar la falta de blister debajo de muchas muestras con spalling, o ver qué morfología de blister era la más adecuada para los ensayos con muestras no irradiadas) se consideran cubiertos los objetivos del proyecto
- Se han usado ensayos no destructivos (video, profilometría, dimensional, etc.), ensayos mecánicos (burst, ensayos de flexión, RCT, [H], etc.) y desarrollado técnicas de hidruración y generación de blisters

## 27 | Resumen y conclusiones 2/2

- Los resultados obtenidos (desde el punto de vista del CSN) han permitido obtener el conocimiento necesario para realizar mejores evaluaciones de solicitudes presentadas (y se esperan más en el futuro)
- Aparte del conocimiento adquirido por las partes firmantes, se ha establecido una importante colaboración con el departamento de Ciencia de Materiales (UPM)
- El grupo de la UPM ha realizado 4 artículos en revistas indexadas y diversas participaciones en congresos, convirtiéndose en referente internacional
- Importante retorno económico

## 28 | Agradecimientos



- Comité Técnico: Cristina Muñoz (ENUSA), Javier Fernández (ENRESA) Y Ana Muñoz (ENRESA)
- Manuel Quecedo y José Manuel Conde (ENUSA), Francesco Corleoni
- El grupo de la UPM, especialmente a Jesús Ruiz y Miguel Ángel Rengel
- Consuelo Alejano (CSN)



**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**