

# INDECOVA

Influencia de los defectos en el comportamiento de vainas ATF de Zr-Nb con revestimiento metálico

***Miguel Cristóbal Beneyto, Daniel Pérez Gallego, Jesús Ruiz Hervías***

Centro de Investigación en Materiales Estructurales (CIME)  
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

# ÍNDICE

---

- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Plan Experimental**
- **Resultados**
- **Conclusiones**


# INTRODUCCIÓN

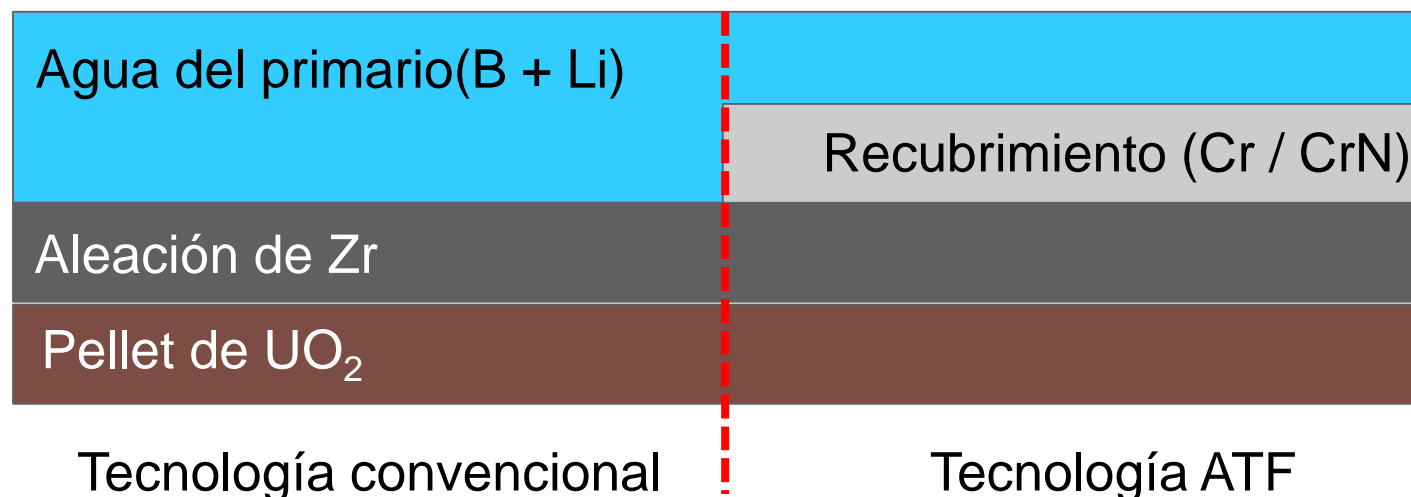
# INTRODUCCIÓN

- **Accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi (2011)**
  - Necesidad de mejorar la tolerancia del combustible nuclear a accidentes derivados de sucesos extremos
  - Reacción circonio con vapor de agua a muy alta temperatura ( $1200^{\circ}\text{C}$ ) genera calor e hidrógeno: daño irreversible del combustible y peligro de explosión
  - Desarrollo de combustibles que resistan la oxidación en presencia de vapor de agua a alta temperatura



# Introducción

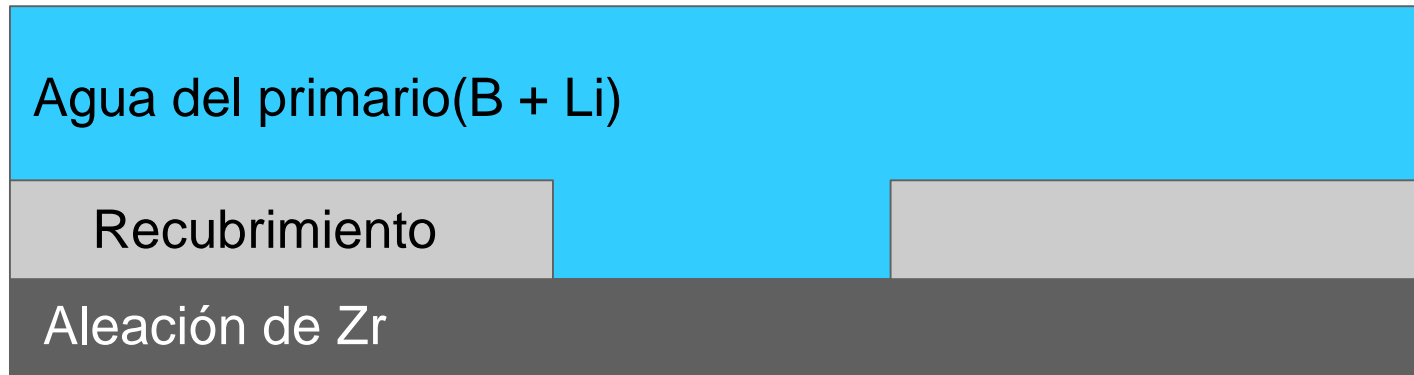
- **Combustible Tolerante a Accidentes (ATF): óxidos Cr, Al, Si**
  - Vainas de circonio con recubrimiento metálico (Cr, CrN) 
  - Vainas de aleaciones Fe-Cr-Al
  - Vainas de material compuesto SiC/SiC



# OBJETIVOS

# OBJETIVOS

- Estudiar el comportamiento mecánico de las vainas de combustible ATF con recubrimiento metálico en condiciones de operación, transporte y almacenamiento, incluyendo la influencia de posibles defectos en el recubrimiento.



# PLAN EXPERIMENTAL



# PLAN EXPERIMENTAL

- Generación de defectos
  - Eliminación del recubrimiento de forma localizada.
- Ensayos de corrosión en autoclave
  - Condiciones similares al circuito primario.
- Ensayos mecánicos
  - Muestras oxidadas con y sin defectos
- Carga de hidrógeno
  - Carga catódica en muestras con y sin defectos
  - Medidas de contenido de hidrógeno

# MATERIALES

Suministrados dentro del CRP "Testing and Simulation for Advanced Technology and Accident Tolerant Fuels (ATF-TS)" de la IAEA

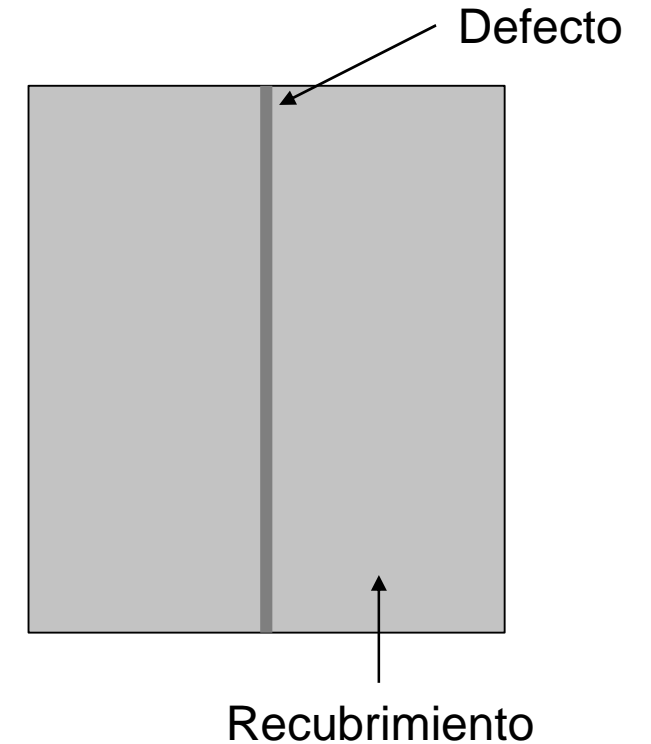
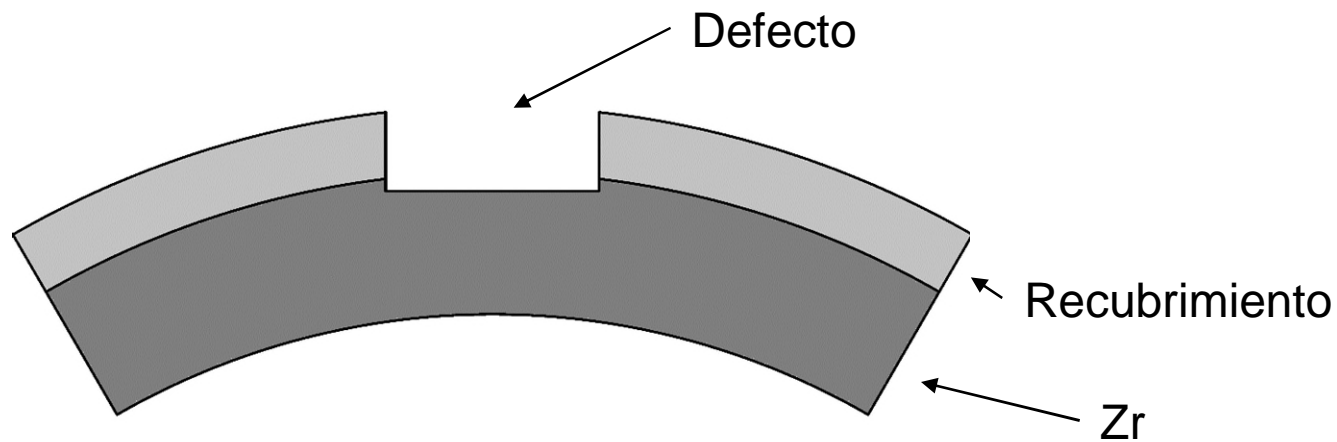
Fabricante	Material	Revestimiento	Tecnología
CTU	Opt. ZIRLO	Cr (thin)	PVD UMS
		Cr (thick)	PVD UMS
		CrN	PVD UMS
		Uncoated	-
AEOI	Zr1Nb	Cr	Arc Ion Plating
		CrN	Arc Ion Plating
		Cr/CrN (multi)	Arc Ion Plating
		Uncoated	-



# EXPERIMENTAL

- **Generación de defectos**

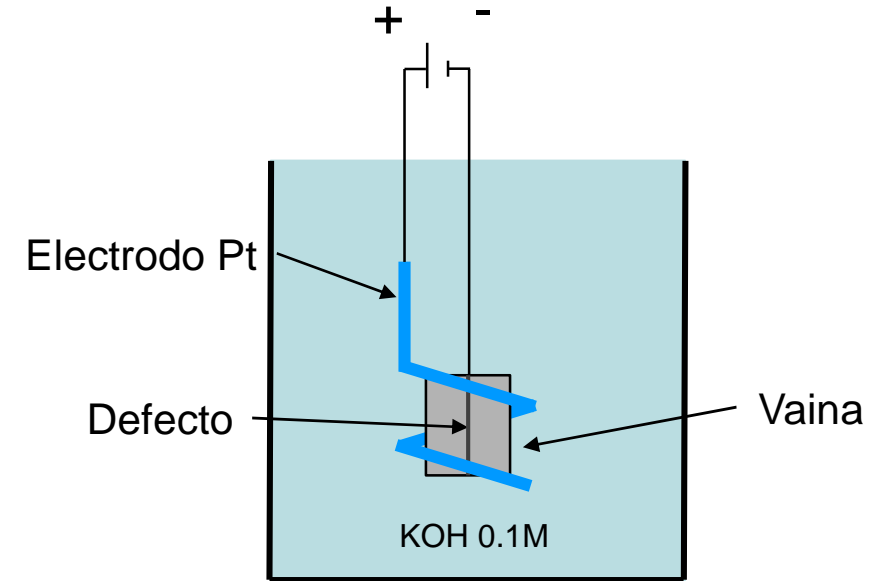
- Eliminar el recubrimiento
- De forma controlada
- Mecanizado
- Dirección axial



# EXPERIMENTAL

## Carga de Hidrógeno

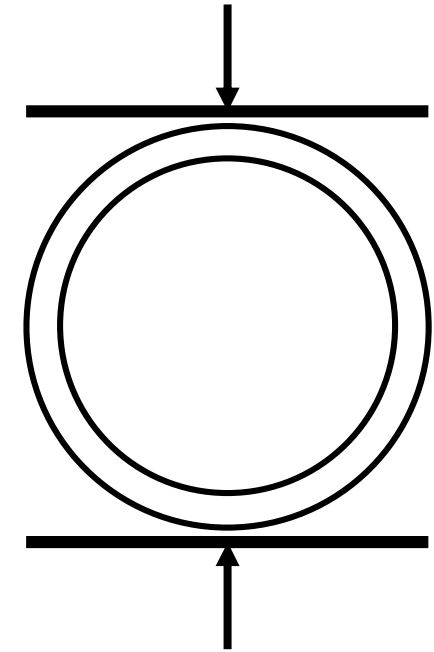
- Anillos de 10 mm de altura
  - Distintos materiales
  - Con y sin defecto
- Carga a través de la superficie exterior
- Condiciones: 6/8h, 0.1 M KOH, 0.25 A/cm<sup>2</sup>
- Precipitación: 7h at 450 °C + enfriamiento a 1 °C/ min



# EXPERIMENTAL

## Ensayos de compresión diametral (RCT)

- La muestra se comprime entre dos platos paralelos
- Se registra la carga y el desplazamiento



Esquema RCT

# EXPERIMENTAL

- **Ensayos de corrosión**
  - Química del primario de PWR
    - B 800 ppm
    - Li 3.8 ppm
  - Muestras con y sin defectos
    - Ganancia en masa
    - Metalografía y análisis de hidrogeno
    - Ensayos mecánicos



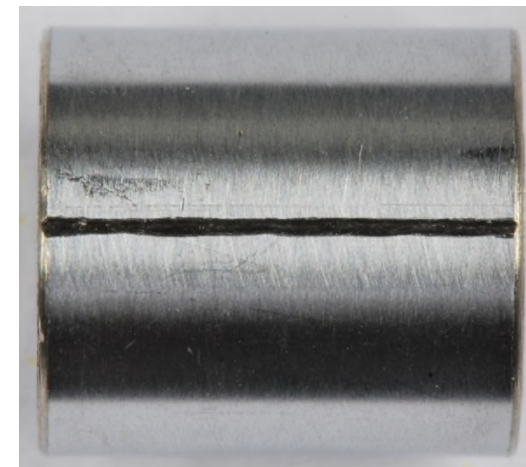
# RESULTADOS

# RESULTADOS

## Generación de defectos

Muestras	Profundidad ( $\mu\text{m}$ )
CTU Uncoated	$29 \pm 10$
CTU Cr Thick	$41 \pm 9$
CTU Cr Thin	$100 \pm 3$
CTU CrN	$17 \pm 2$

Muestras	Profundidad ( $\mu\text{m}$ )
AEOI Uncoated	$40 \pm 11$
AEOI Cr coated	$53 \pm 13$
AEOI CrN	$43 \pm 12$
AEOI Multilayer	$54 \pm 21$





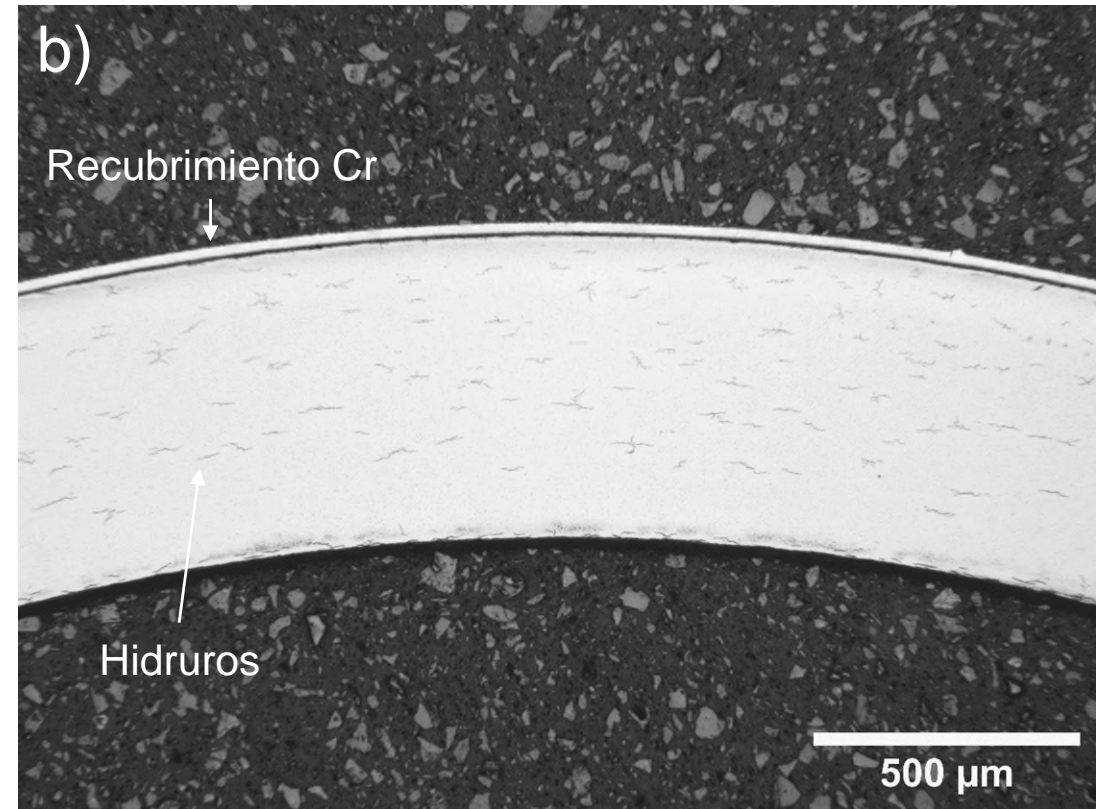
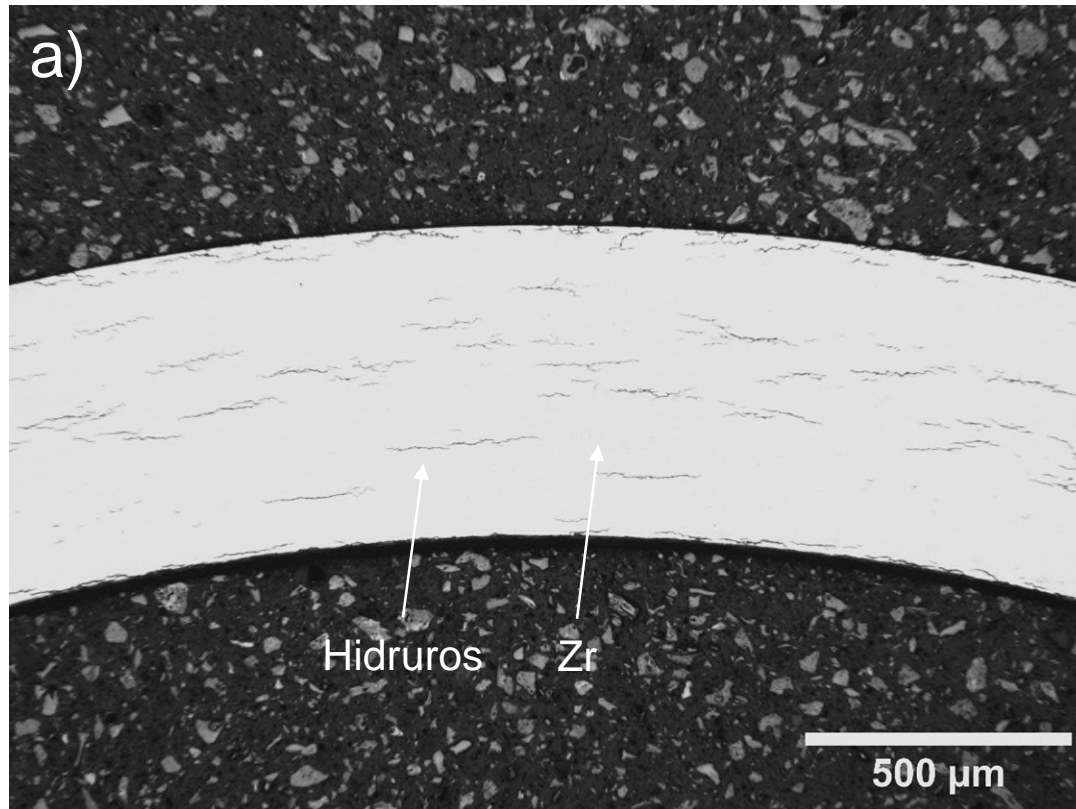
# RESULTADOS

## Carga de hidrógeno

Fabricante	Material	Revestimiento	Hidrogeno (wppm)
CTU	Opt. ZIRLO	Cr (thick)	30 ± 2
		Uncoated	78 ± 7
AEOI	Zr1Nb	Cr	25 ± 1
		CrN	40 ± 2
		Cr/CrN (multi)	22 ± 2
		Uncoated	80 ± 3

# RESULTADOS

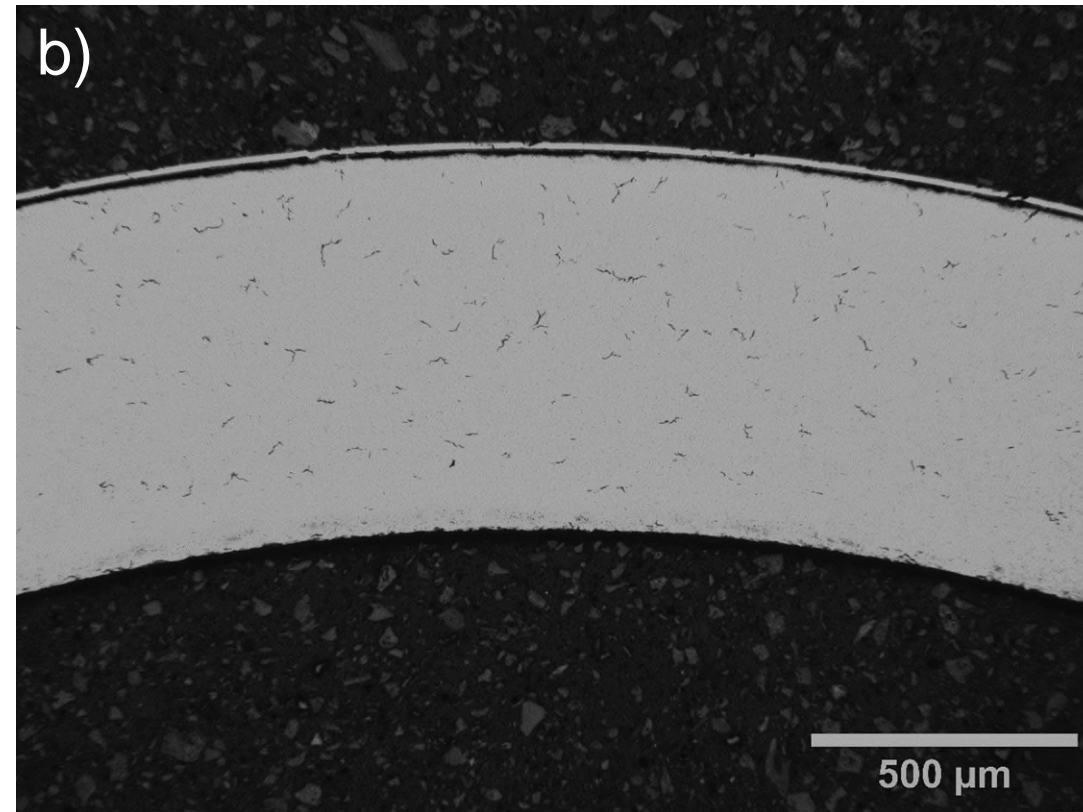
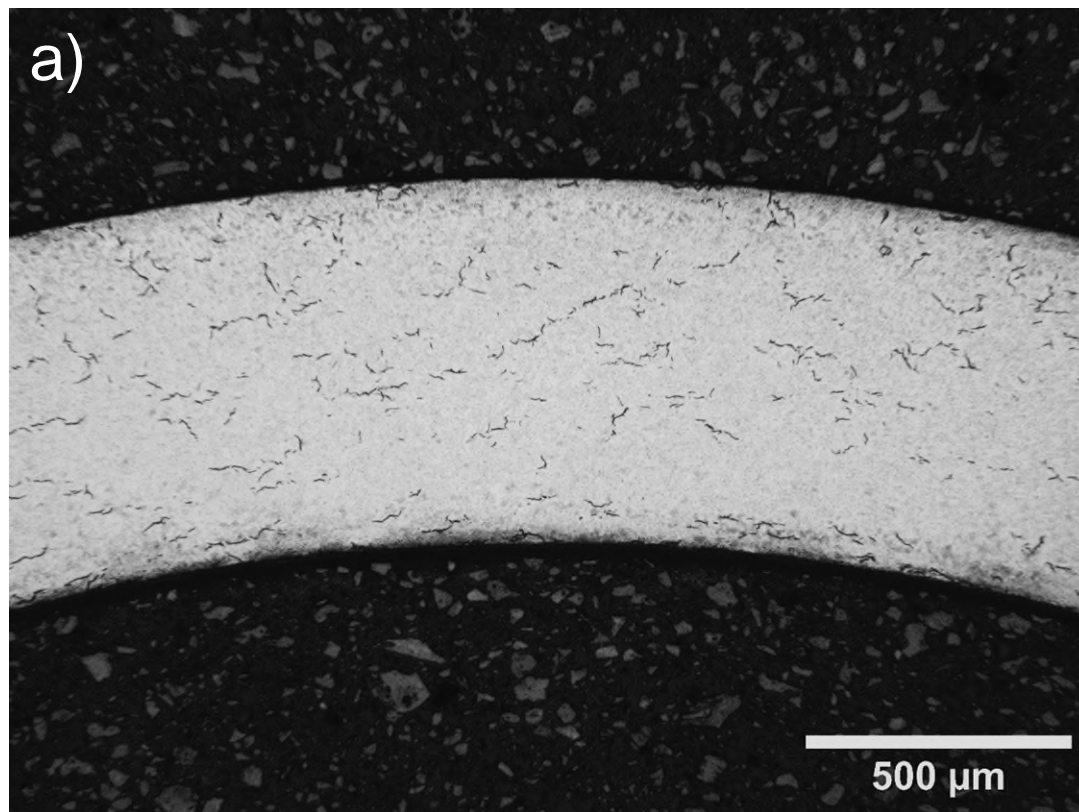
## Carga de hidrógeno



Morfología de los hidruros : a) CTU Uncoated y b) CTU - Cr (thick)

# RESULTADOS

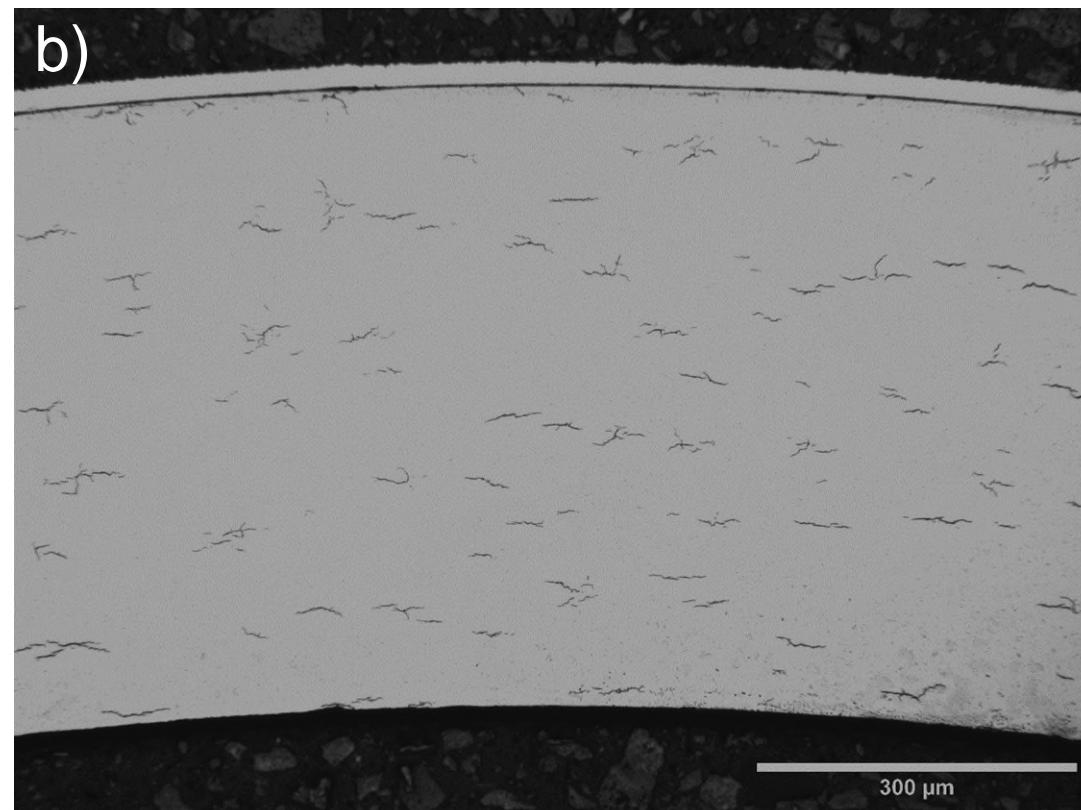
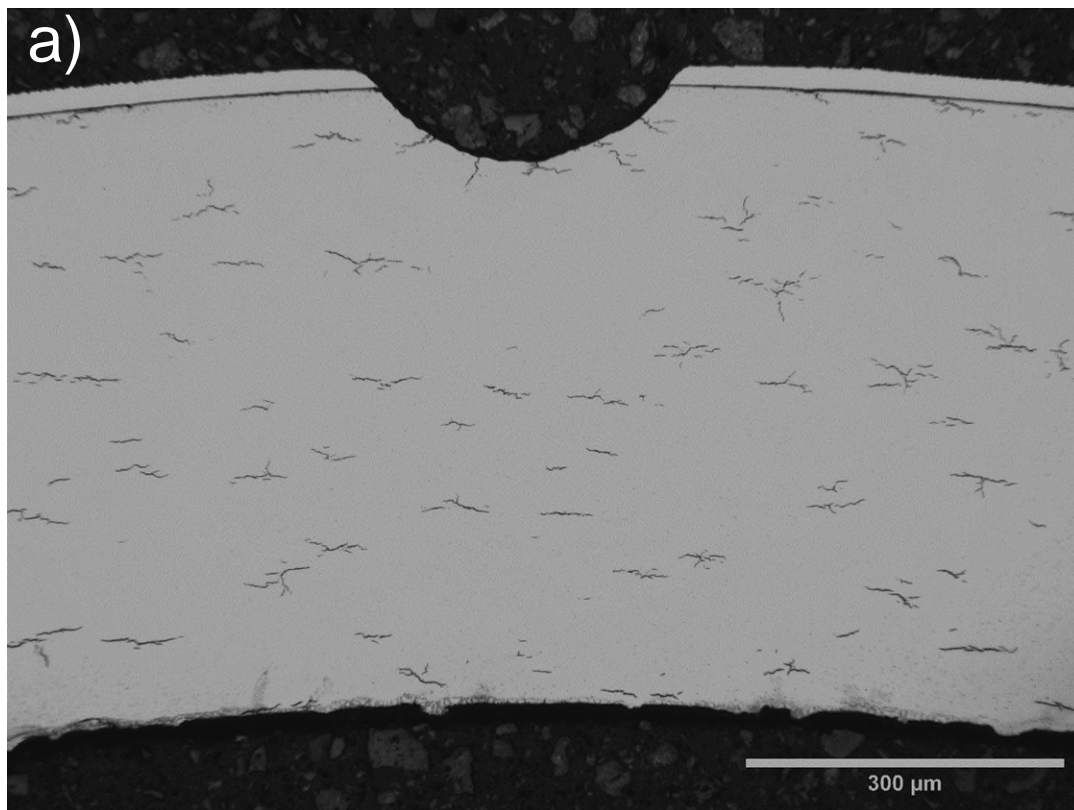
## Carga de hidrógeno



Morfología de los hidruros : a) AEOL Uncoated y b) AEOL - Multilayer

# RESULTADOS

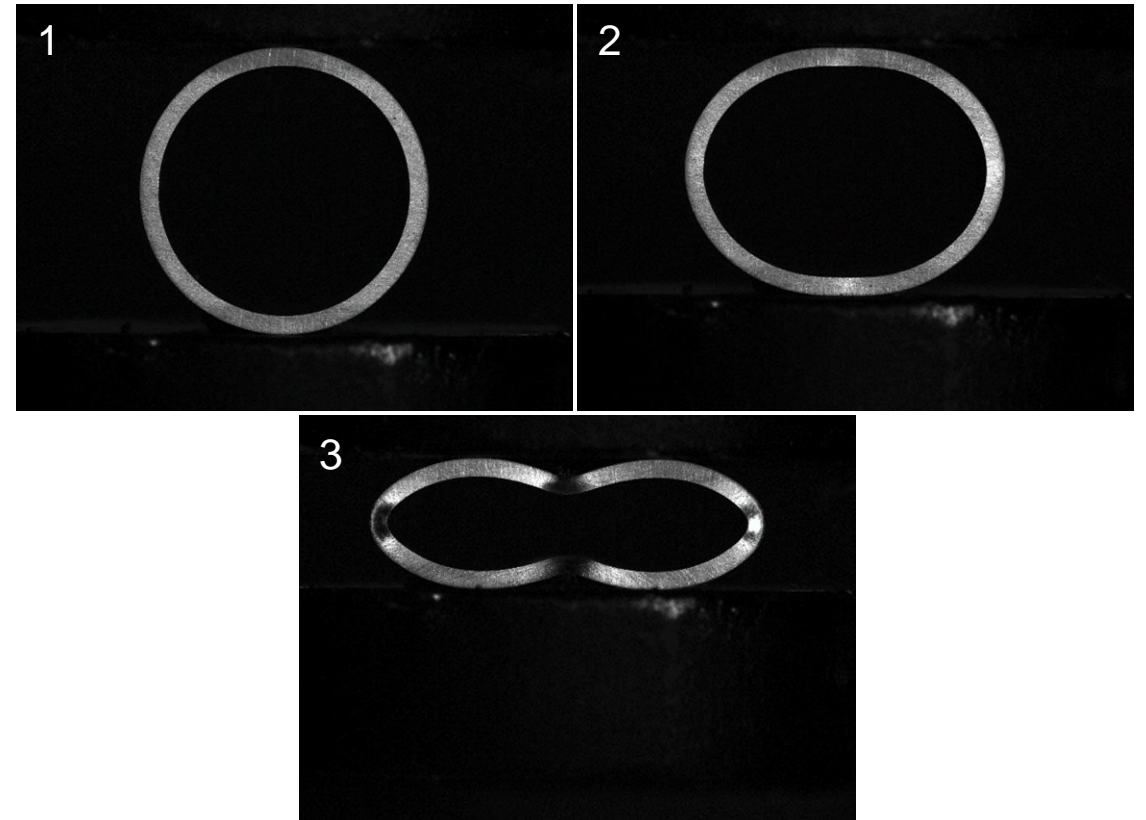
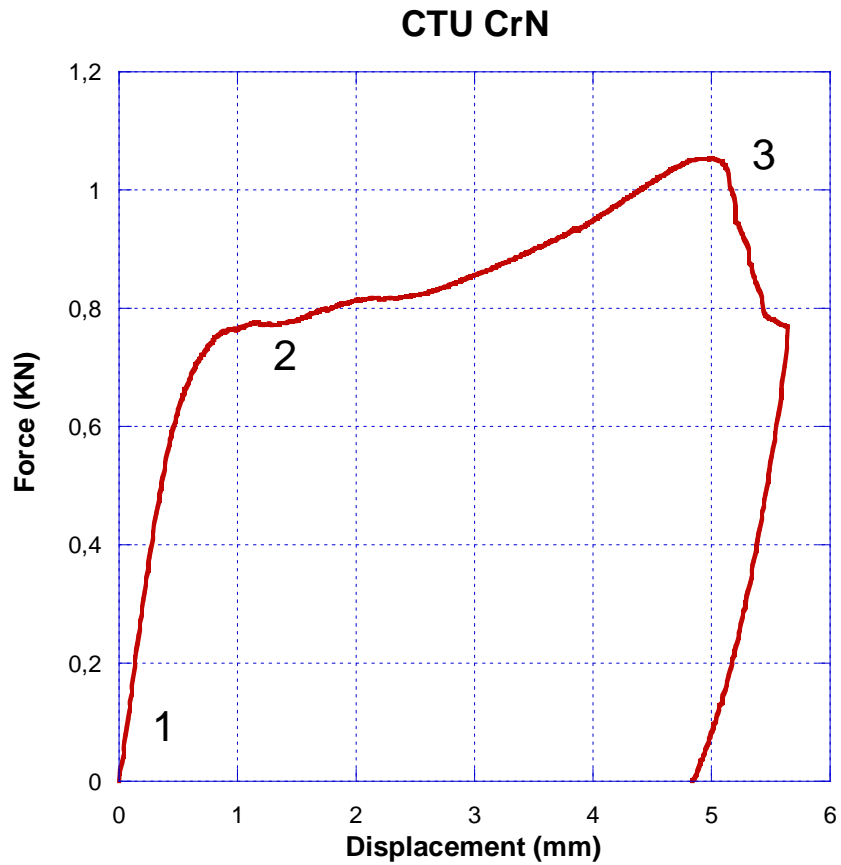
## Carga de hidrógeno: influencia del defecto



Morfología de Hidruros en la muestra CTU – Cr (thick) : (a) zona del defecto, (b) generatriz opuesta

# RESULTADOS

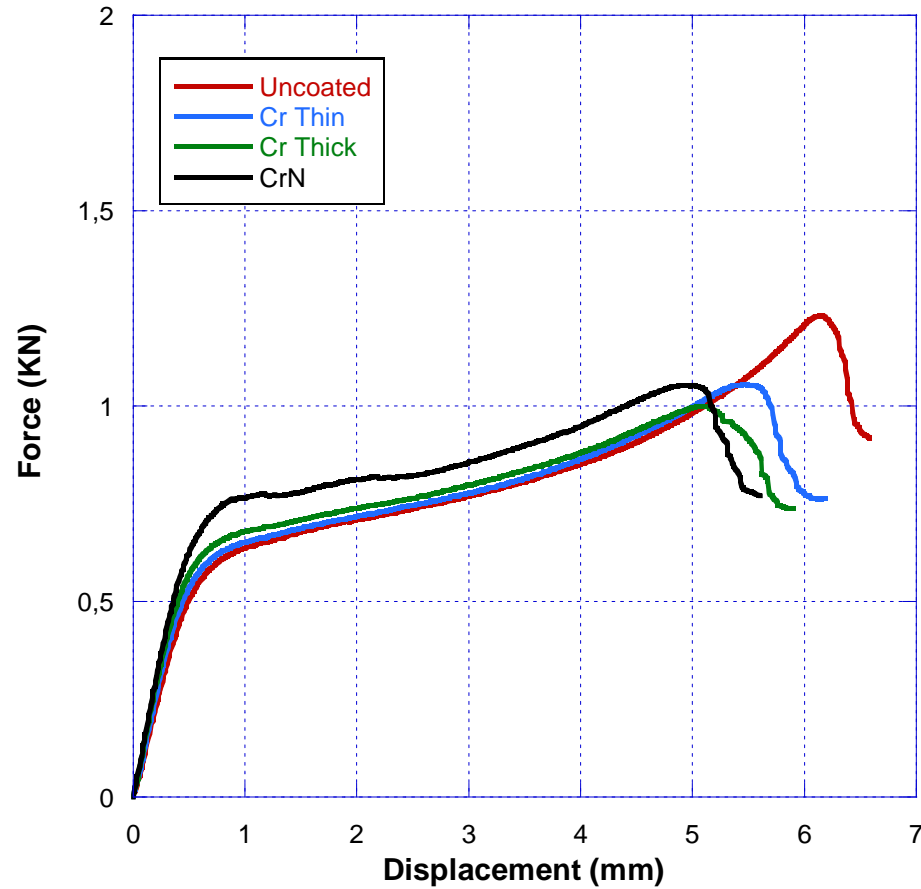
## Ensayos de compresión diametral



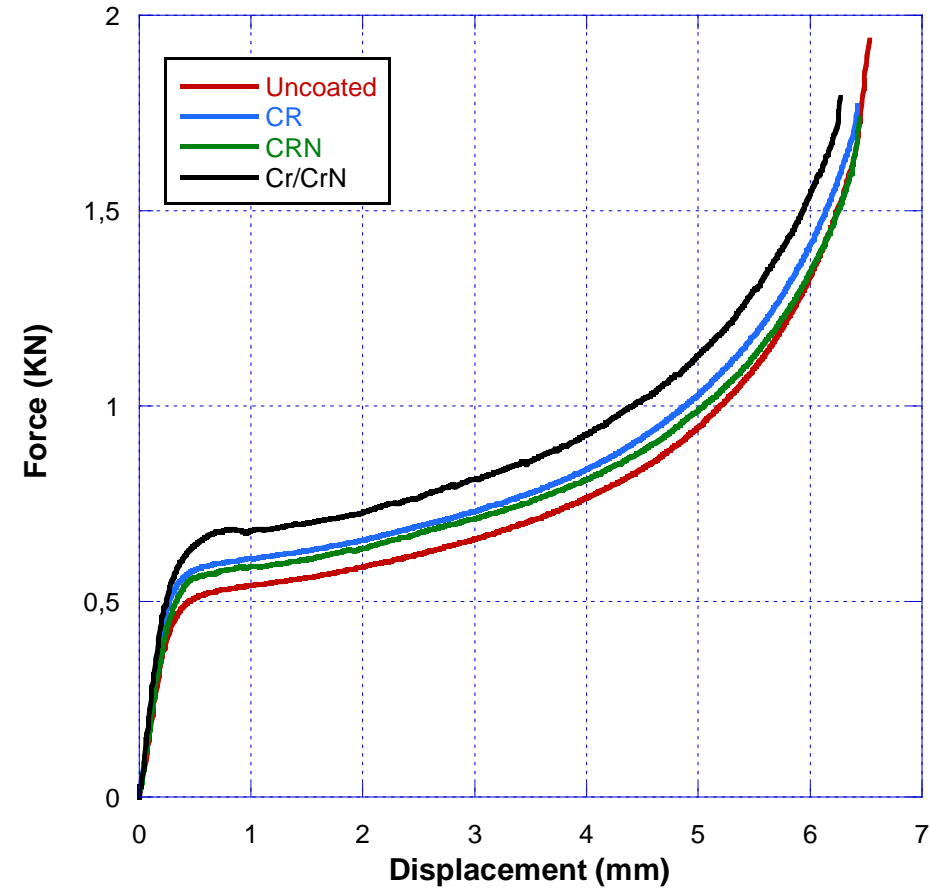
# RESULTADOS

## Ensayos de compresión diametral

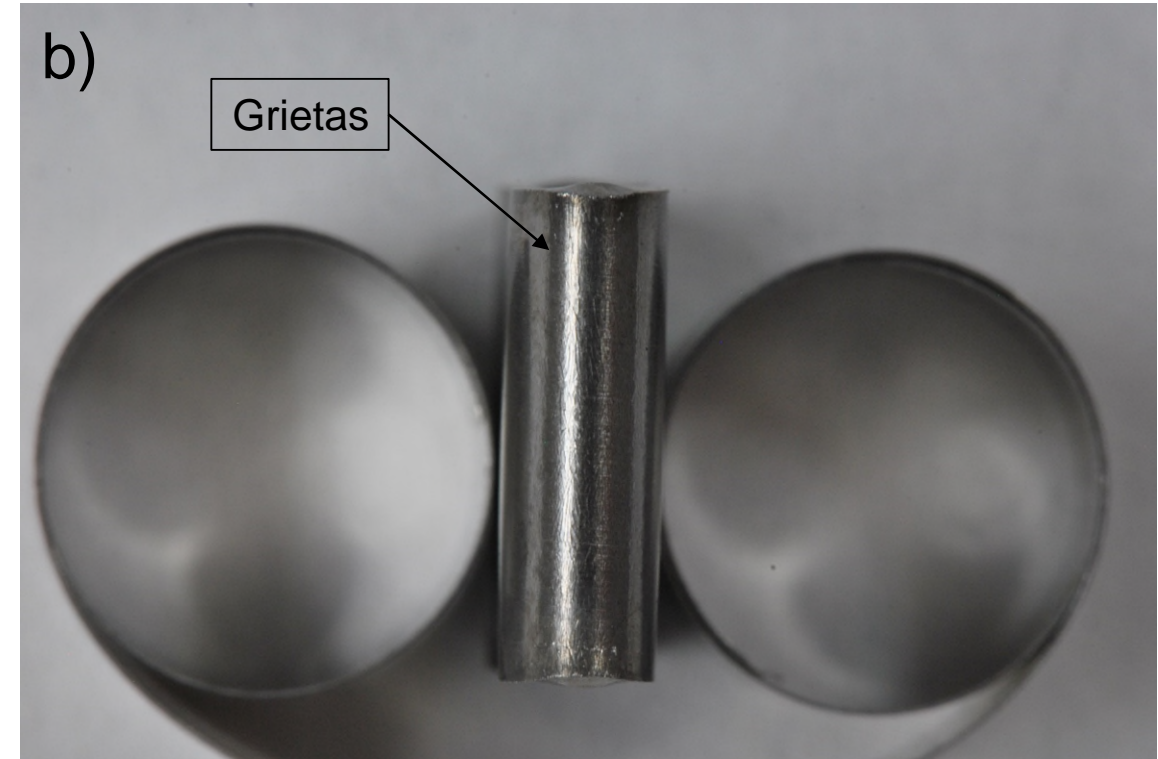
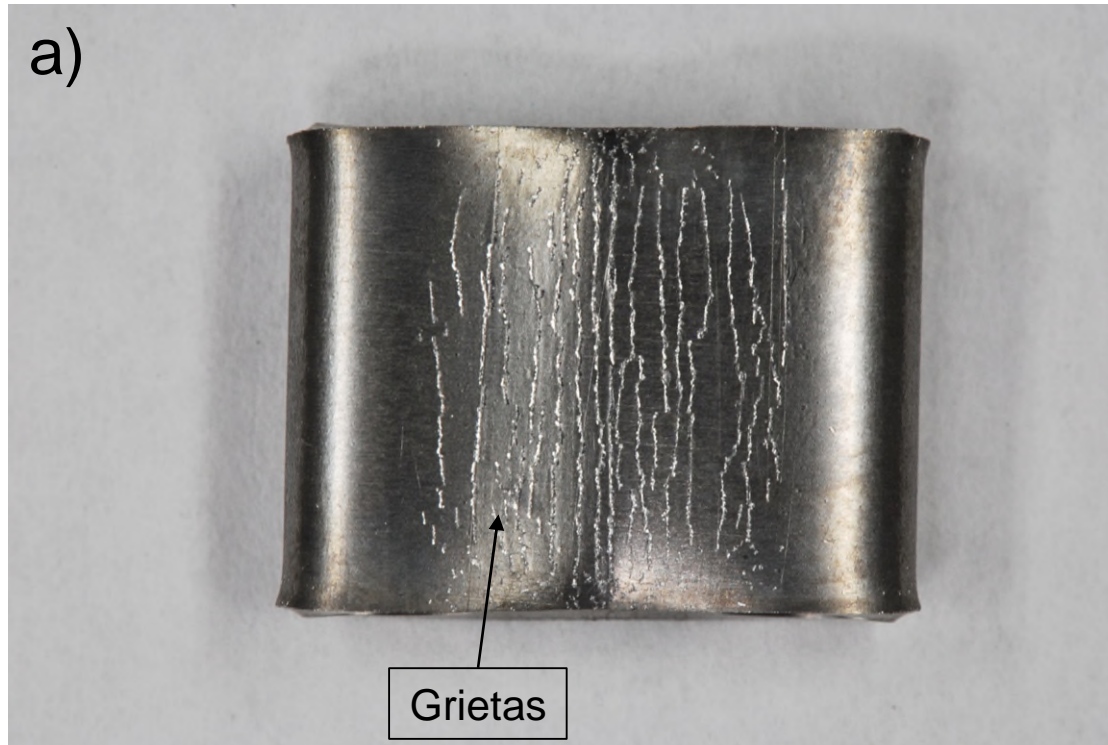
RCT  
CTU Samples



RCT  
AEOI Samples



# RESULTADOS



Imágenes de la muestra AEOI/CrN sometida a RCT: (a) Vista superior y (b) vista lateral

# CONCLUSIONES



# CONCLUSIONES

---

- **Carga de Hidrógeno**
  - El recubrimiento de Cr disminuye la entrada de hidrógeno
  - No se aprecia una clara influencia de los defectos en la morfología y distribución de los hidruros
- **Ensayos de compresión diametral**
  - El recubrimiento de Cr aumenta la rigidez inicial de las muestras
  - Comportamiento dúctil: grietas y delaminaciones a deformaciones muy grandes
- **Generación de defectos**
  - Profundidad media 45  $\mu\text{m}$ : difícil de controlar con precisión

# CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES ESTRUCTURALES (CIME)

- Misión: contribuir al desarrollo de estructuras y materiales estructurales más eficientes, seguros y sostenibles mediante la generación de conocimiento científico y la transferencia de tecnología a la industria.
- 67 investigadores
- ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Navales y ETSIDI ([cime.upm.es](http://cime.upm.es))
- Director: Jesús Ruiz Hervías

