PROYECTO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA CARACTERIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE BARRAS DE COMBUSTIBLE NUCLEAR CON EXFOLIACIÓN EN CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

REUNIÓN DE CIERRE

12 de diciembre de 2017

Jesús Ruiz Hervías, Miguel Ángel Martín Rengel,
Francisco Javier Gómez Sánchez

ÍNDICE

- INTRODUCCIÓN
- CAPACIDADES DE INVESTIGACIÓN
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES

INTRODUCCIÓN

- **Objetivo proyecto:** estudio comportamiento mecánico vainas con ampollas de hidruros
  - Reproducir muestras vainas con ampolla de hidruros (“blister”) representativas de exfoliación de óxido.
  - Caracterizar comportamiento mecánico vainas con ampollas: condiciones de secado y transporte.
  - Desarrollar criterios operativos para combustible afectado por exfoliación.
- Fases del proyecto:
  - Fase I (2005-2010): almacenamiento
  - Fase II (2010-2013): transporte
  - Fase III (2014-2017): exfoliación
- **Material utilizado:** Zirlo™ sin irradiar precargado H

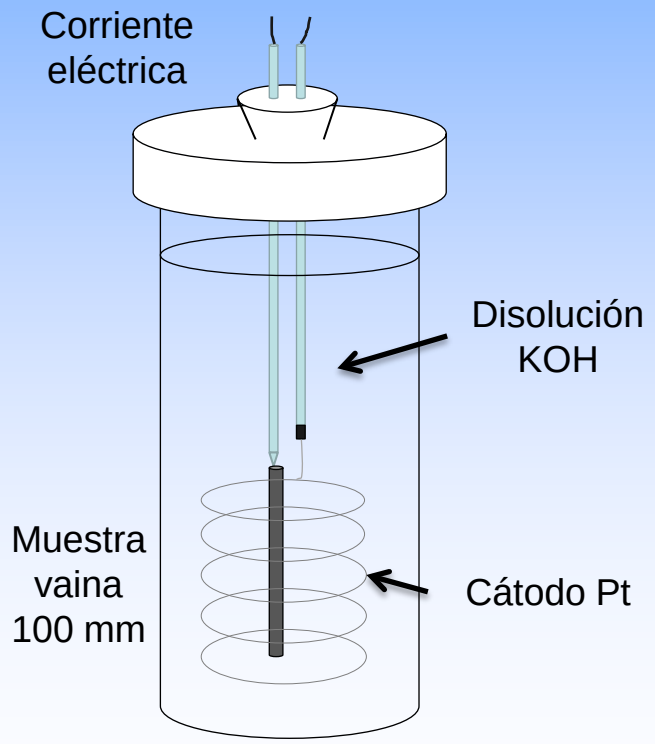
INTRODUCCIÓN

Objetivos proyecto	Actividades	
Preparación y caracterización muestras	A1	Carga catódica H Generación blisters Simulación proceso secado Caracterización metalográfica
Evaluación integridad estructural durante secado	A2	Ensayos reventado en muestras con blisters
Caracterización mecánica en transporte	A3	Ensayos compresión diametral
		Ensayos flexión en tres puntos
Reducción de conservadurismos en transporte	A4	Ensayos compresión diametral
		Ensayos flexión en tres puntos
Caracterización mecánica del blister mediante indentación instrumentada	A5	Ensayos de indentación instrumentada

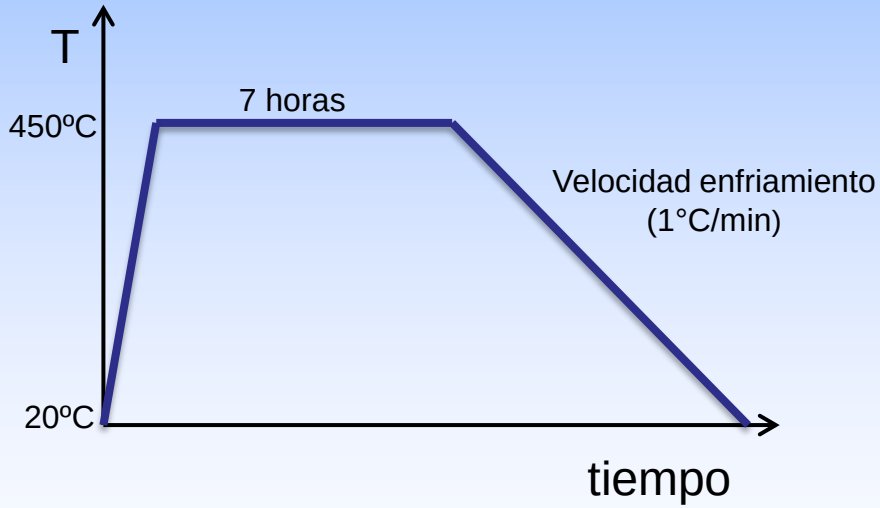
CAPACIDADES

Hidruración de muestras de vaina

Proyecto exfoliación: muestras de 100 mm longitud, pre-hidruración mediante carga catódica (500 ppm H)



+



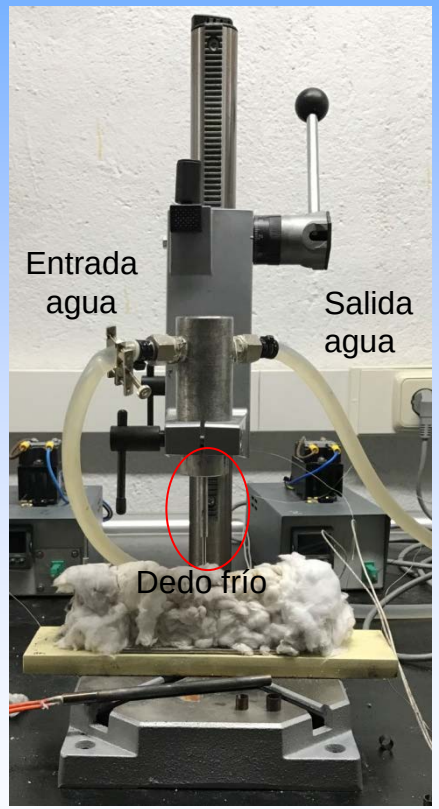
CAPACIDADES

Hidruración de muestras de vaina

Medida del contenido de hidrógeno en las muestras
Analizador de hidrógeno HORIBA JOBIN YVON EMGA-621W

CAPACIDADES

Generación de “blisters” en muestras pre-hidruradas



Dispositivo experimental

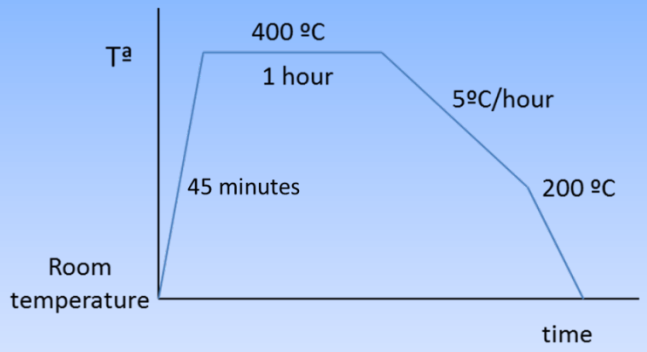
Detalle dedos fríos

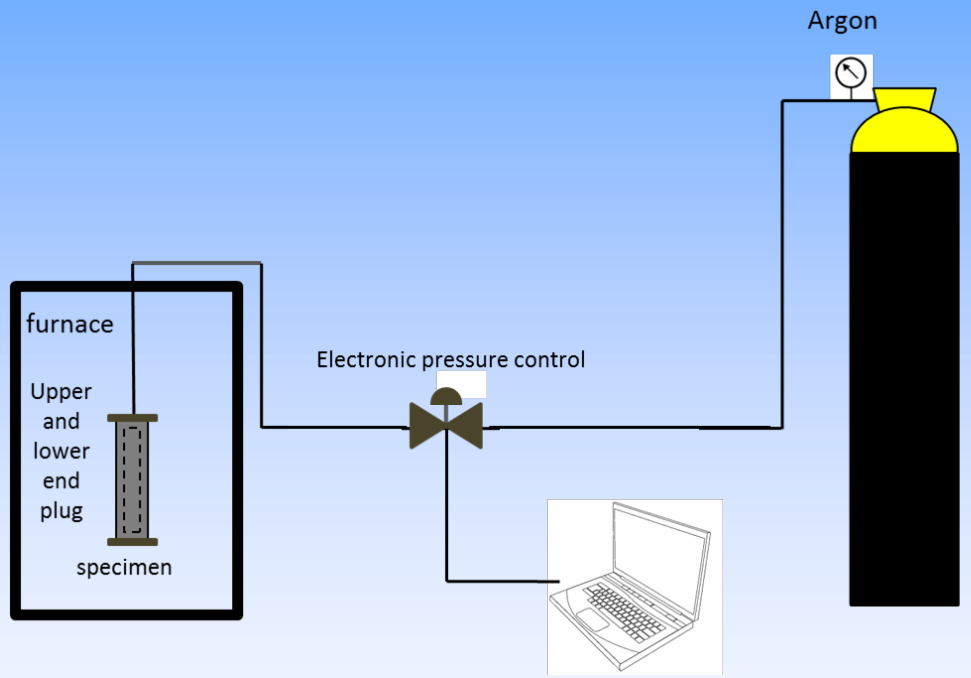
Blister tipo1

Blister tipo2

CAPACIDADES

Simulación del proceso de secado



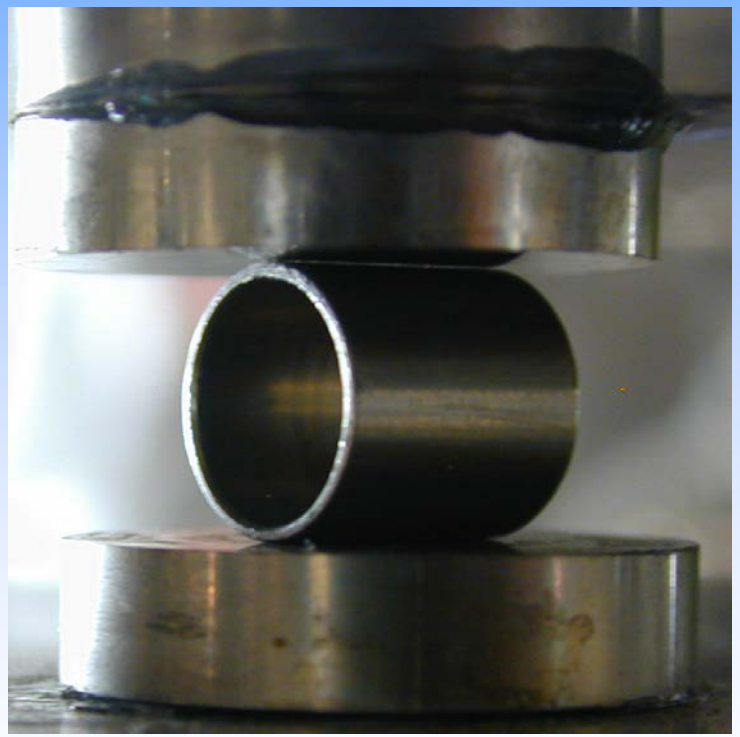


	20ºC	400ºC	200ºC
Sigma θ (T2), Mpa	P1, MPa	P2, Mpa	P3, Mpa
110	6,55	15,06	10,58
90	5,37	12,34	8,67

Dispositivo experimental de simulación del secado

CAPACIDADES

Ensayos compresión diametral y flexión 3P



Compresión diametral

Flexión en tres puntos

CAPACIDADES

Ensayos de reventado

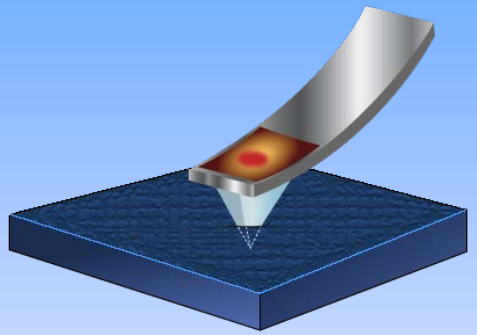
Dispositivo experimental

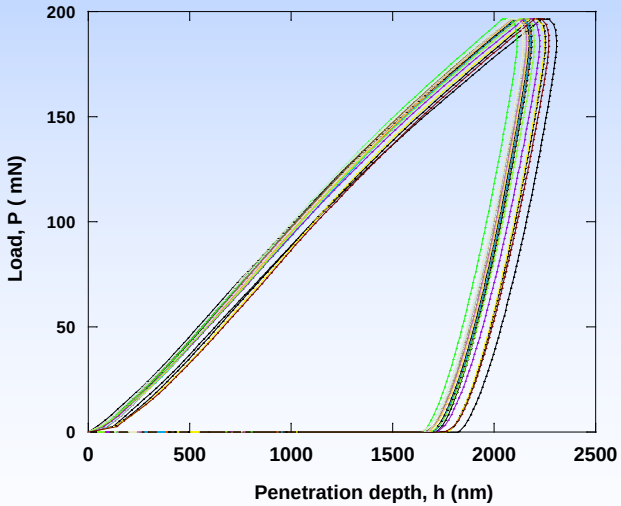
Antes de ensayar

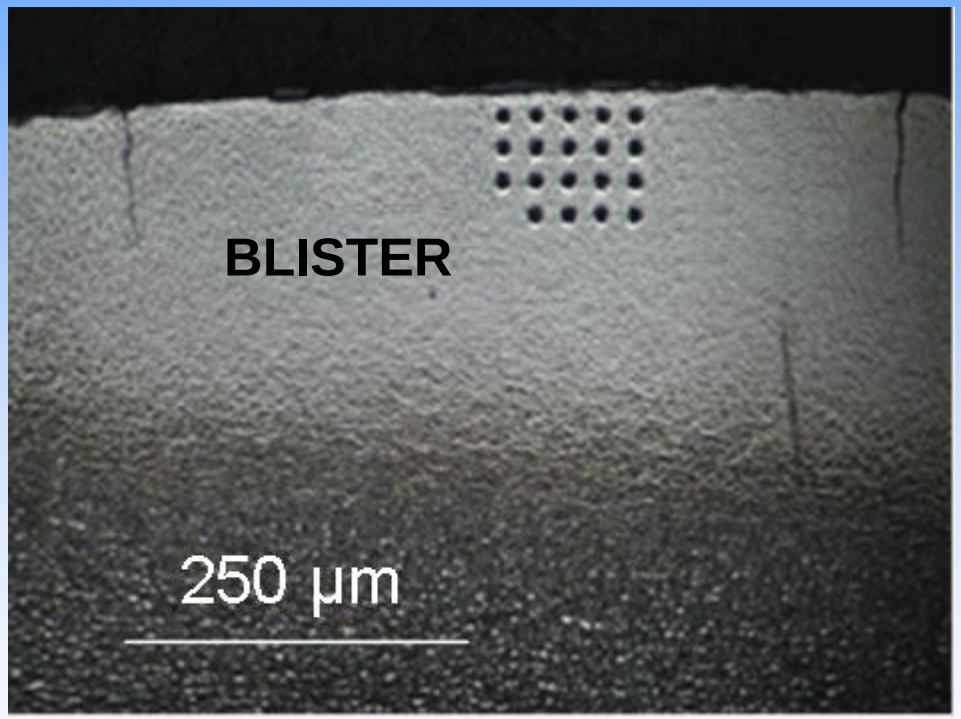
Después del ensayo

CAPACIDADES

Ensayos nano-mecánicos en vaina







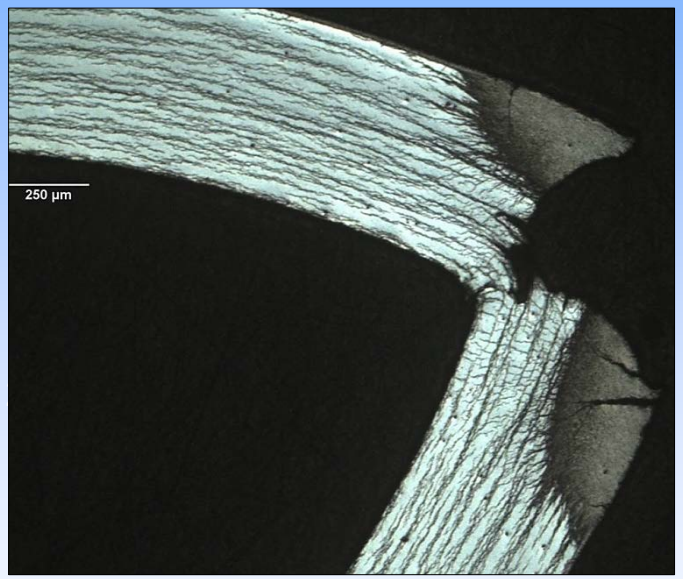
Nanoindentación en muestra con blister

M.A. Martin Rengel et al.

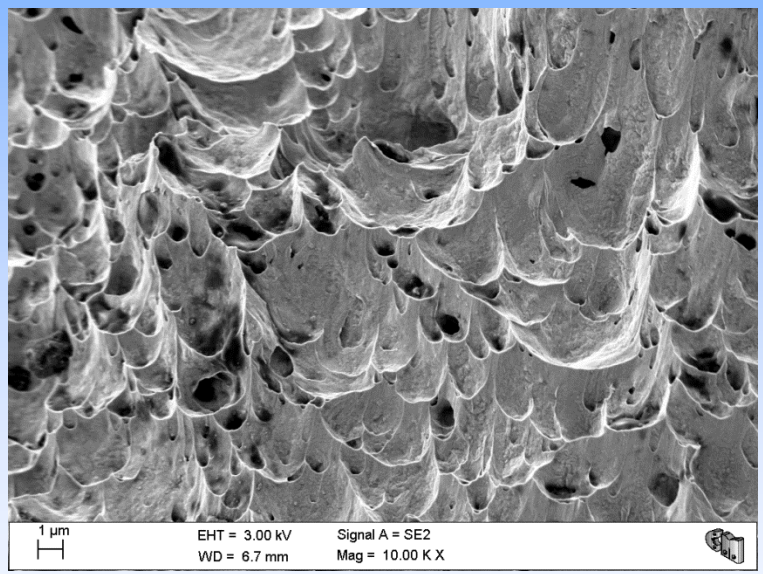
Journal of Nuclear Materials (487) 2017, 220-228

CAPACIDADES

Microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM)



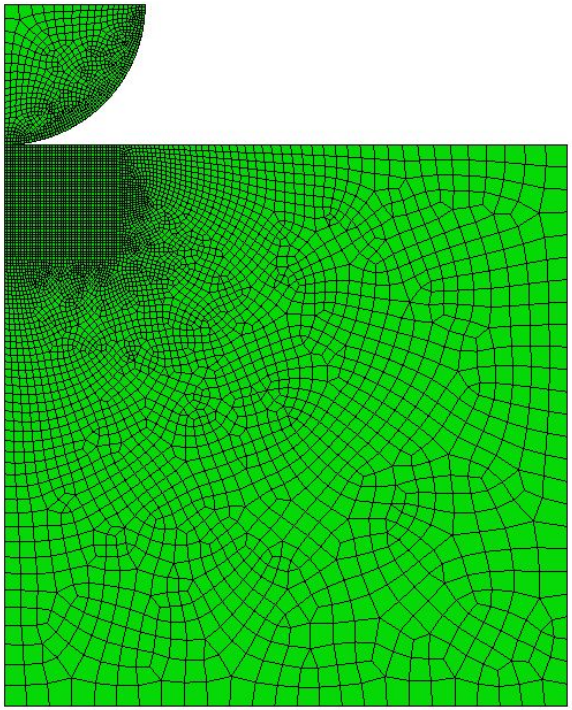
Rotura muestra con
blister (compresión diametral)

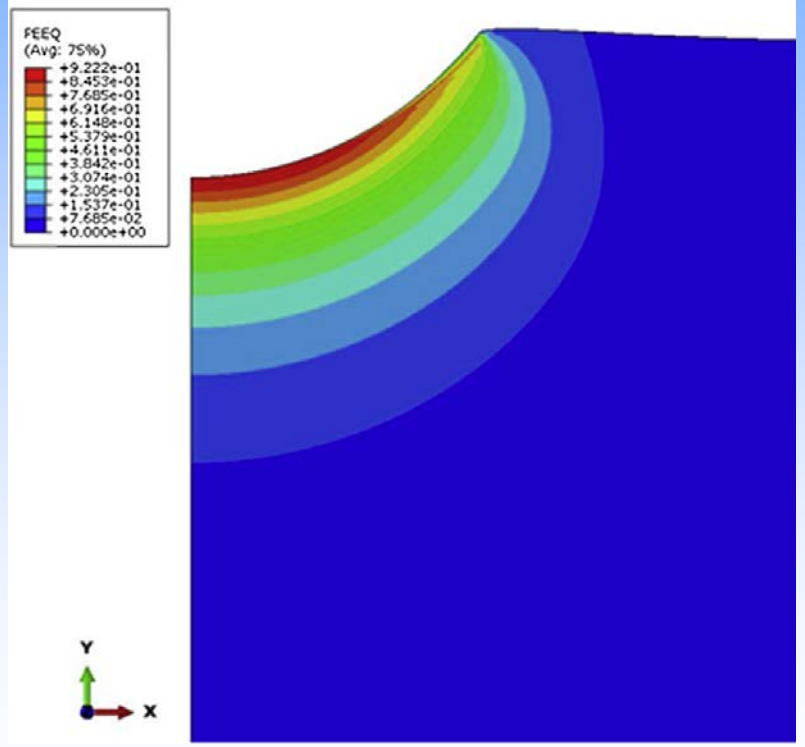


Fractografía muestra ensayo
reventado (estado recepción)

CAPACIDADES

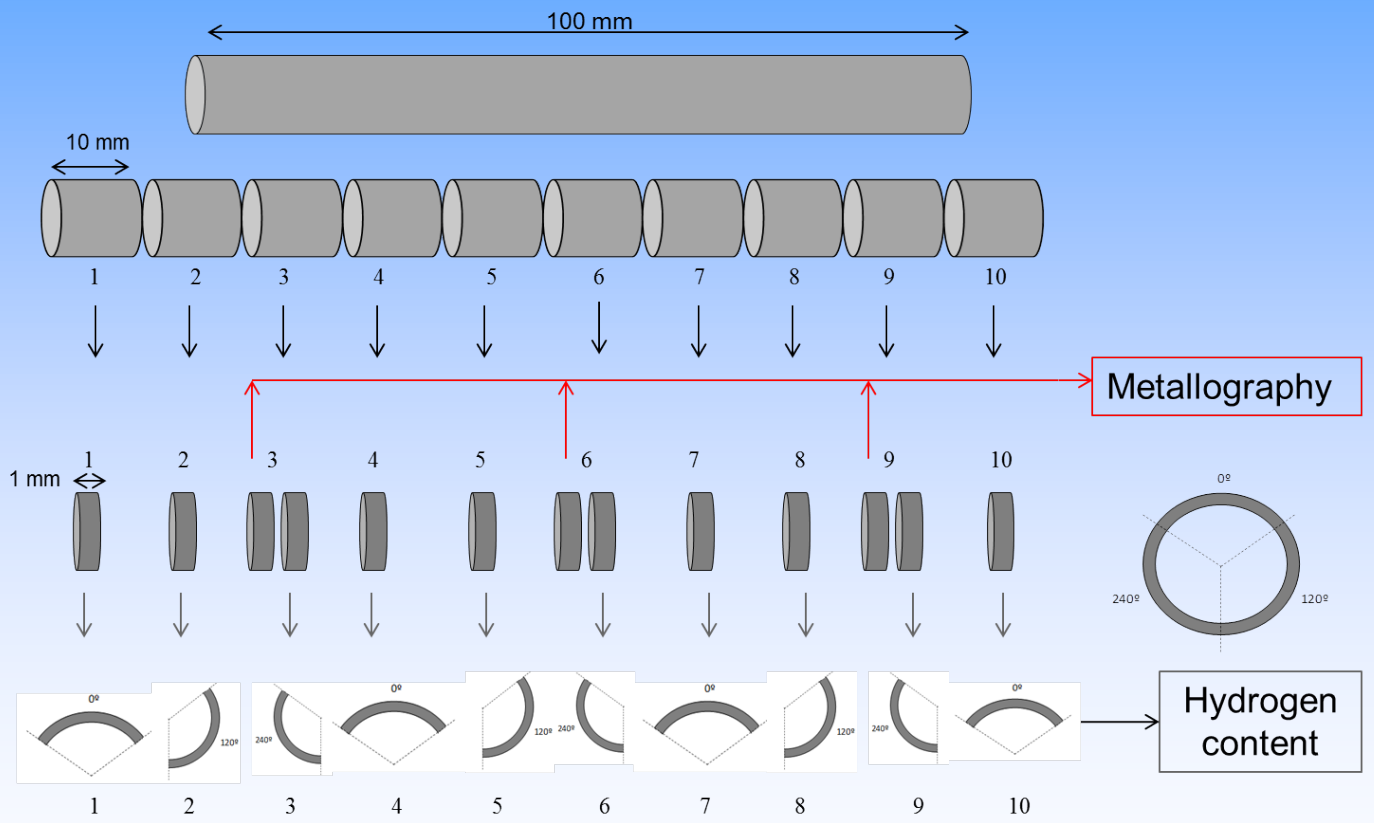
Simulación numérica avanzada (elementos finitos)





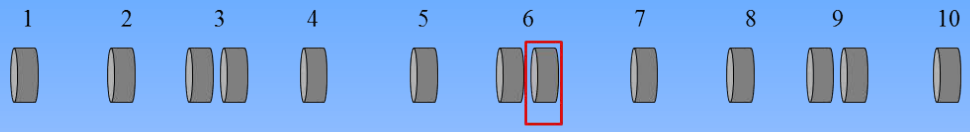
RESULTADOS

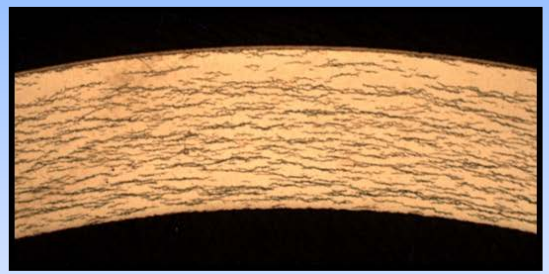
Hidruración muestras 100 mm longitud



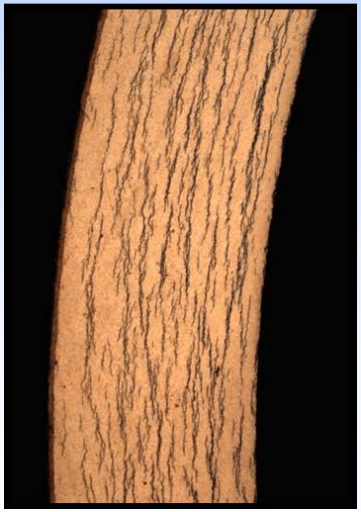
RESULTADOS

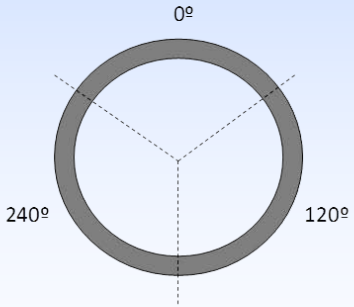
Hidruración homogénea muestras 100 mm longitud





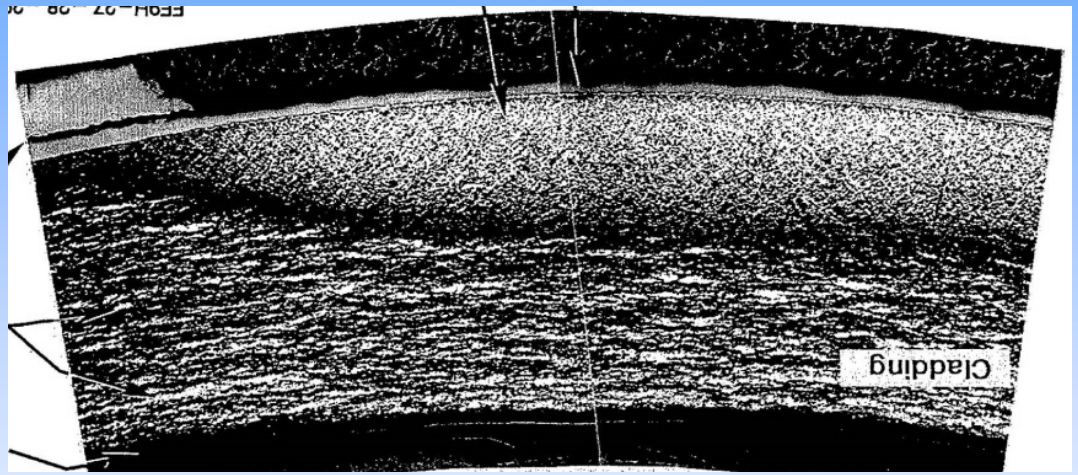
$$\langle H \rangle = 550 \pm 10\ ppm$$



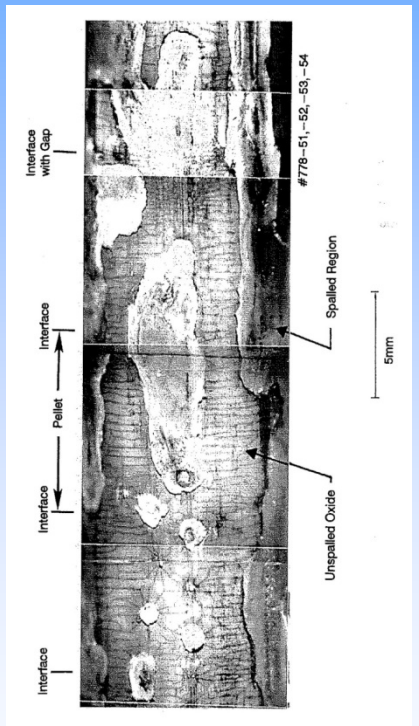


RESULTADOS

Apariencia de “blister” representativo



“Blister” modelo en Zry-4

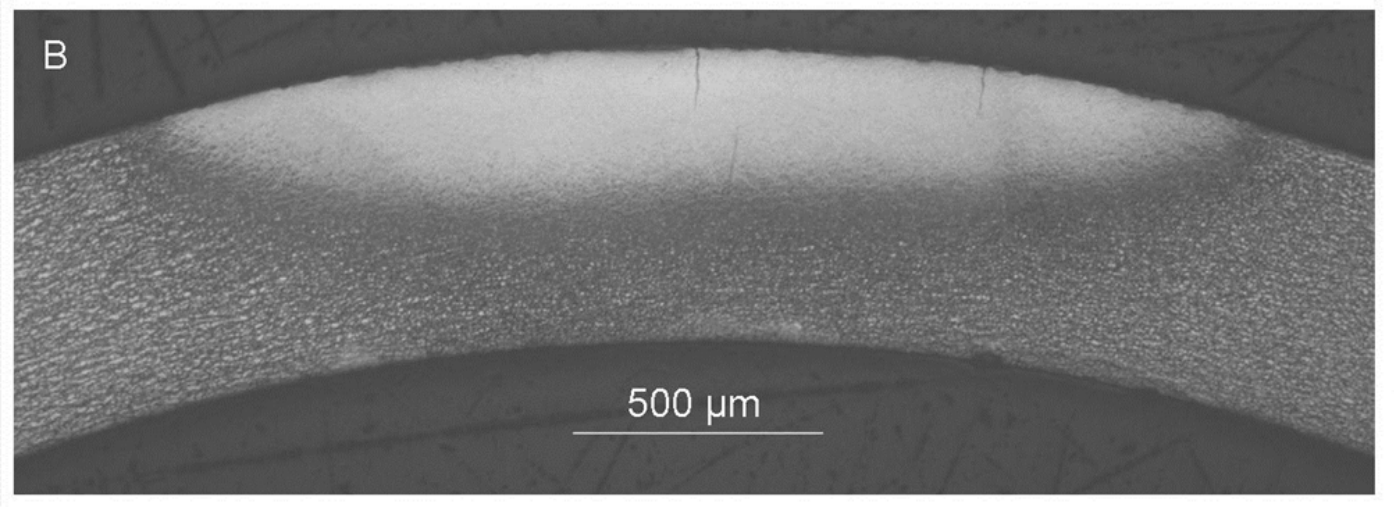


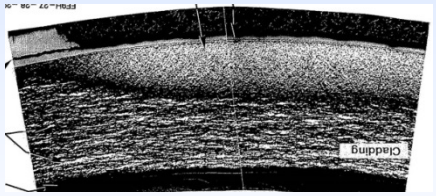
Desprendimiento de óxido por exfoliación y apariencia del blister (Zry-4)

EPRI “Hot Cell Examination of Extended Burnup Fuel From Calvert Cliffs-1”.Volume 2, Technical Report, Chalk River Laboratories (1994)

RESULTADOS

Blisters de laboratorio en Zirlo: tipo1

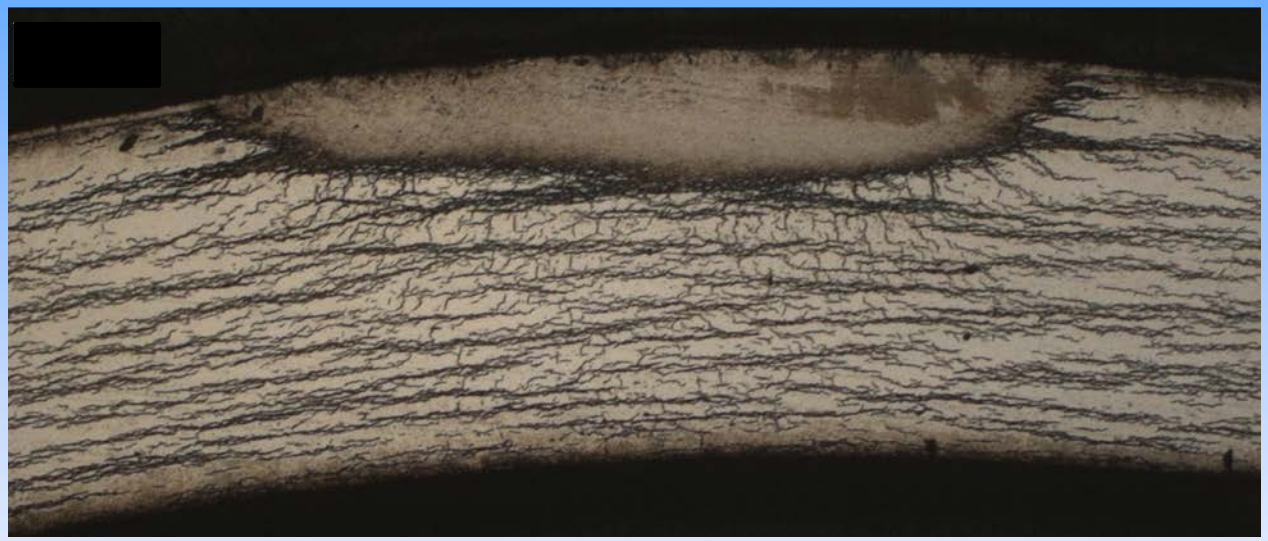




- **Forma similar al modelo (2 x 6 mm)**
- **Profundidad = 40-45% espesor pared**
- **No hay hidruros radiales bajo “blister”**
- **Elevada concentración hidruros alrededor**

RESULTADOS

Blisters de laboratorio en Zirlo: tipo2

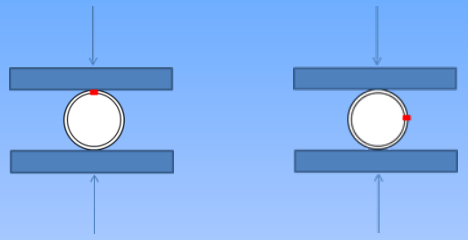


- Más pequeños que tipo 1 (1.3 x 3 mm)
- Profundidad = 35% espesor pared
- Hidruros radiales bajo “blister”
- Baja concentración hidruros alrededor

RESULTADOS

Ensayo de compresión diametral (RCT)

- Ensayos: blister a las **12** y a las **3**
- Control desplazamiento: 0.5 mm/min
- Temperaturas: 20 y 135°C
- Se ensayaron dos muestras adyacentes al blister: verificar ablandamiento

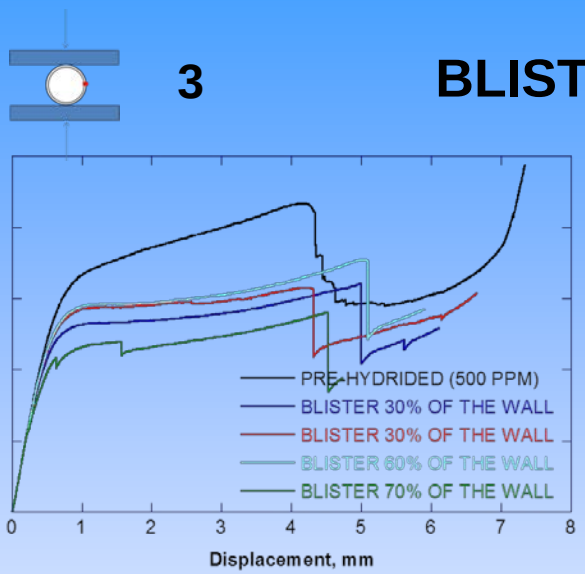


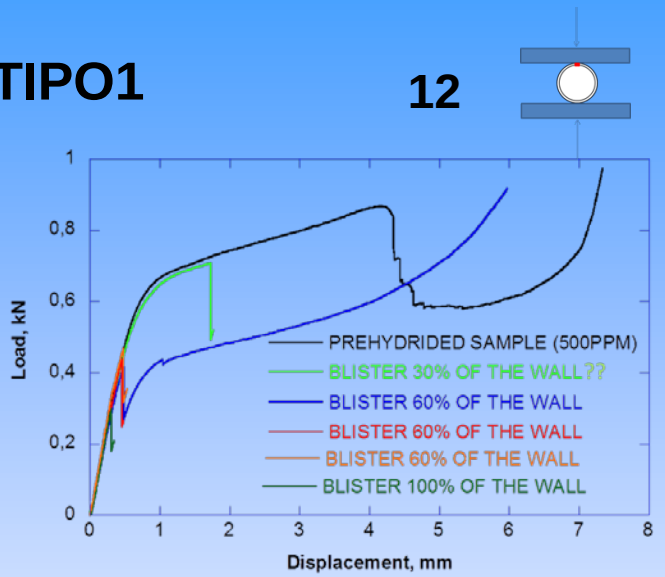
Ensayo de compresión diametral en muestra de vaina

RESULTADOS

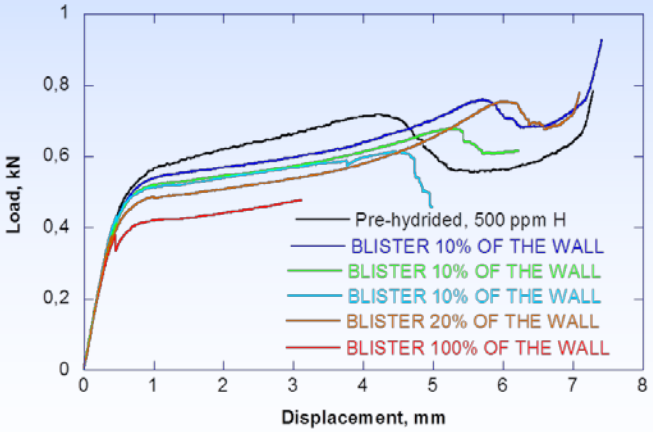
BLISTERS TIPO1

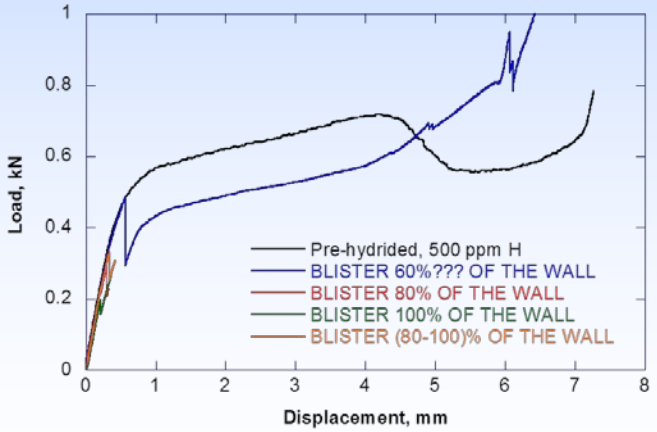
20 °C





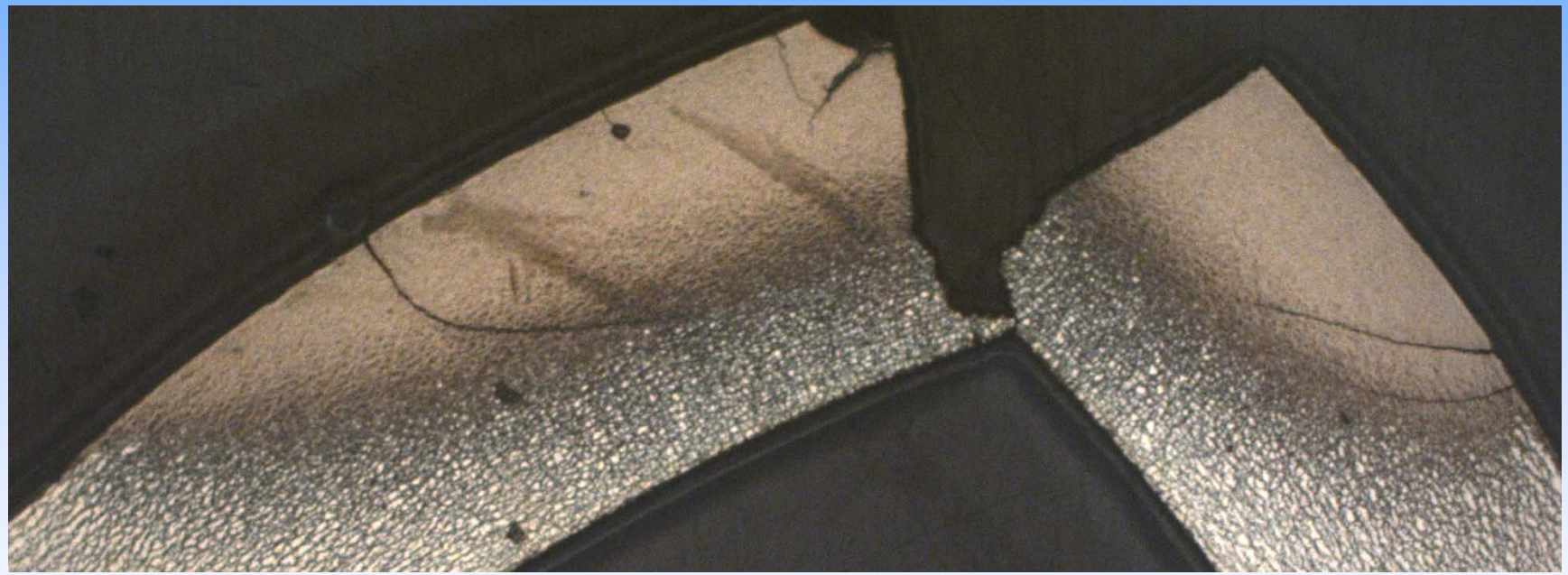
135 °C





RESULTADOS

Ensayo de compresión diametral (blister tipo1)



Muestra con blister tipo1 (anchura aproximada=60% de pared) ensayada a 20°C. Blister situado a las 3.

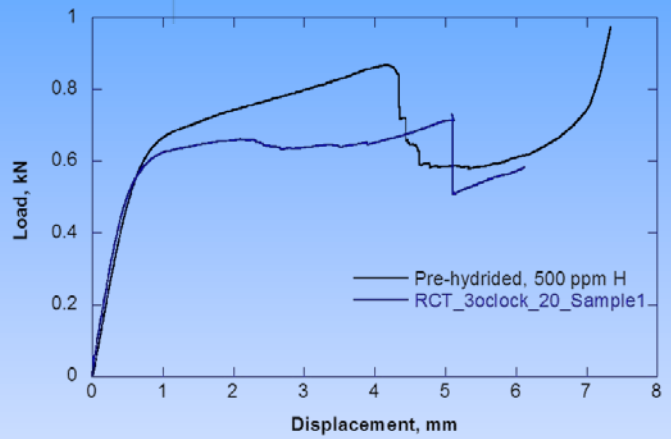
RESULTADOS

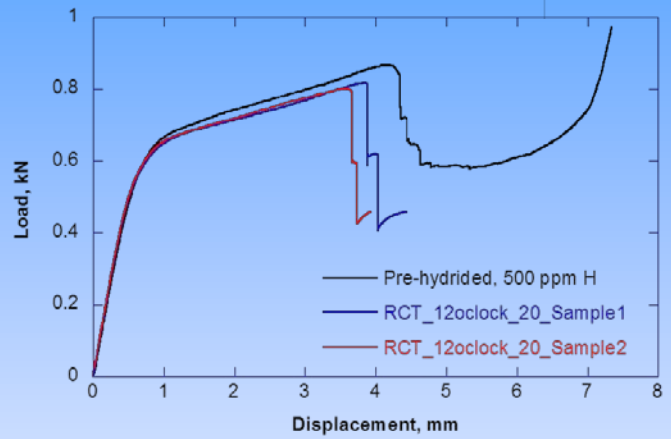
BLISTERS TIPO2

3

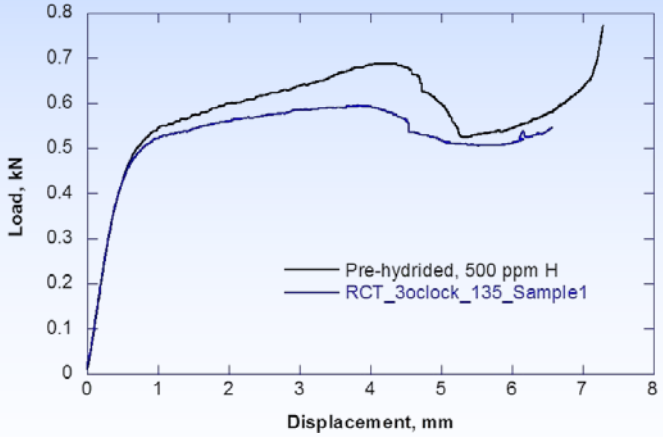
12

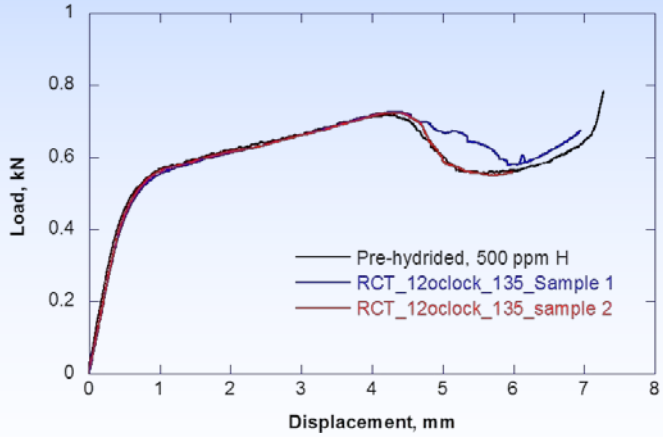
20 °C





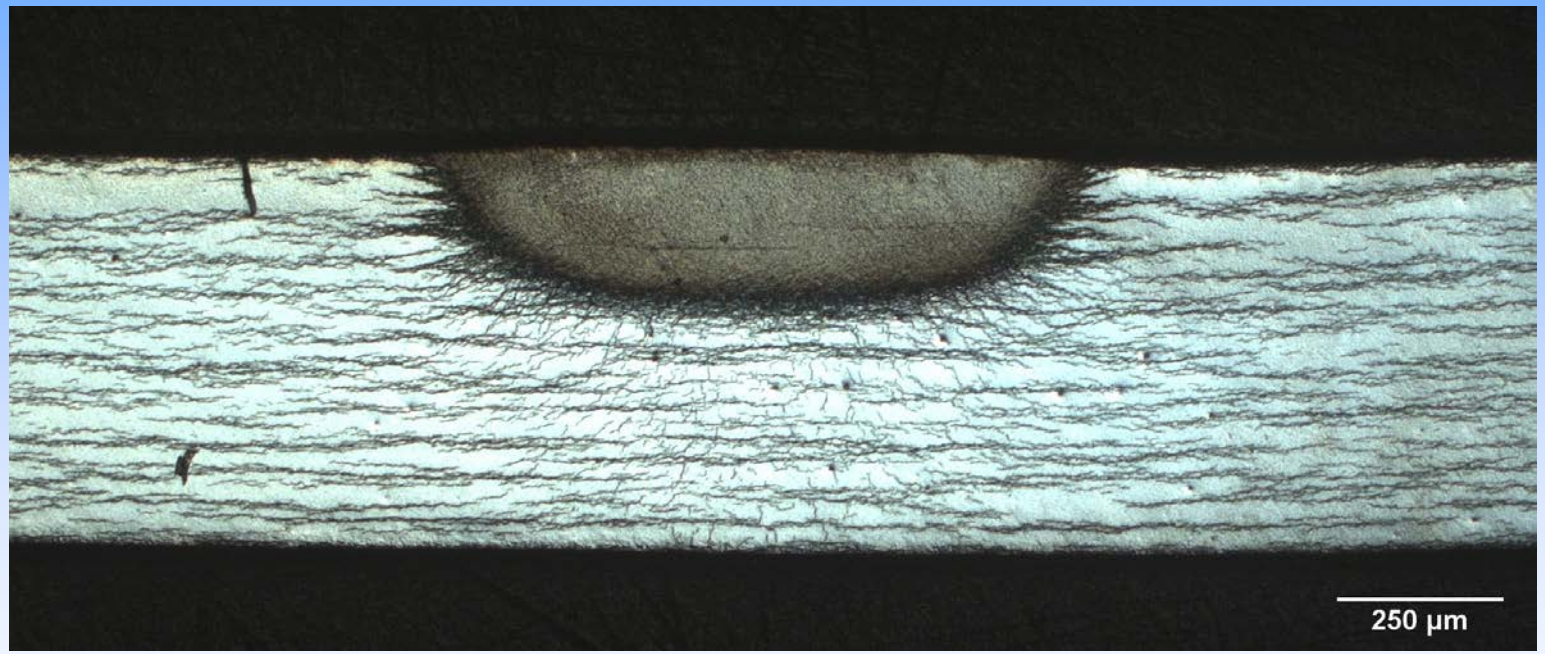
135 °C





RESULTADOS

Ensayo de compresión diametral (blister tipo2)



Muestra con blister tipo2 (anchura aproximada=40% de pared) ensayada a 135°C. Blister situado a las 12.

RESULTADOS

Ensayo de flexión en tres puntos (3PB)

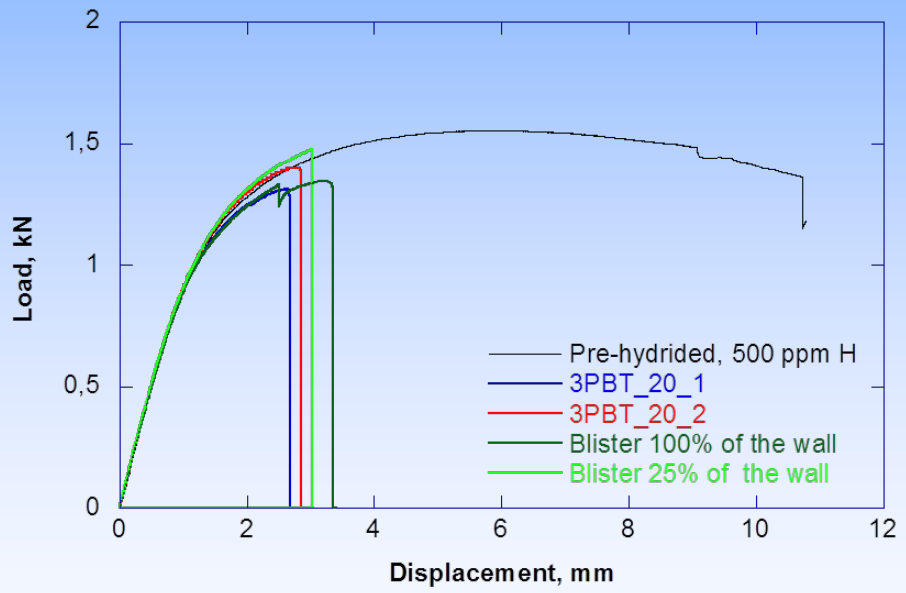
- Ensayos: blister en seccion central (muestras 100 mm)
- Control desplazamiento: 0.5 mm/min
- Temperaturas: 20 y 135°C

Ensayo de flexión en tres puntos (3PB) en muestra de vaina

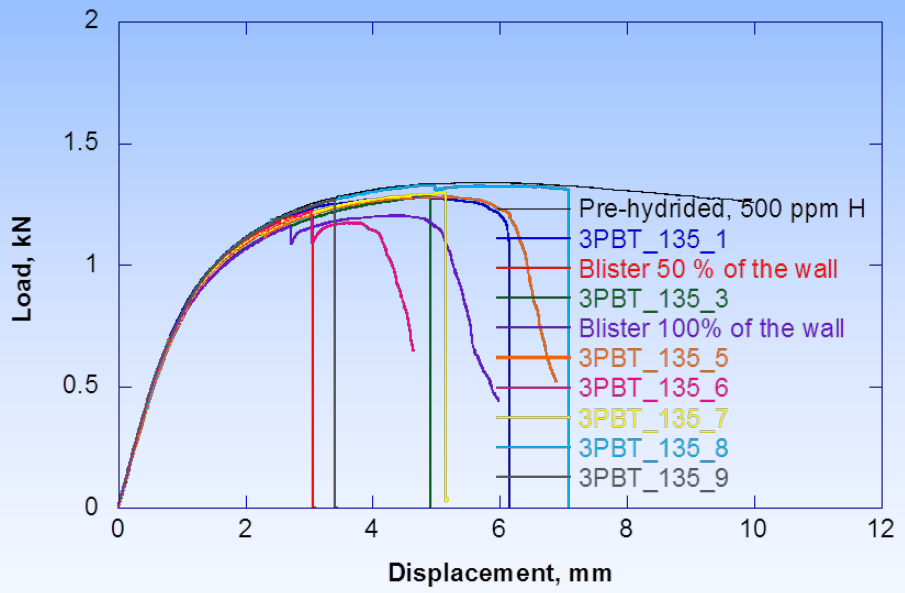
RESULTADOS

Ensayo de flexión en tres puntos (blister tipo1)

20 °C

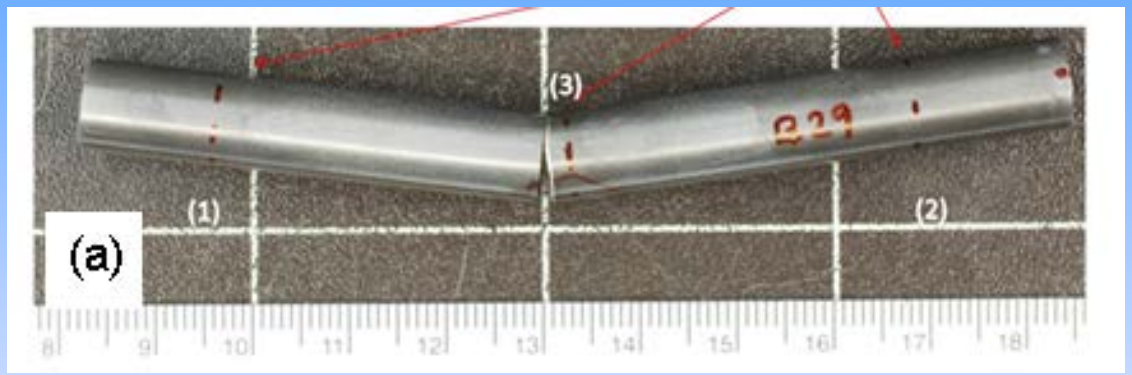


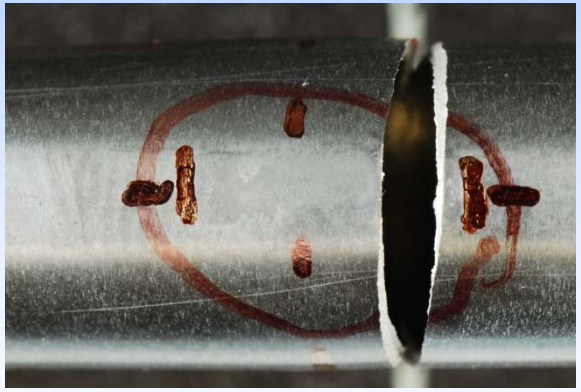
135 °C

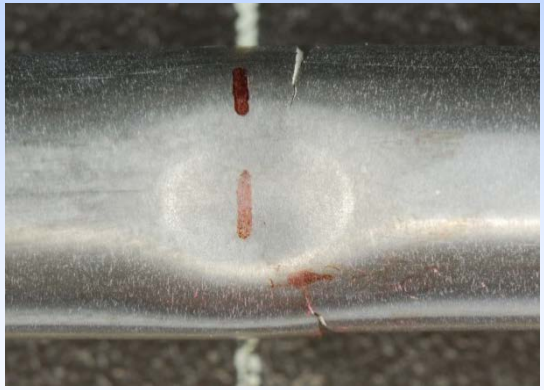


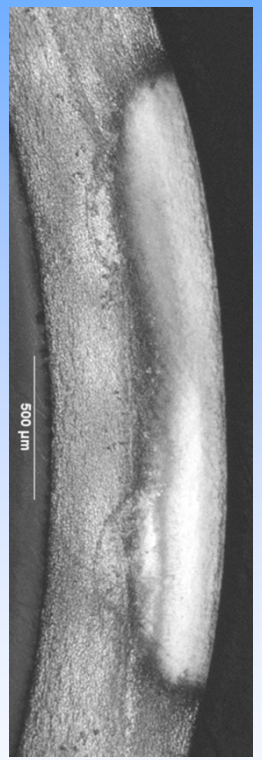
RESULTADOS

Ensayo de flexión en tres puntos (blister tipo1)







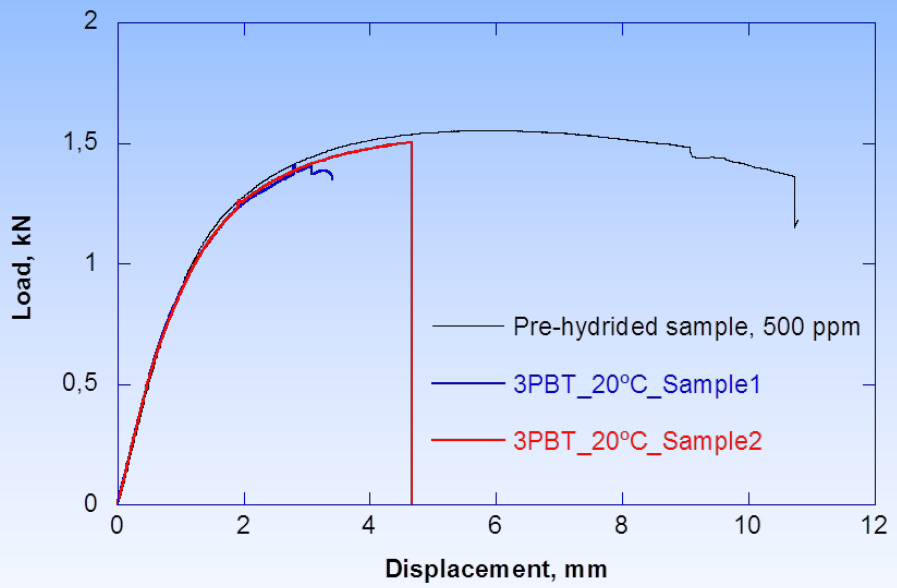


Blister tipo1 (anchura aproximada=50% de pared), 135°C

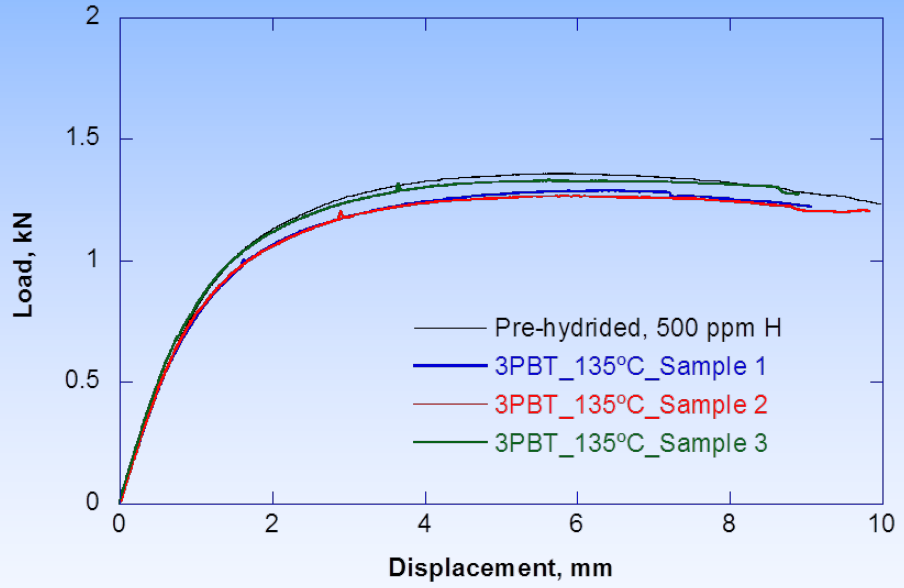
RESULTADOS

Ensayo de flexión en tres puntos (blister tipo2)

20 °C



135 °C



RESULTADOS

Ensayo de reventado: muestras con “blister”

MUESTRA	TEMPERATURA, ºC	PRESIÓN MAX., MPa	TENSIÓN ROTURA (dir. anular), MPa
Recepción	20	126	987
Recepción	135	103	807
Recepción	400	68	530
Blister tipo1	**135**	**21**	**164**
Blister tipo1	**350**	**55**	**428**
Blister tipo1	**400**	**64**	**498**
Blister tipo2	**135**	**77**	**601**
Blister tipo2	**350**	**61**	**477**
Blister tipo2	**400**	**57**	**450**

$$\sigma_\theta = p^* \frac{R}{e}$$

RESULTADOS

Fractografía: ensayo reventado blister tipo1 (350ºC)

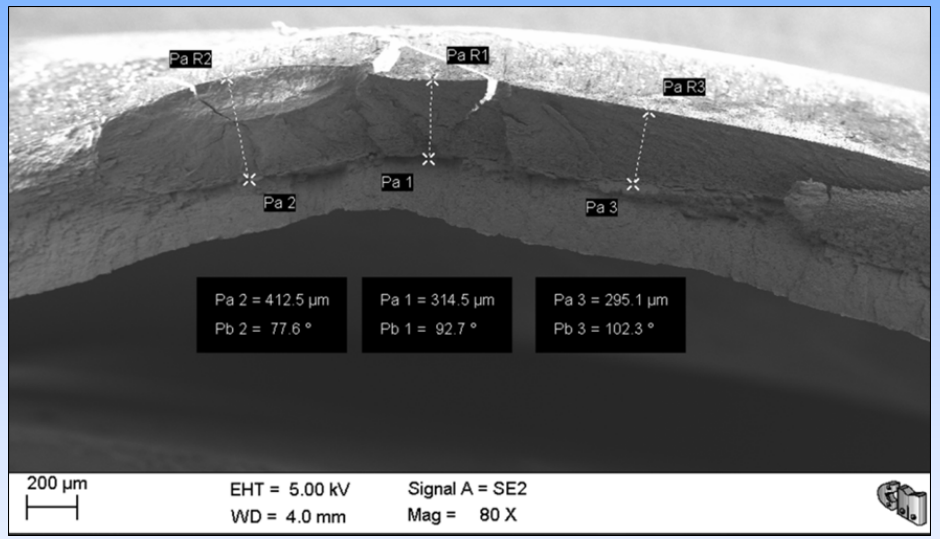
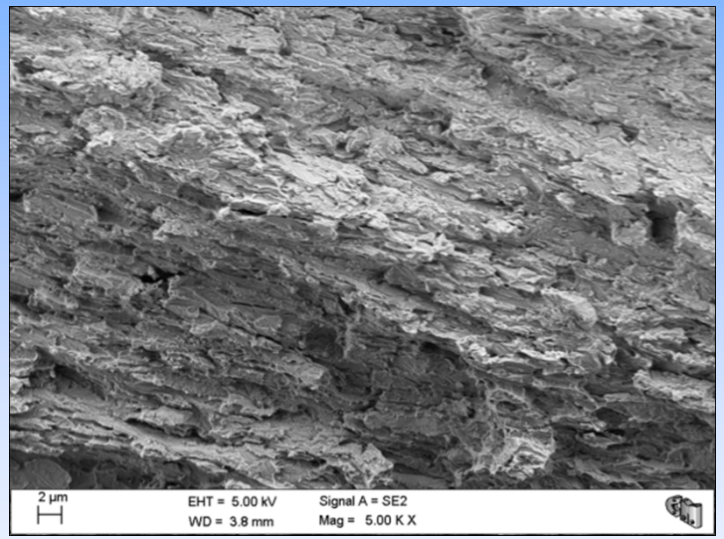


Imagen SEM de la zona del blister



Detalle de zona del blister

RESULTADOS

Fractografía: ensayo reventado blister tipo 2 (400ºC)

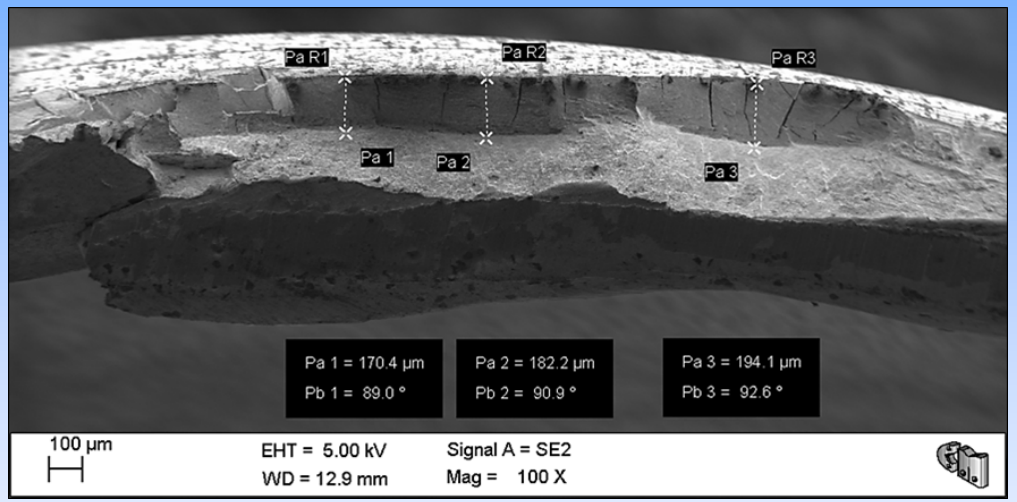
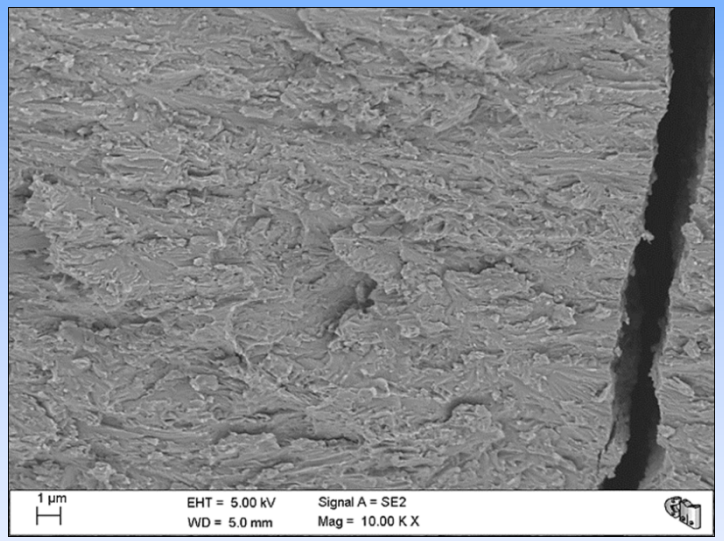


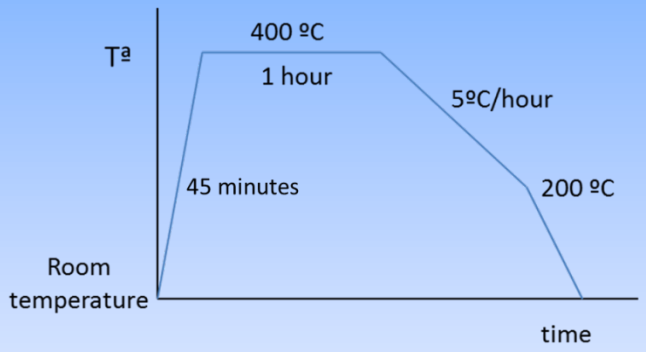
Imagen SEM de la zona del blister

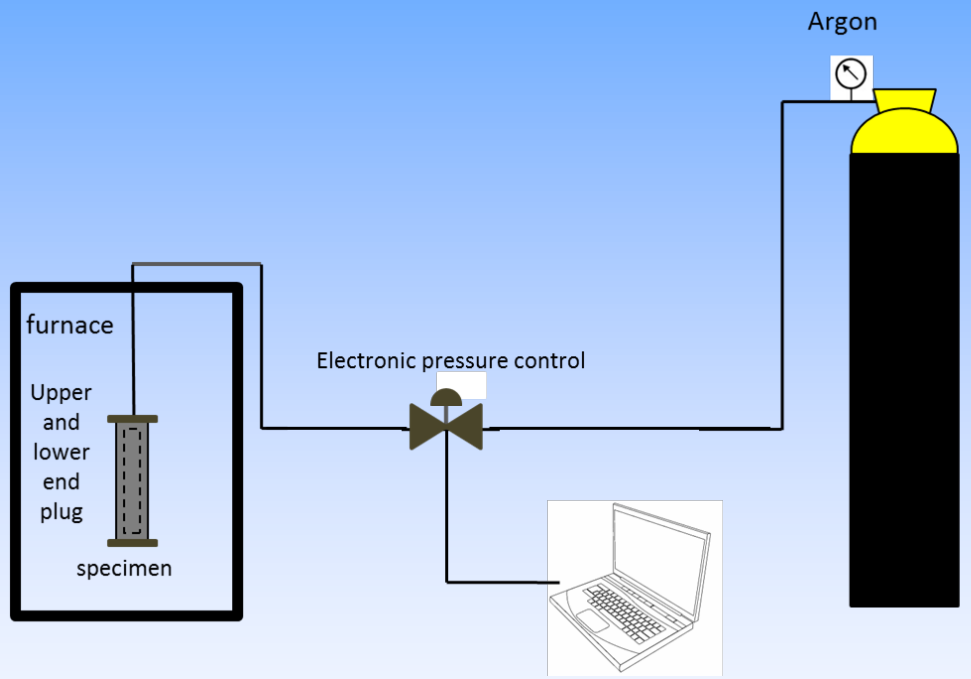


Detalle de zona del blister

RESULTADOS

Simulación del proceso de secado





	20ºC	400ºC	200ºC
Sigma θ (T2), Mpa	P1, MPa	P2, Mpa	P3, Mpa
110	6,55	15,06	10,58
90	5,37	12,34	8,67

Dispositivo experimental de simulación del secado

RESULTADOS

Secado: muestra prehidrurada, $\sigma_{\theta,max} = 110\ MPa$

12

9

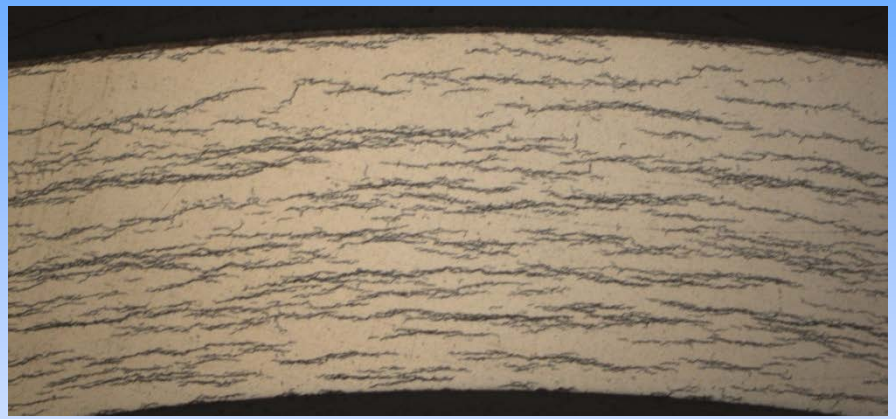
6

3

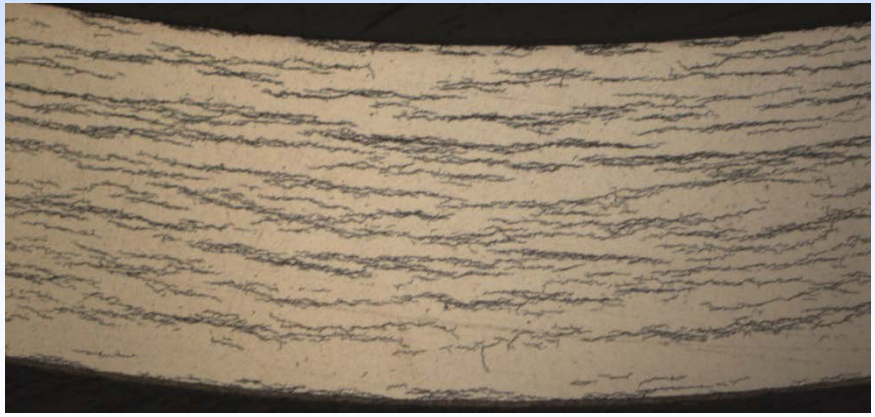
RESULTADOS

Secado: muestra prehidrurada, $\sigma_{\theta,max} = 90\ MPa$

12



9



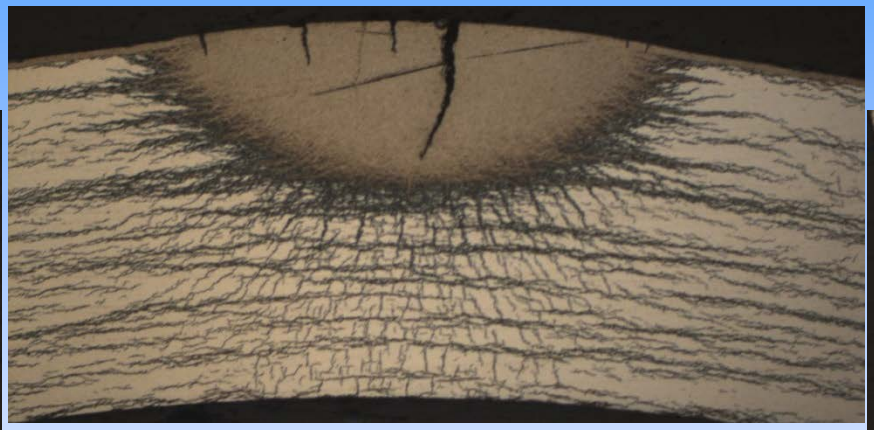
3

6

RESULTADOS

Secado: muestra blister, $\sigma_{\theta,max} = 90\ MPa$

12



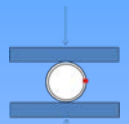
9

3

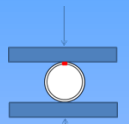
6

RESULTADOS

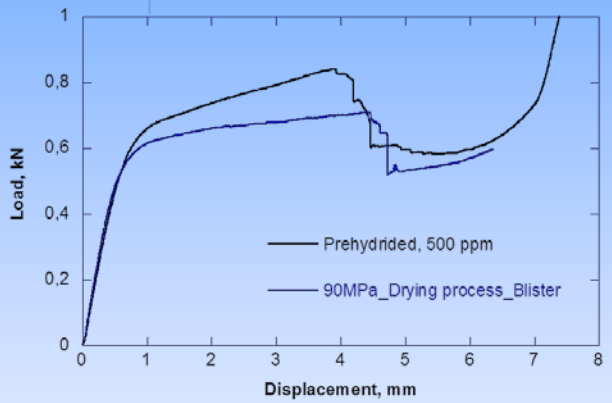
Secado: RCT blisters tipo 2, $\sigma_{\theta,max} = 90\ MPa$

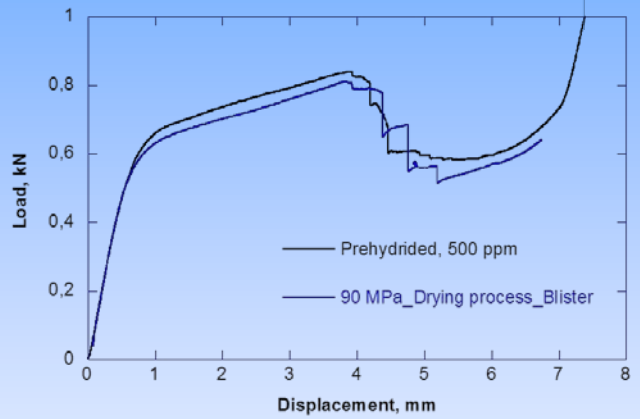


3 **BLISTERS TIPO2** 12

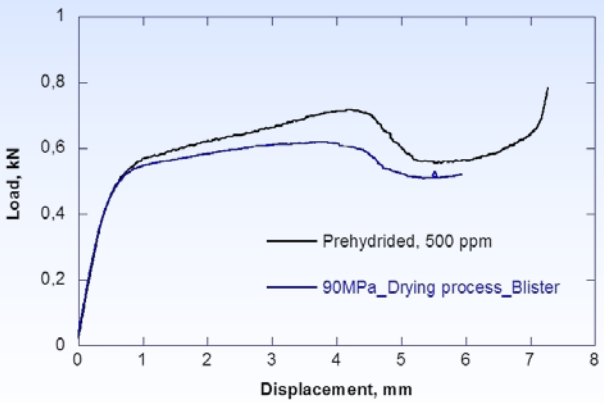


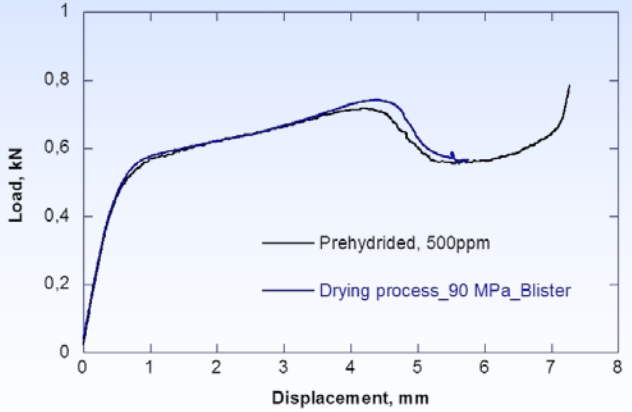
20 °C





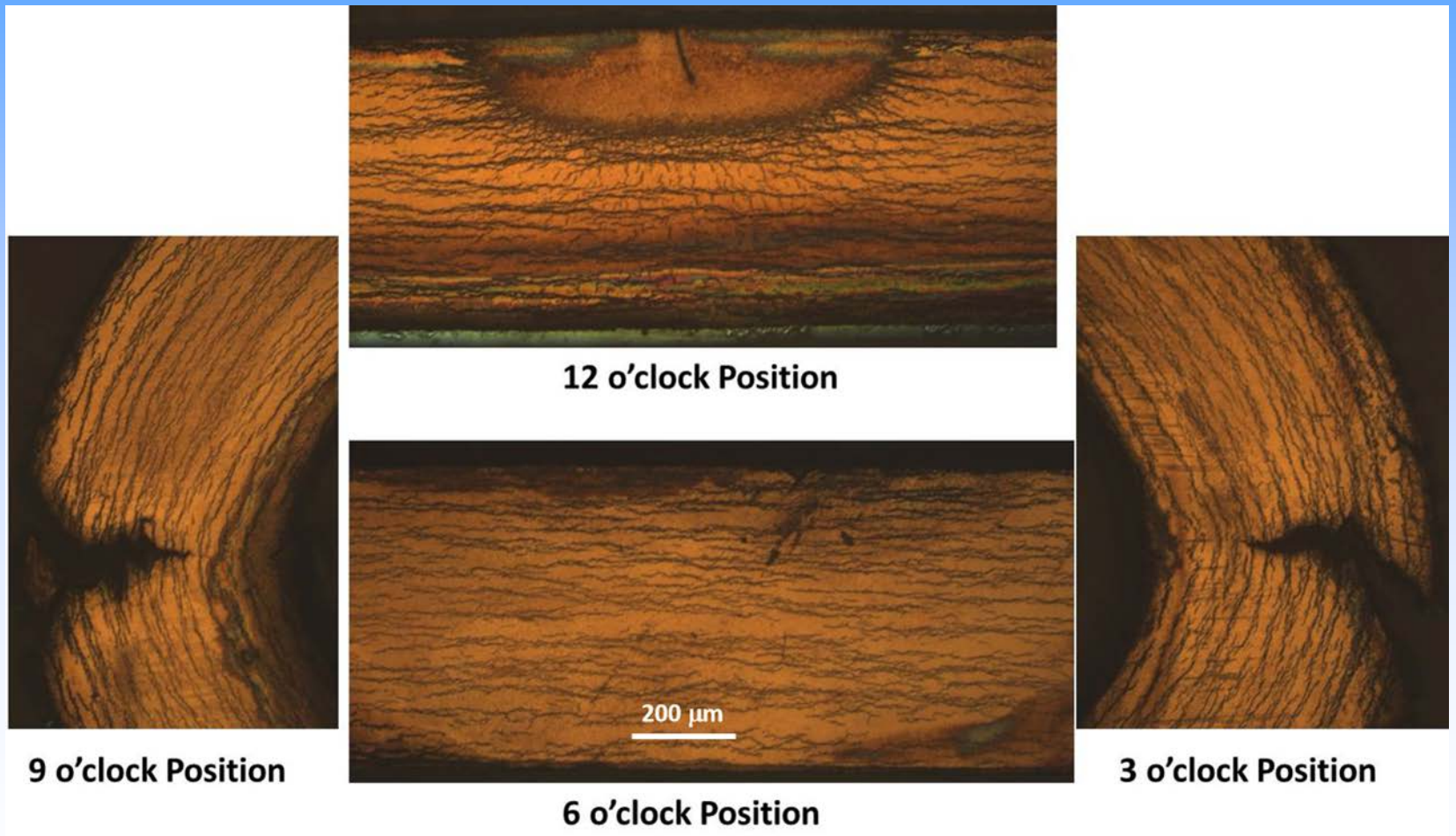
135 °C





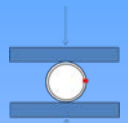
RESULTADOS

Secado: RCT 135ºC, $\sigma_{\theta,max} = 90\ MPa$, blister a las 12

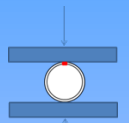


RESULTADOS

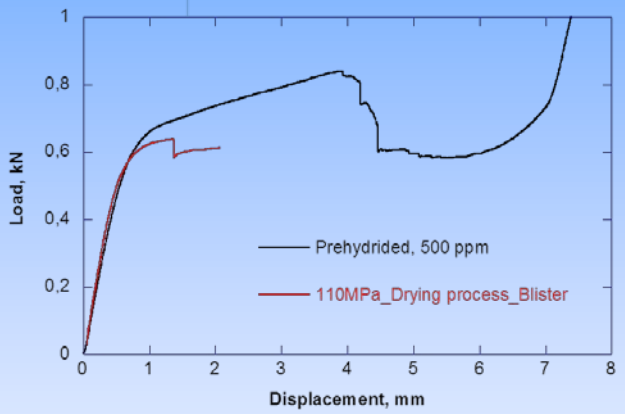
Secado: RCT blisters tipo 2, $\sigma_{\theta,max} = 110\ MPa$

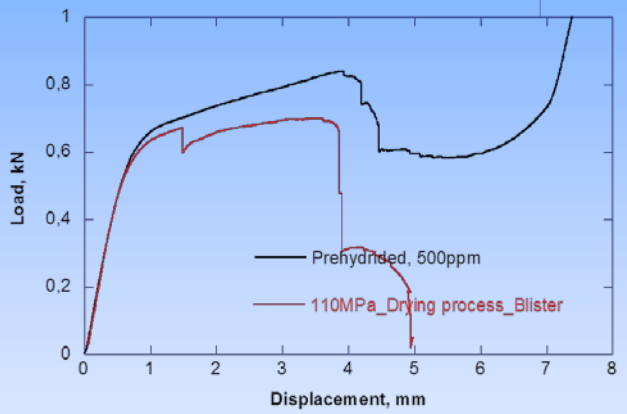


3 **BLISTERS TIPO2** 12

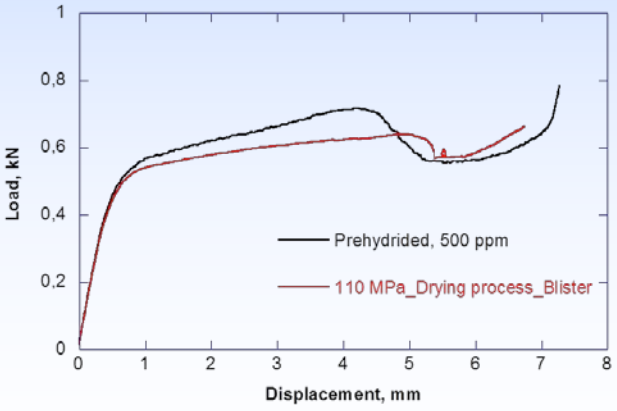


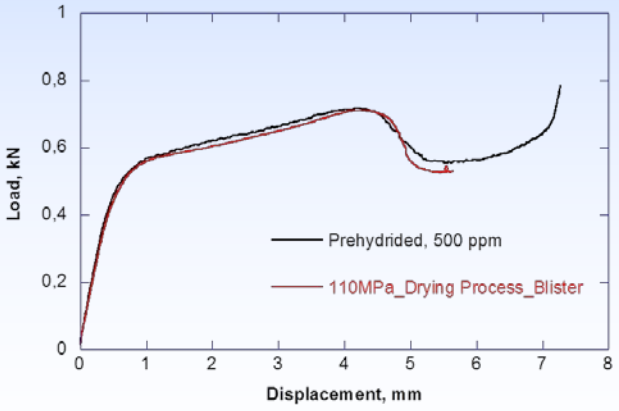
20 °C





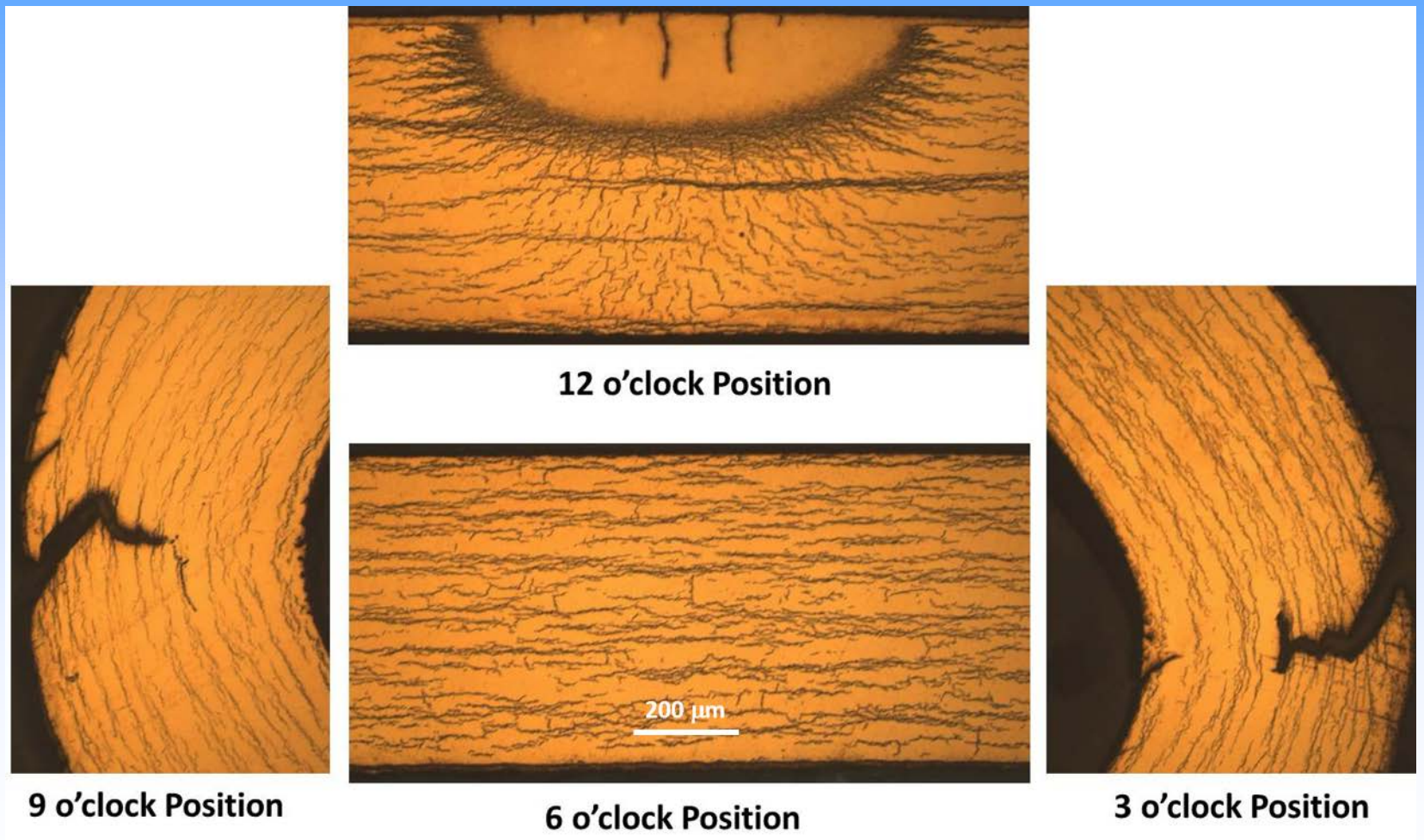
135 °C





RESULTADOS

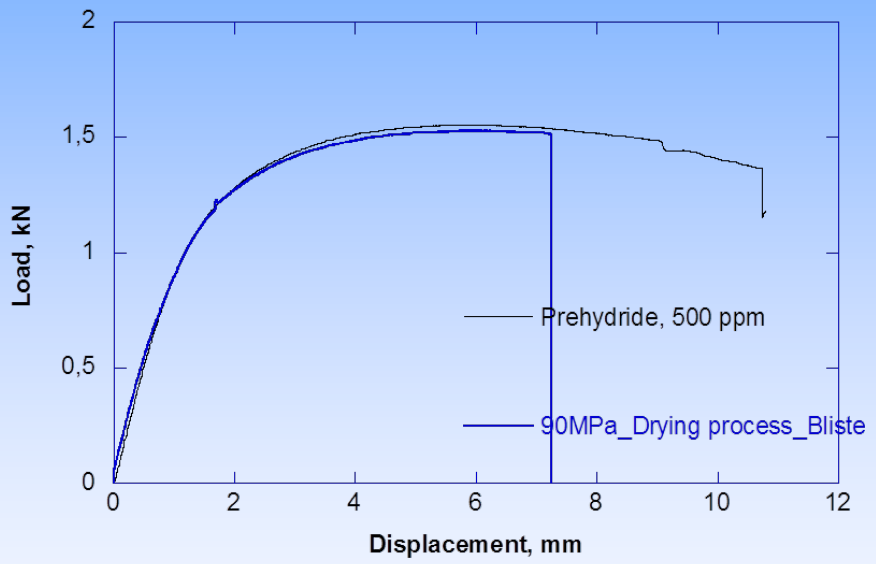
Secado: RCT 135ºC, $\sigma_{\theta,max} = 110\ MPa$, blister a las 12



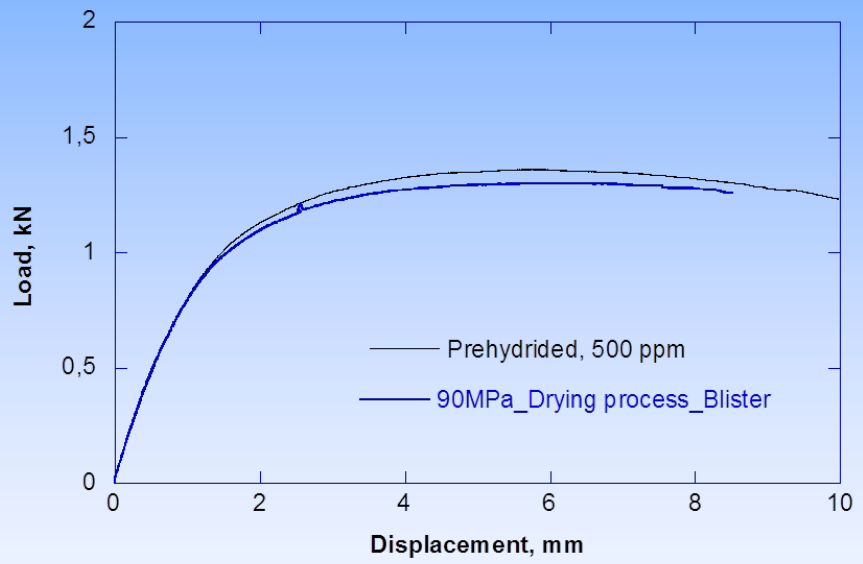
RESULTADOS

Secado: 3PB blisters tipo 2, $\sigma_{\theta,max} = 90\ MPa$

20 °C

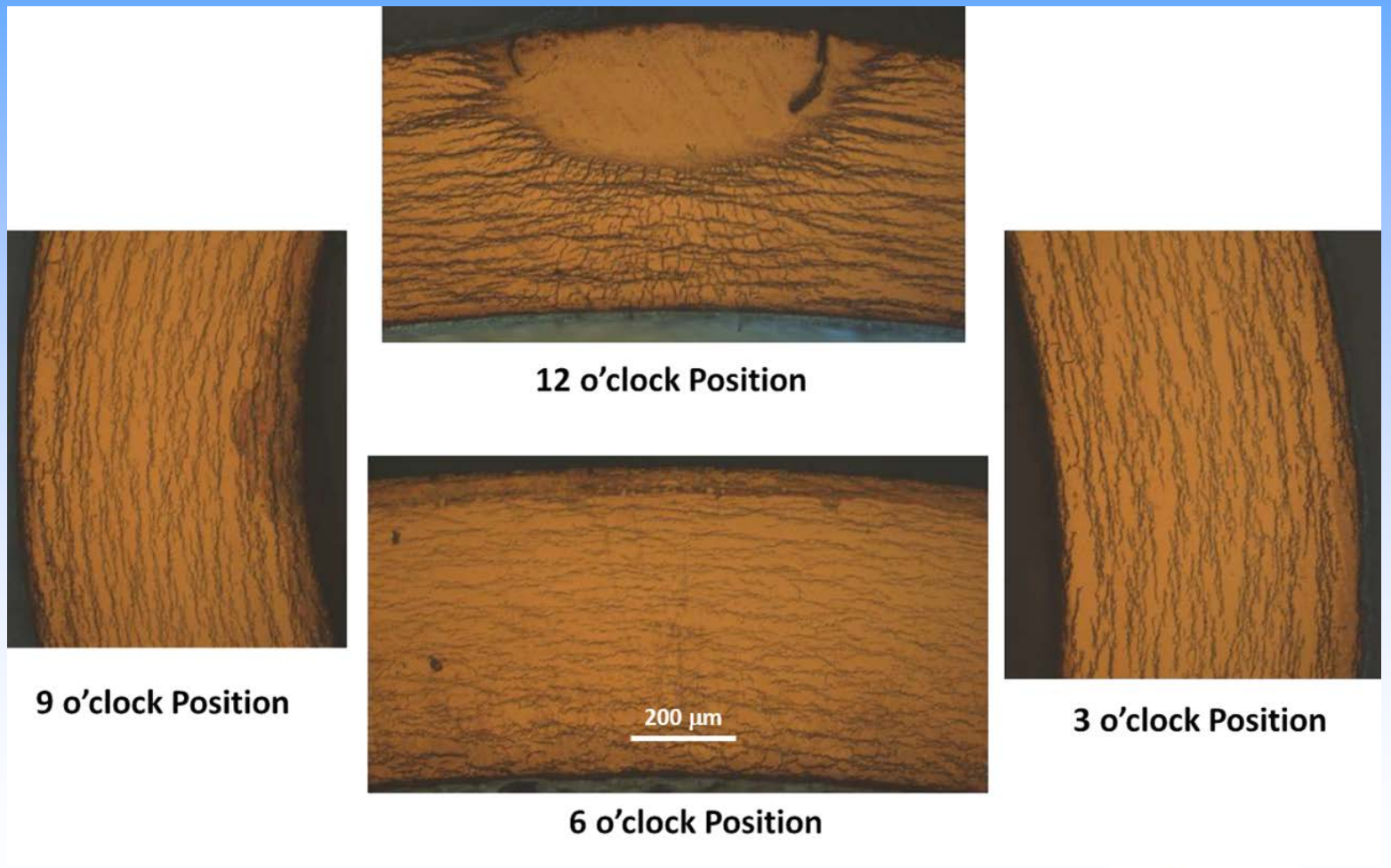


135 °C



RESULTADOS

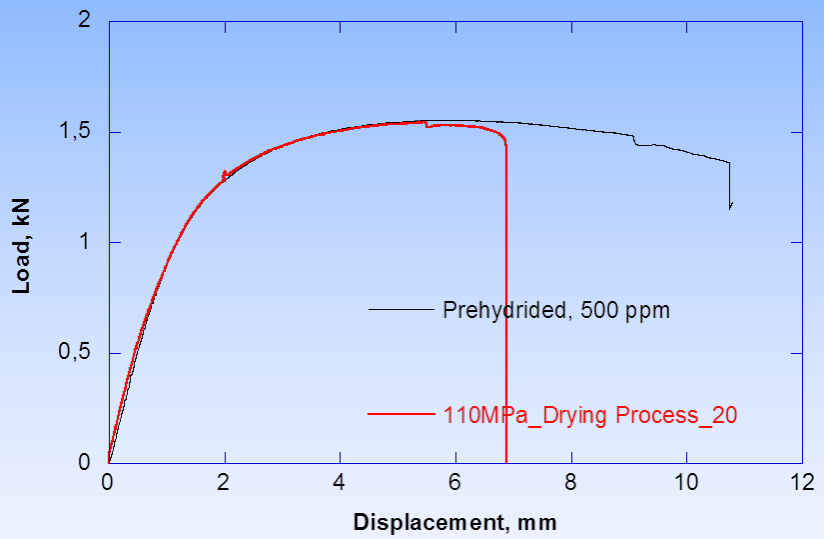
Secado: 3PB 135ºC, blisters tipo 2, $\sigma_{\theta,max} = 90\ MPa$



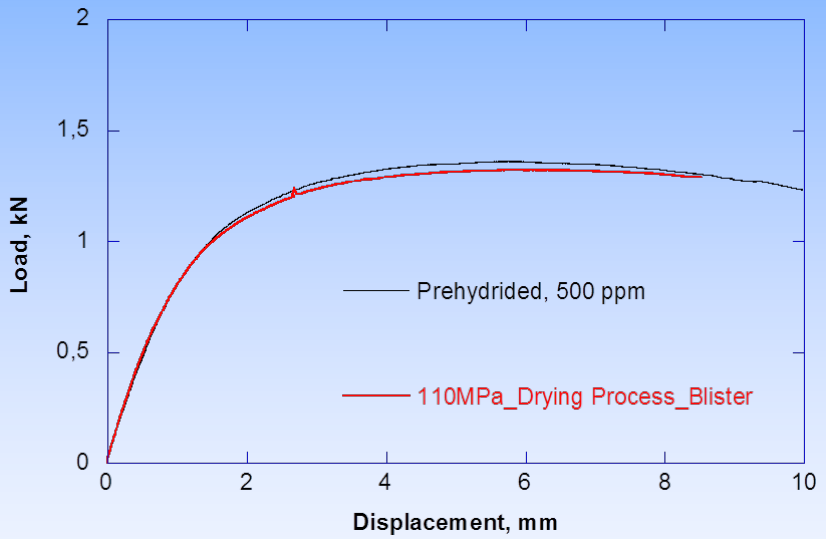
RESULTADOS

Secado: 3PB blisters tipo 2, $\sigma_{\theta,max} = 110\ MPa$

20 °C

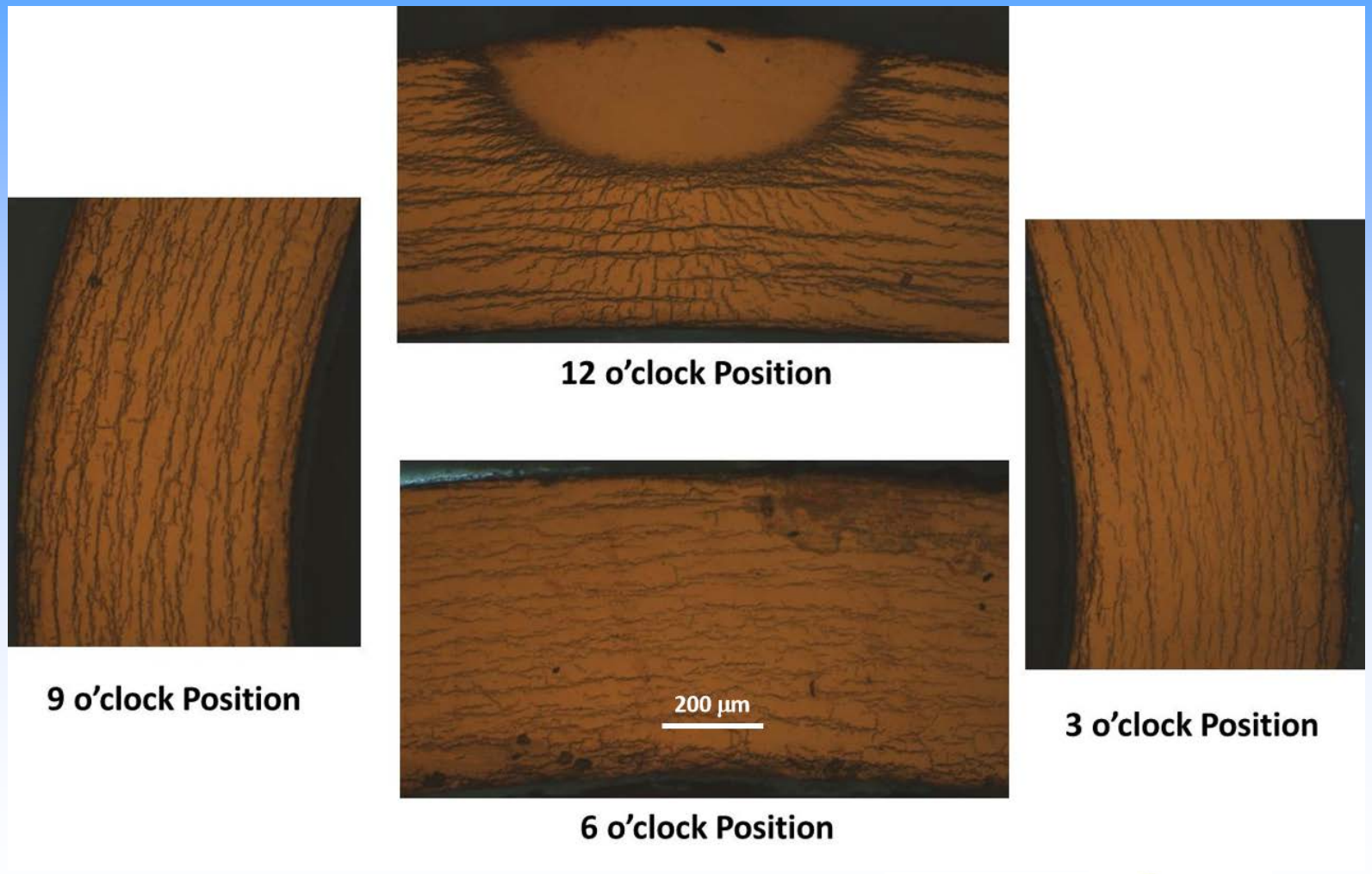


135 °C



RESULTADOS

Secado: 3PB 135ºC, blisters tipo 2, $\sigma_{\theta,max} = 110\ MPa$

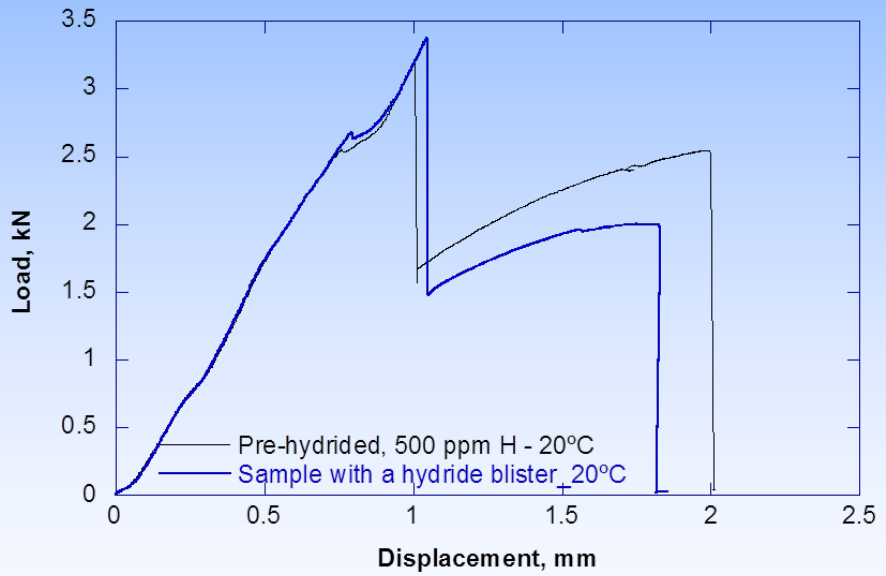


RESULTADOS

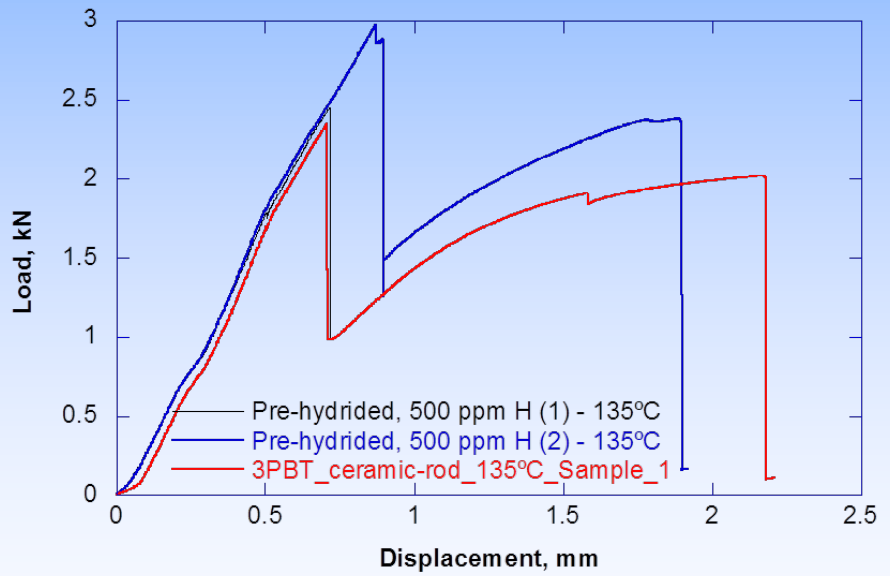
Vaina con blister + barra cerámica: 3PB

Barra zirconia: ZrO_2 (Φ8,30mm, 100mm, E=185 Gpa). UO_2 (E=198 GPa)

20 °C



135 °C



RESULTADOS

Vaina con blister + barra cerámica: 3PB

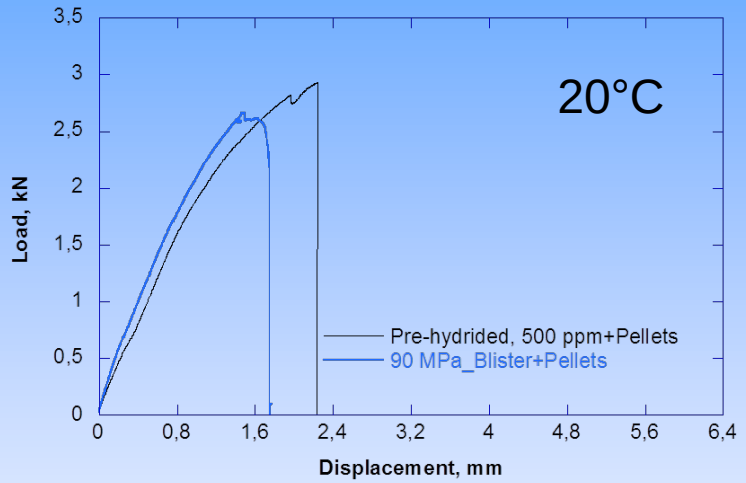
Muestra prehidrurada (500 ppm H) a 135ºC, después de primera descarga. No hay grieta pasante en vaina (gas a presión).

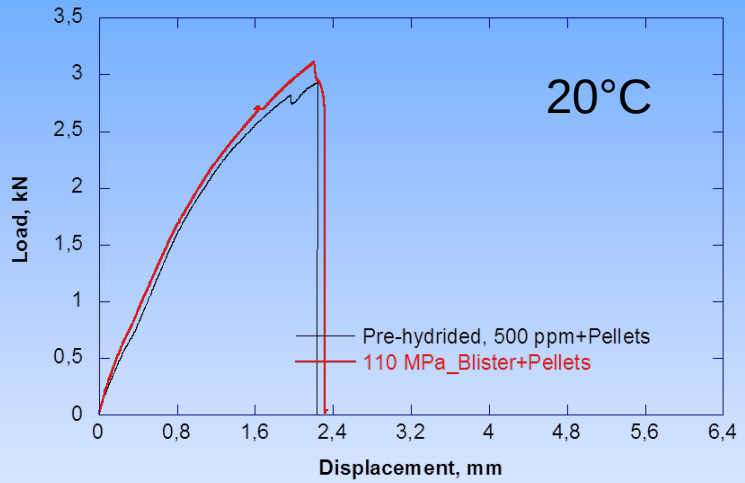
Muestra prehidrurada (500 ppm H) a 135ºC, después de segunda descarga (P≈0).

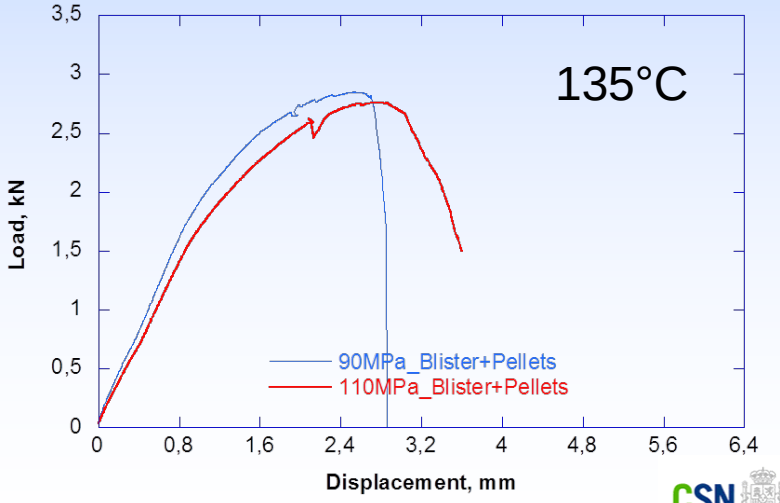
RESULTADOS

Vaina con blister + secado + pastilla simulada: 3PB

Pastillas zirconia: ZrO_2 (Φ8,30mm, 10 mm) + epoxy





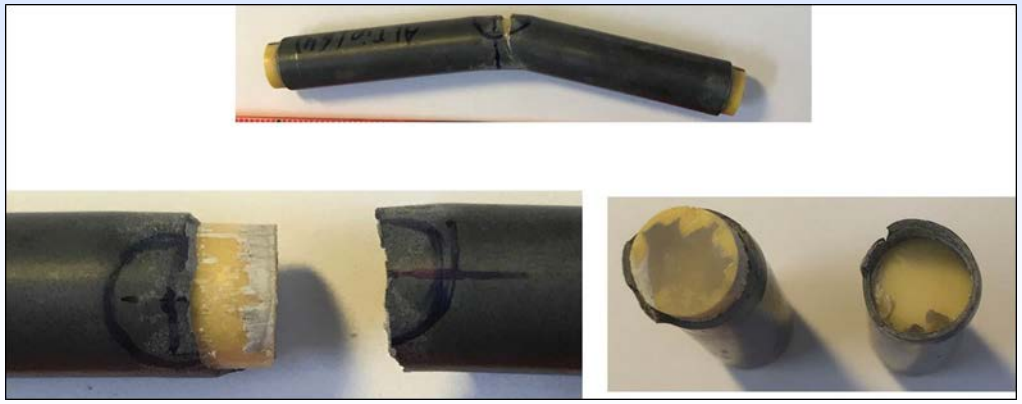


RESULTADOS

Vaina con blister + secado + pastilla simulada: 3PB

Pastillas zirconia: ZrO_2 (Φ8,30mm, 10 mm) + epoxy

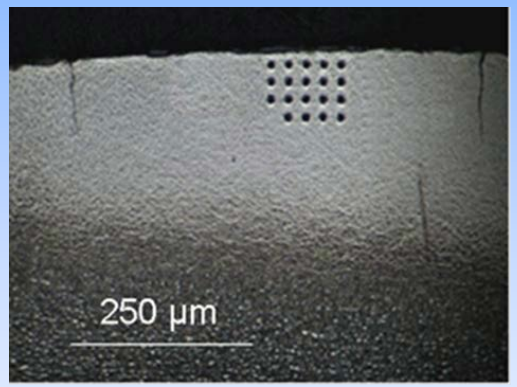
Aspecto rotura vainas con blister + secado (90 MPa) + pastilla simulada: 3PB, 135°C.



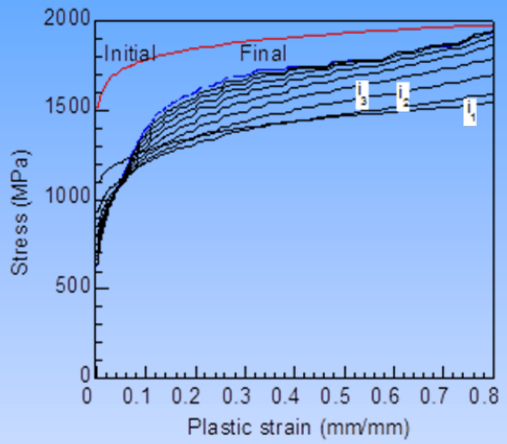
Aspecto rotura vainas con blister + secado (110 MPa) + pastilla simulada: 3PB, 135°C.

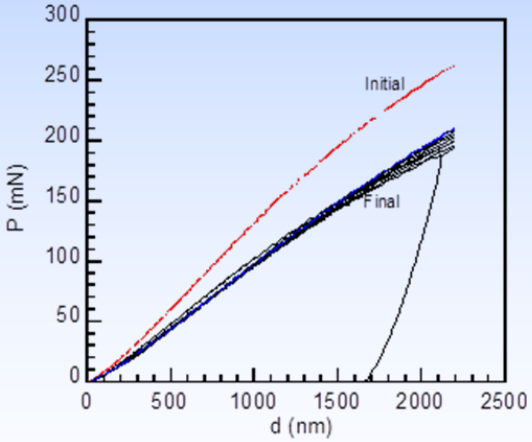
RESULTADOS

Nanoindentación

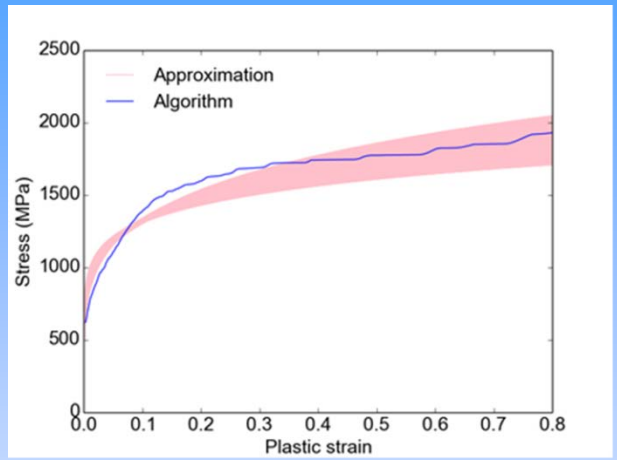


Matriz de indentaciones blister

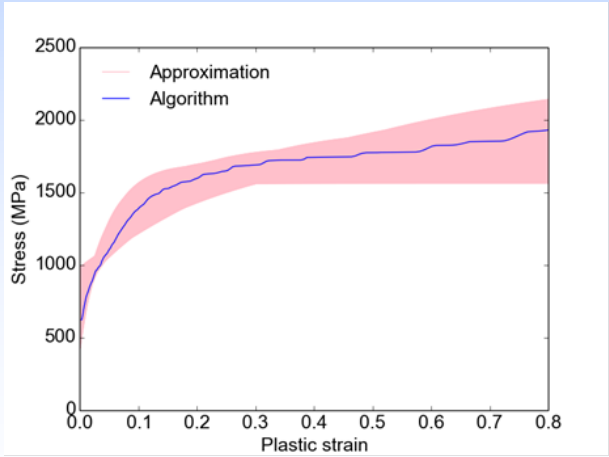




Algoritmo iterativo: σ-ε , P-d



Curvas óptimas σ-ε Hollomon



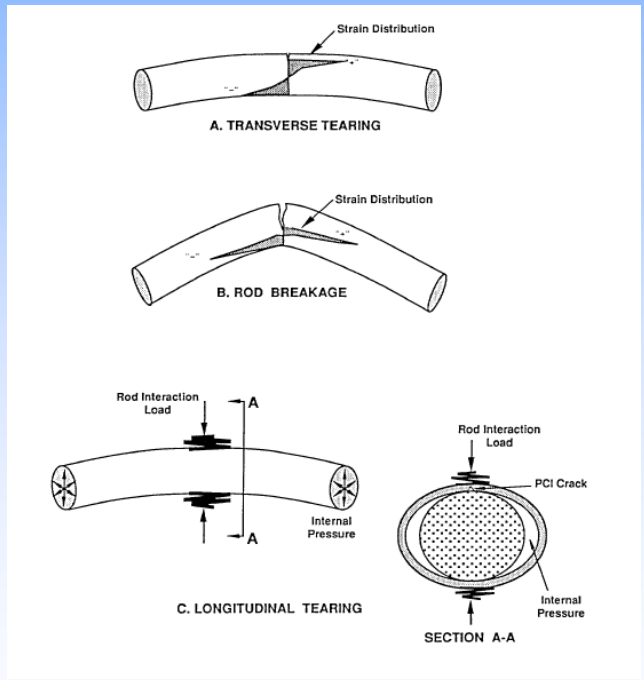
Curvas óptimas σ-ε Voce

CONCLUSIONES

- **Objetivos plenamente cubiertos, actividades adicionales no contempladas originalmente**
  - Secado 90 y 110 MPa
  - Muestras pre-hidruradas referencia (RCT, reventado, 3PB)
  - Ensayos RCT posiciones 12 y 3
- **Desarrollo de nuevas capacidades:**
  - Carga hidrógeno de muestras 100 mm de longitud
  - Producción de blisters de hidruros de dos tipologías (tipos 1 y 2)
  - Ensayos mecánicos reventado y flexión en tres puntos a distintas temperaturas
  - Simulación del secado: control independiente presión y temperatura
  - Obtención ecuación constitutiva (σ-ε) a partir de resultados ensayos nanoindentación
- **Publicaciones:** 4 artículos SCI, 4 congresos, 1 informe DOE, 1 PFG
- **Estancias:** M.A. Martín Rengel en ANL (primer semestre 2015)

CONCLUSIONES

- **Resultados: efecto blister en comportamiento mecánico vaina**
  - Reventado: reducción tensión anular de rotura respecto a muestras recepción, peor comportamiento blister tipo1 respecto a tipo2 a 135ºC
  - Compresión diametral (20 y 135ºC): blister a las 3, comportamiento dúctil ambos blisters, blister a las 12, comportamiento frágil tipo1 y dúctil tipo2
  - Flexión 3P: comportamiento dúctil 135ºC menor ductilidad a 20ºC ambos blisters
  - Secado simulado ($\sigma_{\theta,max}$ = 90 y 110 MPa):
    - Blister no altera la morfología de hidruros producida por secado.
    - Ensayos compresión diametral y flexión 3P: blister no afecta resultados para $\sigma_{\theta,max}$ = 90 MPa, pequeña caída carga para $\sigma_{\theta,max}$ = 110 Mpa y 20ºC
  - Pastilla simulada: aumenta carga máxima y reduce desplazamiento sistema vaina-pastilla (RCT y 3PB) por la mayor rigidez del sistema. Blister no afecta los resultados respecta a muestras prehidruradas

¡MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Y POR SU AYUDA EN ESTE PROYECTO!