



Ensayos mecánicos para la determinación de las propiedades de tracción, tenacidad a la fractura y velocidad de crecimiento de grieta por fatiga en aceros en contacto con hidrógeno

Guillermo Álvarez Díaz

alvarezdguillermo@uniovi.es



Comportamiento en servicio de componentes de acero en contacto con hidrógeno a presión

(PID2021-124768OB-C22)

Parque Tecnológico de Gijón
23 de Mayo del 2024



SimuMecaMat

Simulación Numérica, Modelización, Caracterización Mecánica y Optimización Microestructural de Componentes Industriales

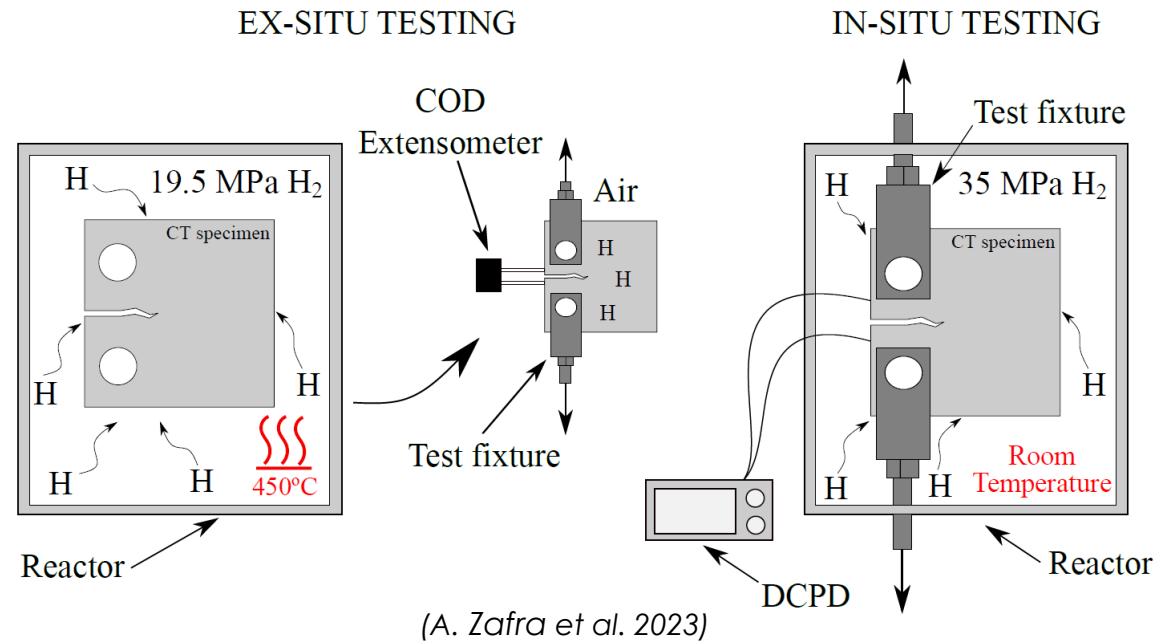
Generación ambiente de hidrógeno

- Gas a presión
 - El ambiente es directamente hidrógeno gas a una presión determinada.
- Electroquímicamente
 - Mediante una reacción electroquímica se consigue generar hidrógeno en la superficie de la muestra e introducirlo en la misma.



In-situ y ex-situ

- Ex-situ
 - El hidrógeno se introduce en la muestra y esta es ensayada en condiciones de laboratorio.
- In-situ
 - El ensayo se realiza en un ambiente de hidrógeno.



Ensayos en laboratorio

1. Los ensayos se realizan en condiciones de laboratorio:

- Tracción \longrightarrow No hay concentrador de tensiones
 - Tracción entallada \longrightarrow Entalla
 - Tenacidad a la fractura
 - Crecimiento de grieta por fatiga
- } \longrightarrow Grieta

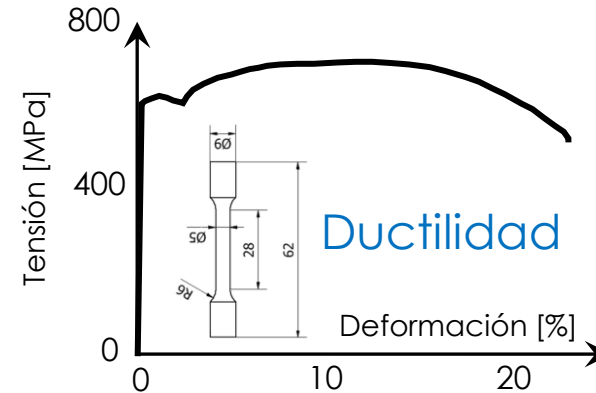
• INDICE DE FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO

$$HEI(\%) = \frac{X - X_H}{X} \cdot 100$$

- X : Propiedad del ensayo sin hidrógeno
- X_H : Propiedad del ensayo con hidrógeno

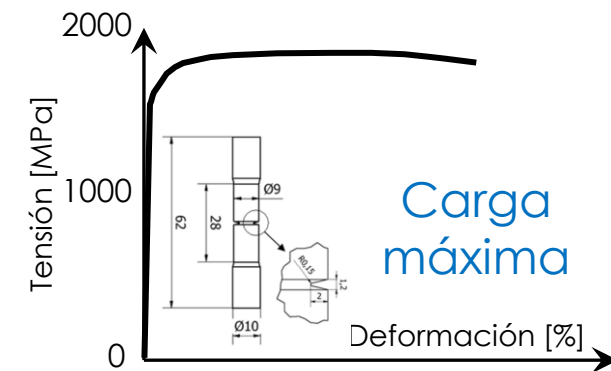
Ensayo de tracción

(A. Zafra et al. 2018)



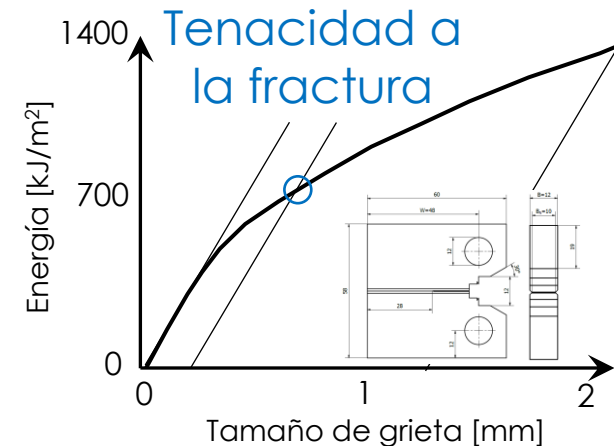
Ensayo de tracción entallada

(A. Zafra et al. 2018)



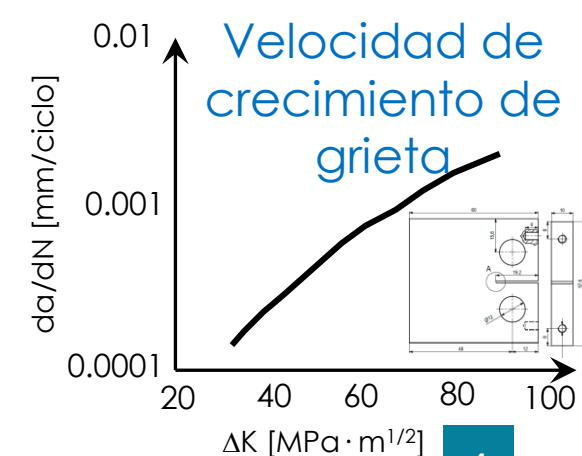
Ensayo de tenacidad a la fractura

(L.B. Peral et al. 2019)



Ensayo de crecimiento de grieta

(L.B. Peral et al. 2019)



Evolución de ensayos en hidrógeno



ENSAYOS EX-SITU
HIDRÓGENO GAS A PRESIÓN

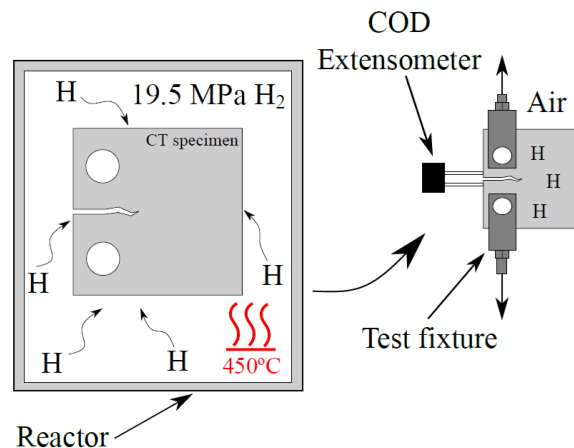
- **Ensayo ex-situ:**

- Procedimiento de ensayo sencillo en comparación con el in-situ.
- Más barato, reproducible y seguro

2016

2025

EX-SITU TESTING

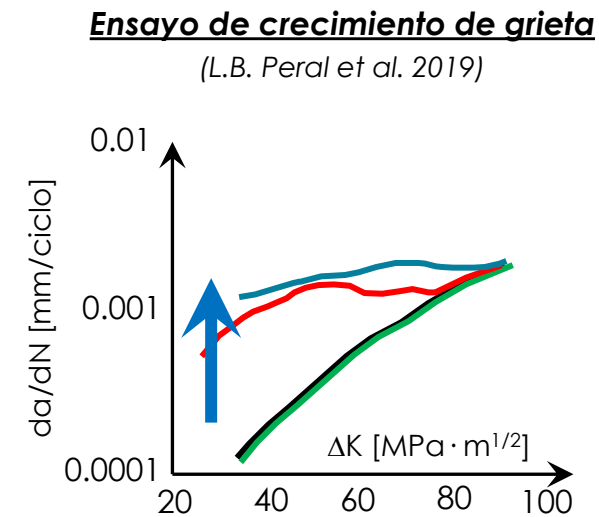
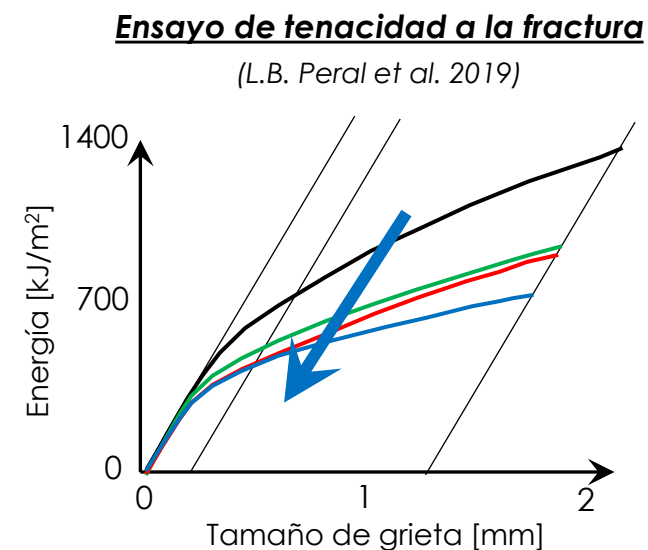
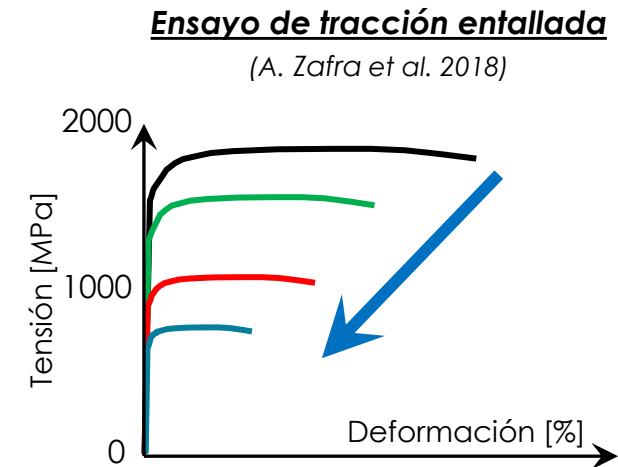
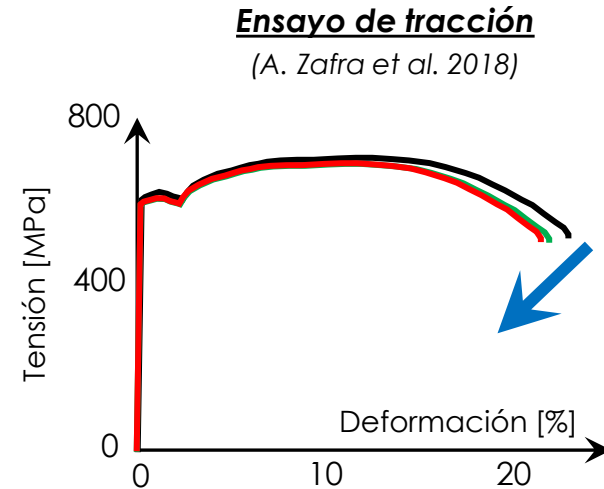
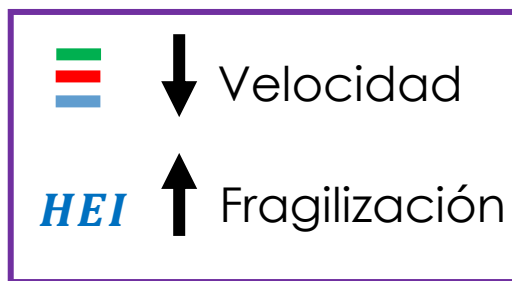


Ex-situ con hidrógeno gas a presión

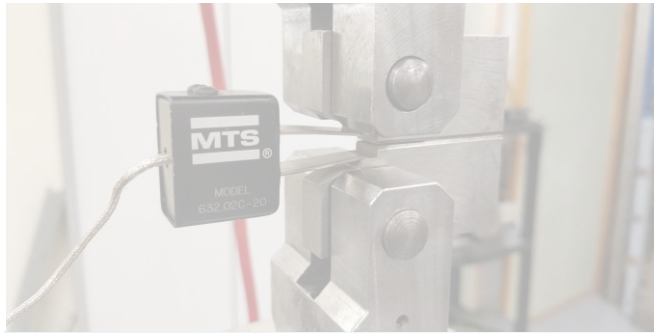
Ensayos con hidrógeno interno o “exsitu” – Hidrógeno gas a presión

- Ensayos mecánicos (ej. CrMo700)
- Determinación del contenido de hidrógeno
- Influencia de la velocidad de ensayo

Analizador de hidrógeno LECO DH603



Evolución de ensayos en hidrógeno



ENSAYOS EXSITU
HIDRÓGENO GAS A PRESIÓN

- **Ensayo ex-situ electroquímico:**

- Probetas de pequeño espesor.
- Desarrollo del procedimiento de carga electroquímica y ensayo.

2016

2025

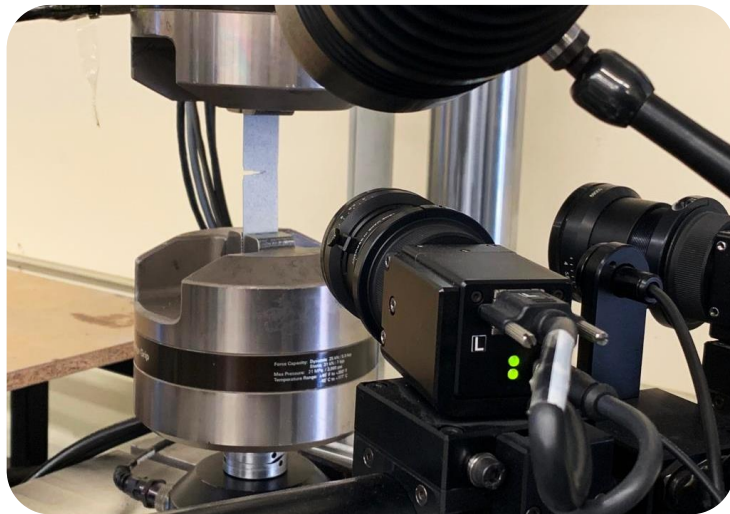
ENSAYOS EXSITU
HIDRÓGENO ELECTROQUÍMICO



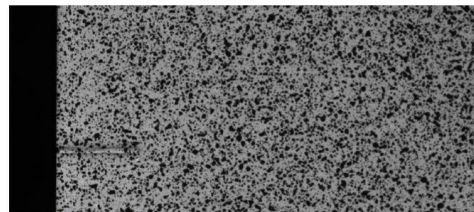
Electroquímico vs a presión (ex-situ)

Ensayo en probeta tipo SENT

- El método electroquímico se probó en probetas de bajo espesor debido al tiempo necesario para conseguir un perfil de concentración homogéneo en su interior.

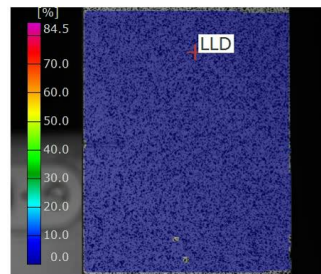


Crecimiento de grieta

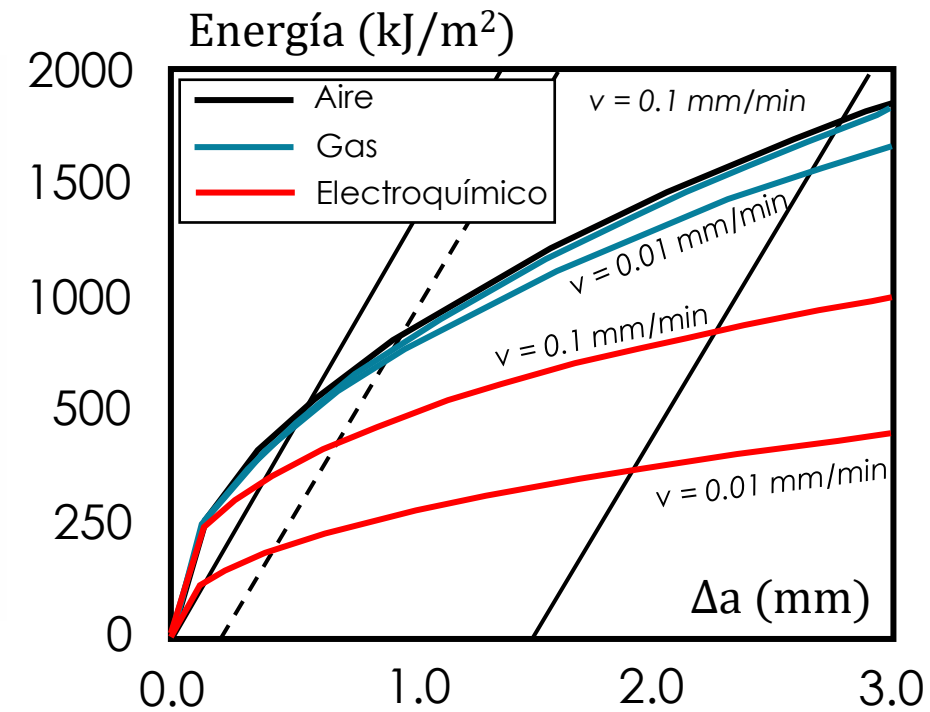
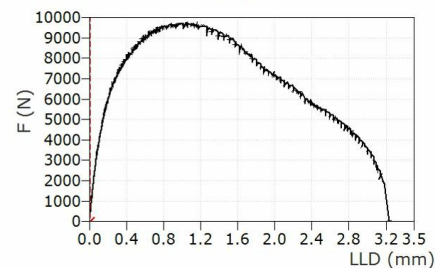


Stage 0
Time 0.00 s
CARGA = -28.839 N
LLD = 0.000 mm

Campo de deformaciones



F-LLD

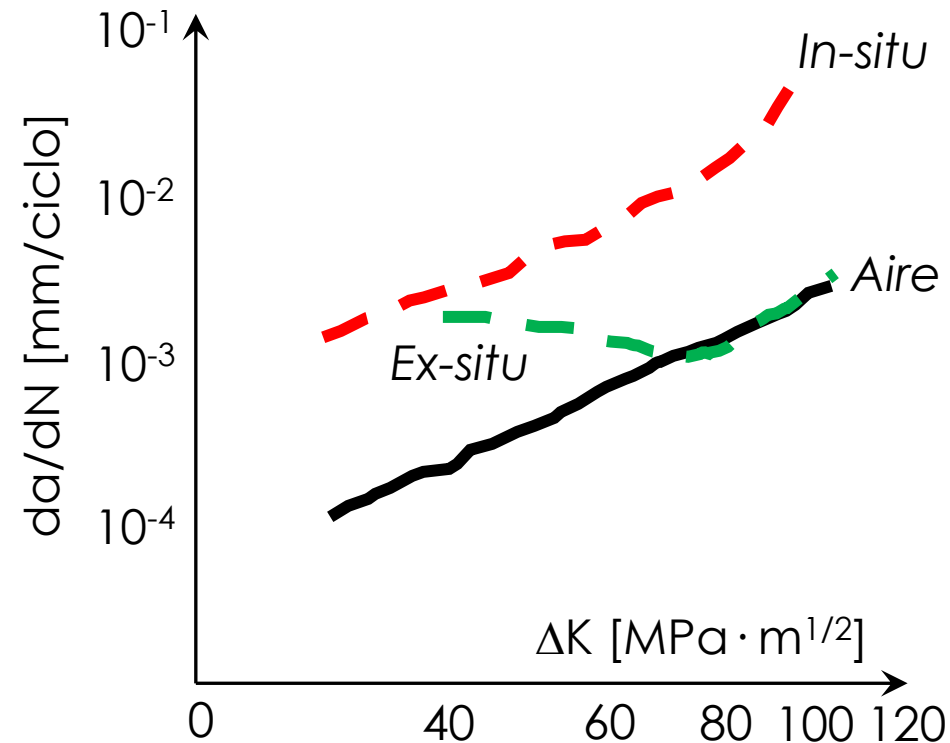


(G. Álvarez et al. 2020)

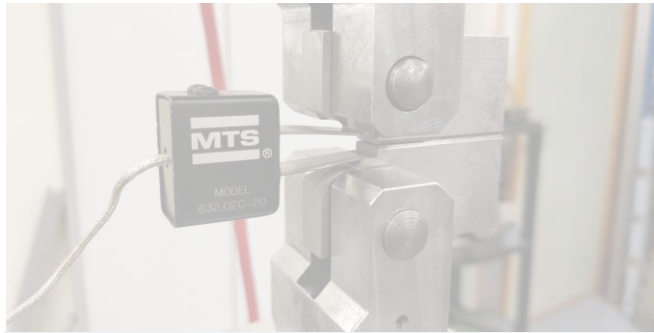
In-situ vs ex-situ (a presión)

Ensayos con hidrógeno “insitu” vs “exsitu” – Hidrógeno a presión

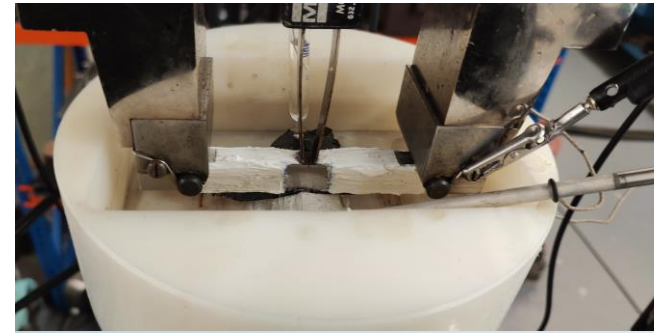
- Con el fin de comparar la diferencia entre los ensayos in-situ y ex-situ se utilizaron muestras tipo CT de crecimiento de grieta por fatiga e hidrógeno gas a presión.



Evolución de ensayos en hidrógeno



ENSAYOS EXSITU
HIDRÓGENO GAS A PRESIÓN



ENSAYOS INSITU
HIDRÓGENO ELECTROQUÍMICO

2016

2025

ENSAYOS EXSITU
HIDRÓGENO ELECTROQUÍMICO



- **Ensayo in-situ electroquímico:**

- Menos costoso y más seguro que en hidrógeno gas a presión.
- Necesidad de desarrollar procedimiento de ensayo.

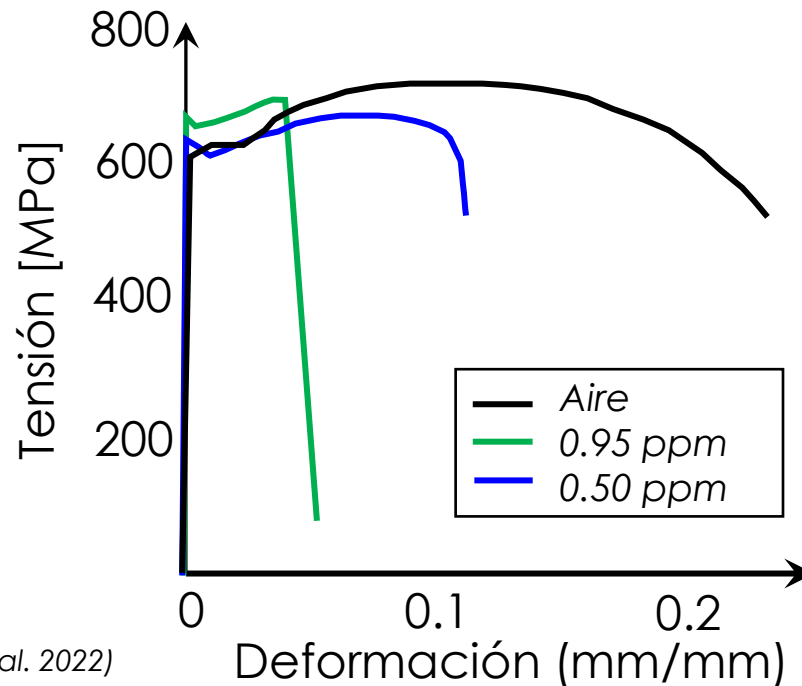
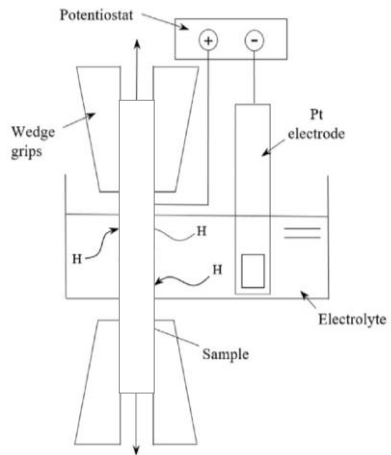
Condiciones de servicio

- Se establecen las condiciones de servicio en función del hidrógeno introducido a presiones de trabajo del acero. Para ello se sigue el siguiente procedimiento:
 1. Se obtiene experimentalmente la cantidad de hidrógeno introducido con hidrógeno gas a presión.
 2. Se realizan precargas electroquímicas con diferentes parámetros y electrolitos hasta obtener dichos valores.

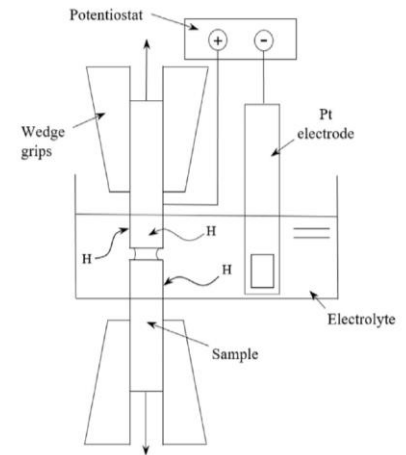
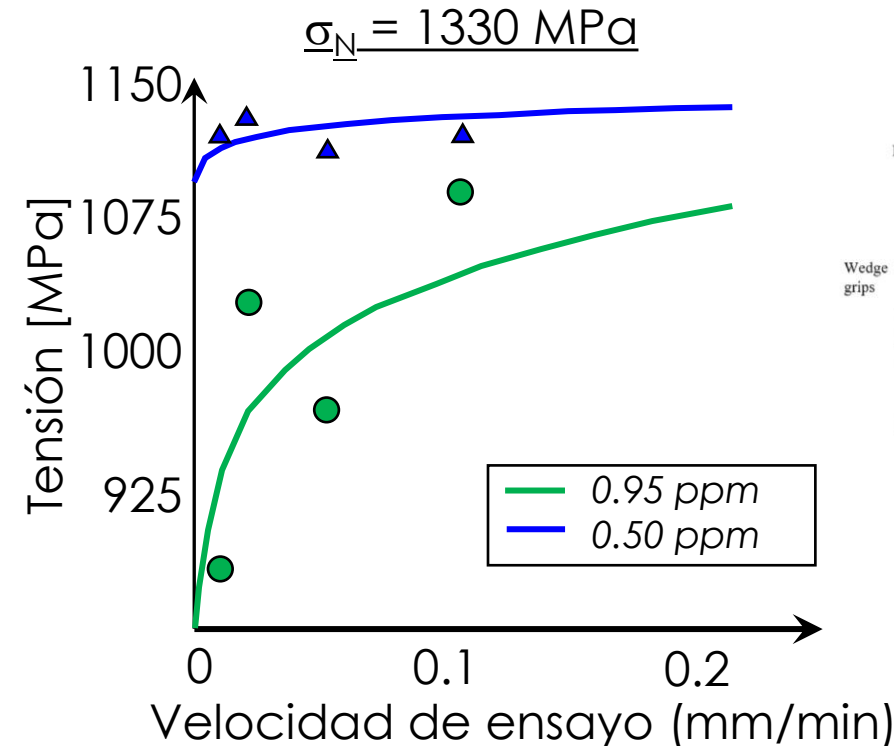


TRACCIÓN Y TRACCIÓN ENTALLADA

1. **Ambiente:** Se utilizan los parámetros obtenidos anteriormente para generar el ambiente.
2. **Ensayo:** Se realiza el ensayo uniaxial al mismo tiempo que se aplican las condiciones mencionadas en el punto 1.

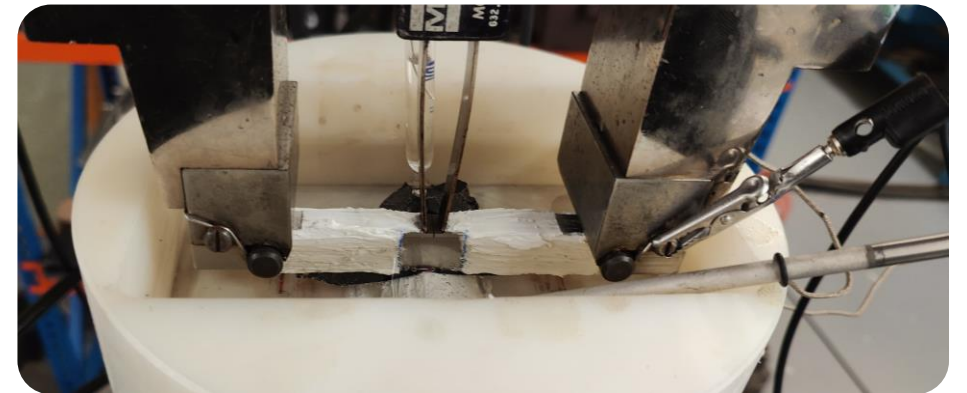
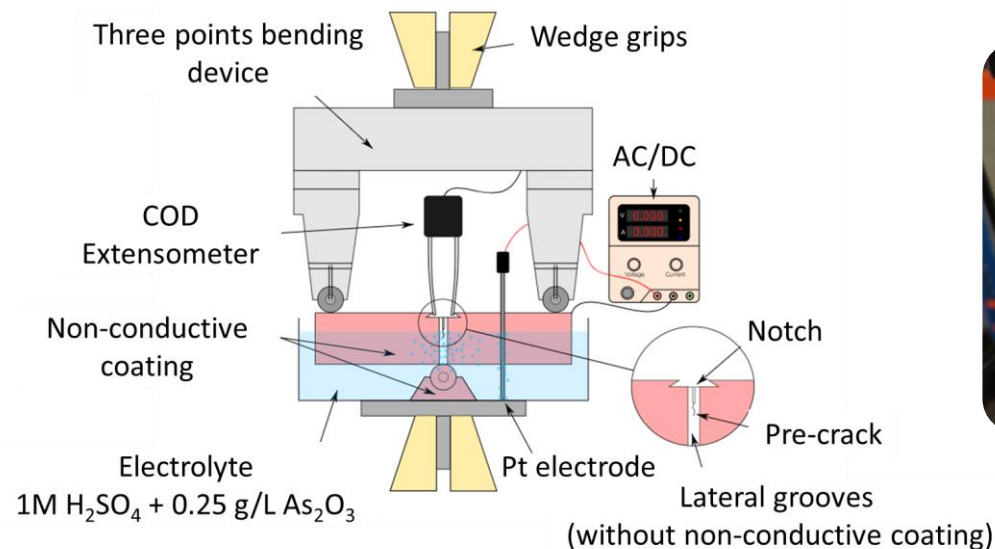
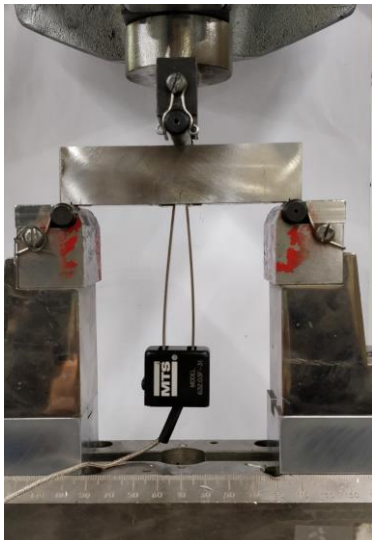


(V. Arniella et al. 2022)



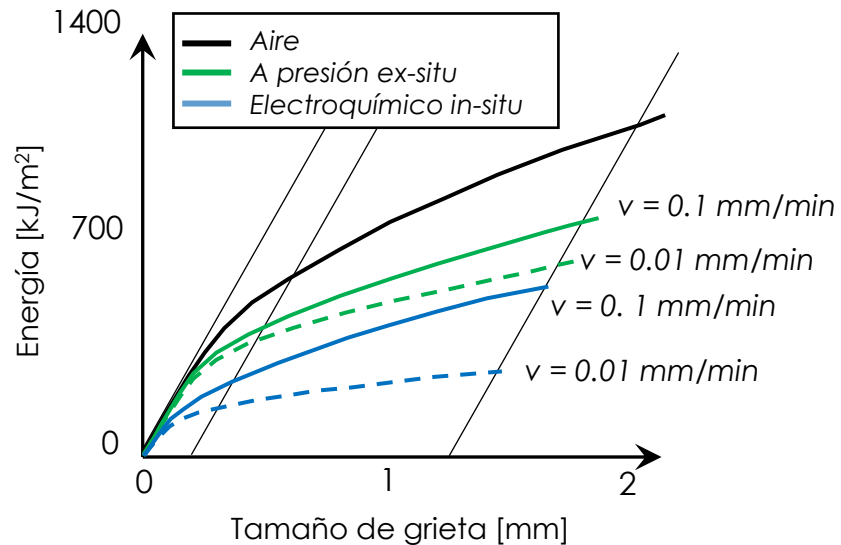
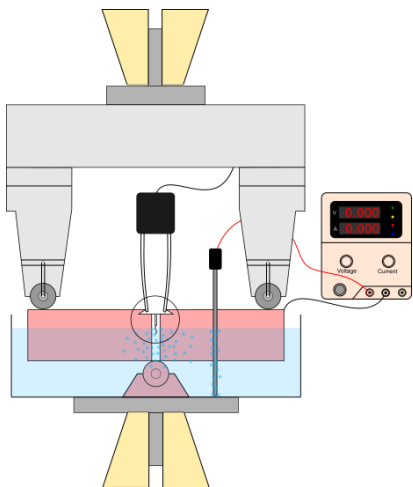
TENACIDAD A LA FRACTURA

1. **Ambiente:** Se utilizan los parámetros obtenidos anteriormente para generar el ambiente.
2. **Necesidad de adaptar el dispositivo de ensayo:** Se realiza el ensayo, pero con el dispositivo invertido con el fin de poder utilizar el extensómetro para registrar el crecimiento de la grieta.



TENACIDAD A LA FRACTURA

1. **Ambiente:** Se utilizan los parámetros obtenidos anteriormente para generar el ambiente.
2. **Necesidad de adaptar el dispositivo de ensayo:** Se realiza el ensayo, pero con el dispositivo invertido con el fin de poder utilizar el extensómetro para registrar el crecimiento de la grieta.

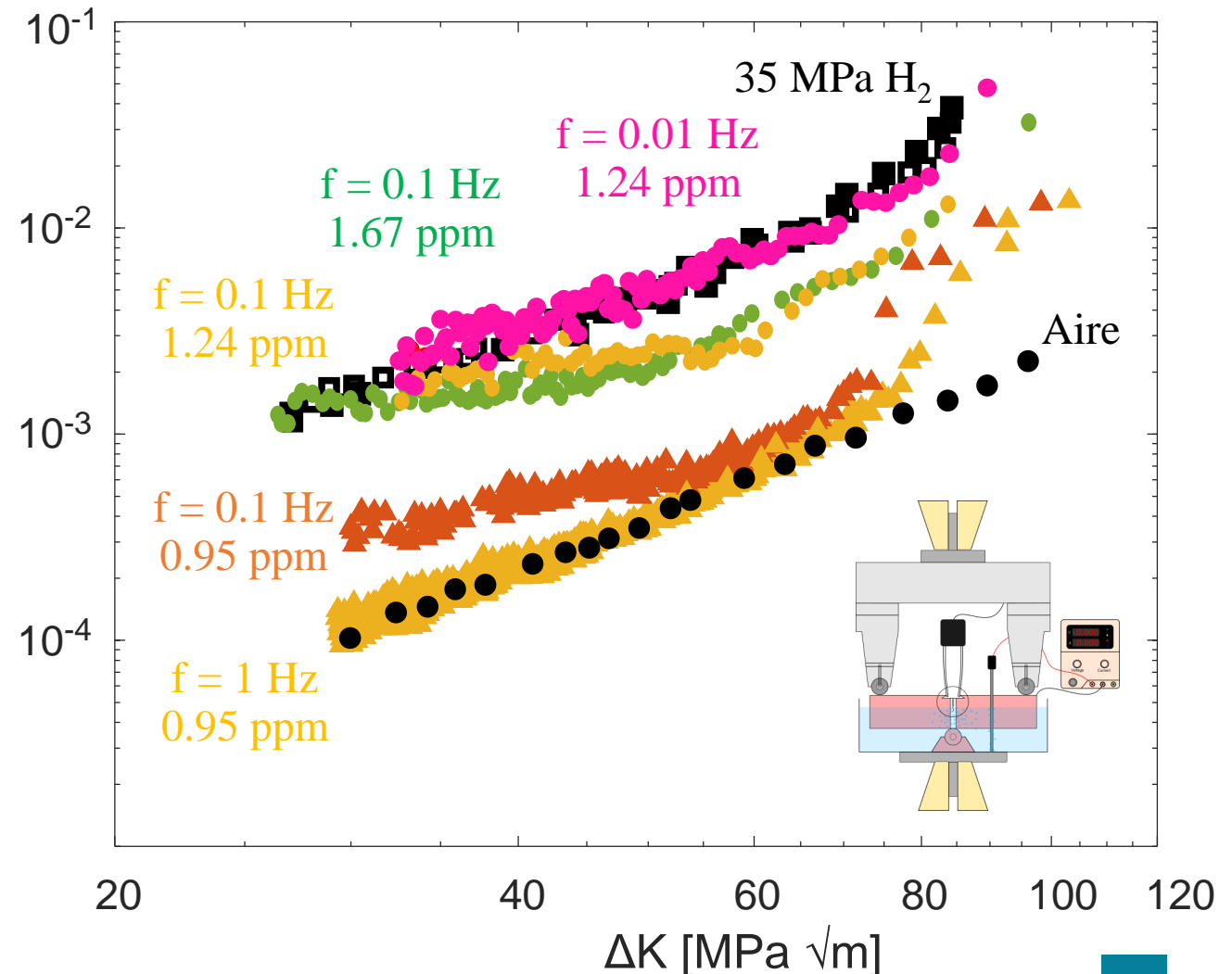


Condición	Velocidad de desplazamiento [mm/min]	HEI* ($J_{0.2/BL}$) [%]
Air	1	-
Gas a presión ex-situ	0.1	16.1
	0.01	17.3
Electroquímico In-situ	0.1	51.1
	0.01	64.5

CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA

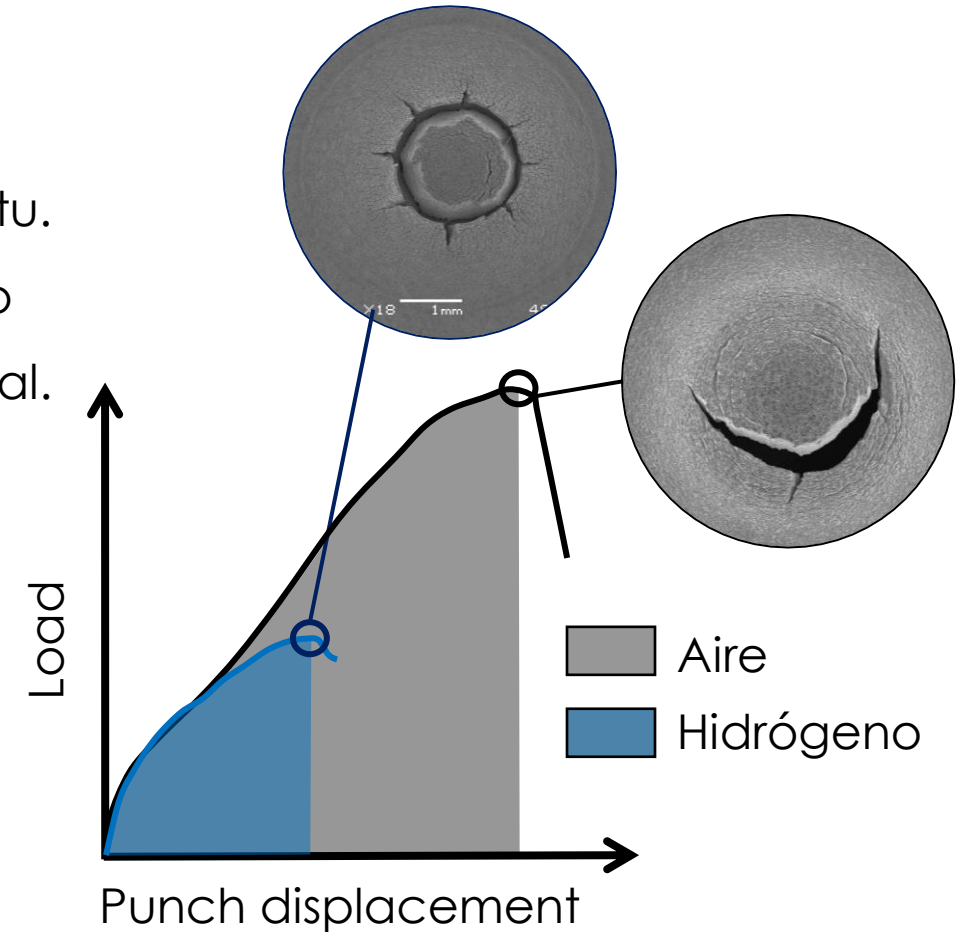
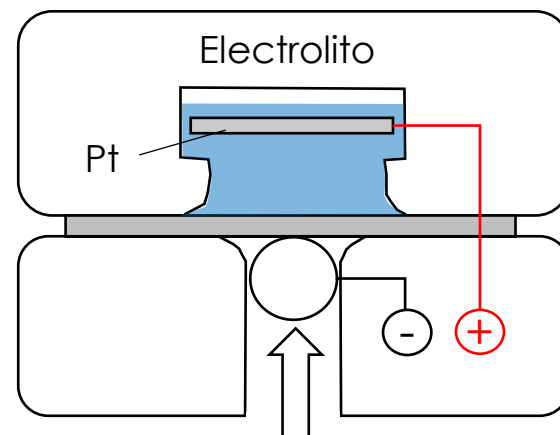
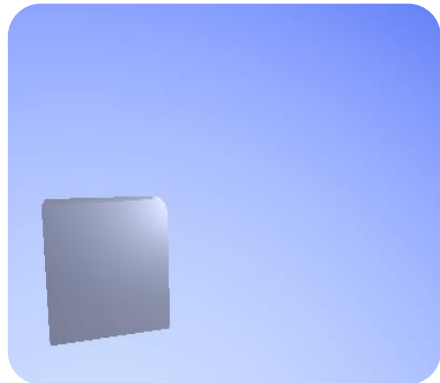
1. **Ensayo:** La disposición es similar a la vista en el caso de tenacidad a fractura.
2. **Ambiente:** Se modifican las variables de carga y frecuencias de ensayo para conseguir los resultados obtenidos en los ensayos a presión “in-situ”.

- △ Electrolito salino
- Electrolito ácido



SMALL PUNCH TEST

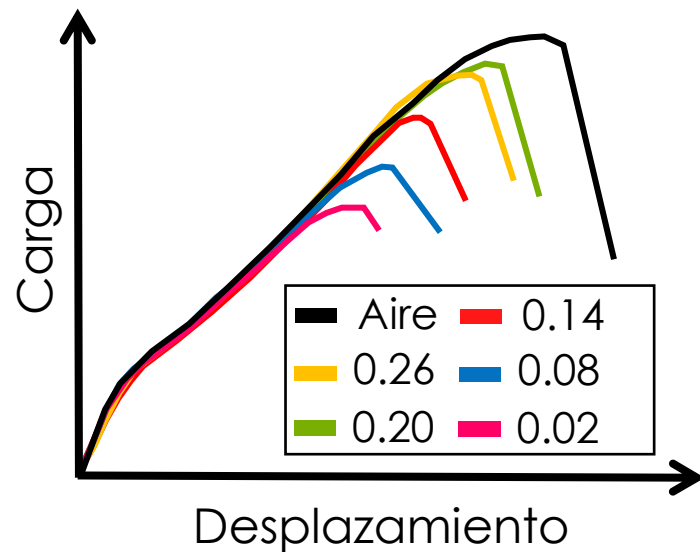
1. Se modifica el dispositivo para realizar el ensayo in-situ.
2. Estudio de la velocidad de desplazamiento y parámetro idóneo para cuantificar la susceptibilidad del material.



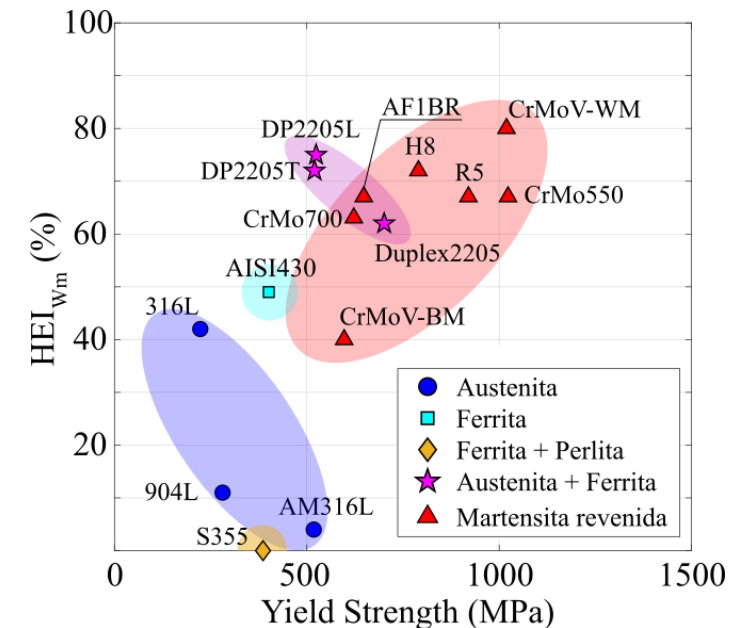
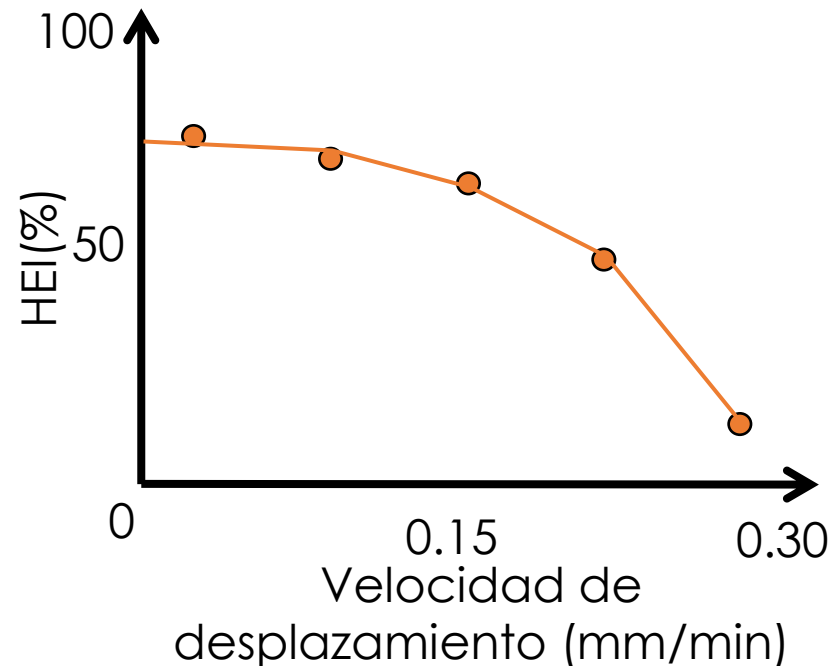
$$HEI_w (\%) = \frac{W_{SPT}^{Air} - W_{SPT}^{Hydrogen}}{W_{SPT}^{Air}} \times 100$$

SMALL PUNCH TEST

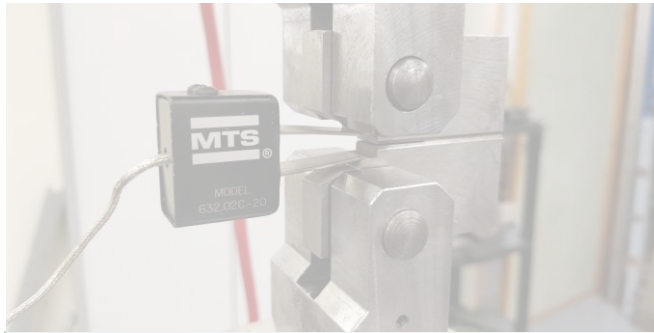
1. Ensayos a diferentes velocidades y densidades de corriente (ej. CrMo700)
2. Fijando una densidad de corriente y velocidad de ensayo se consiguió estudiar una gran variedad de aceros.



(G. Álvarez et al. 2023)



Evolución de ensayos en hidrógeno



ENSAYOS EXSITU
HIDRÓGENO GAS A PRESIÓN



ENSAYOS INSITU
HIDRÓGENO ELECTROQUÍMICO

- **Ensayo SPT in-situ con gas a presión:**
 - Más seguro
 - Reproducir condiciones reales

2016

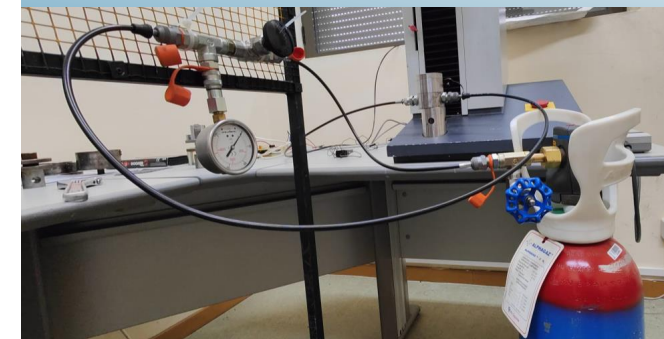
2025

ENSAYOS EXSITU
HIDRÓGENO ELECTROQUÍMICO



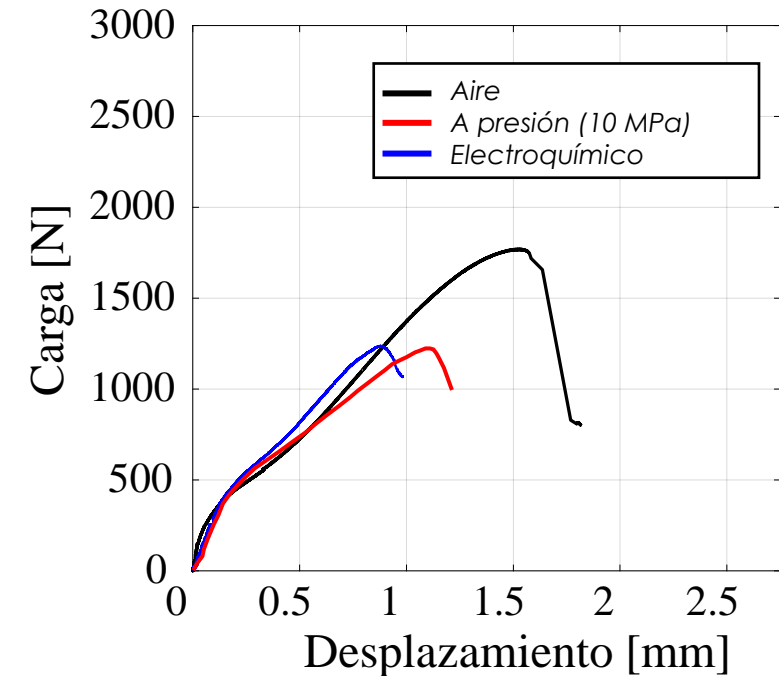
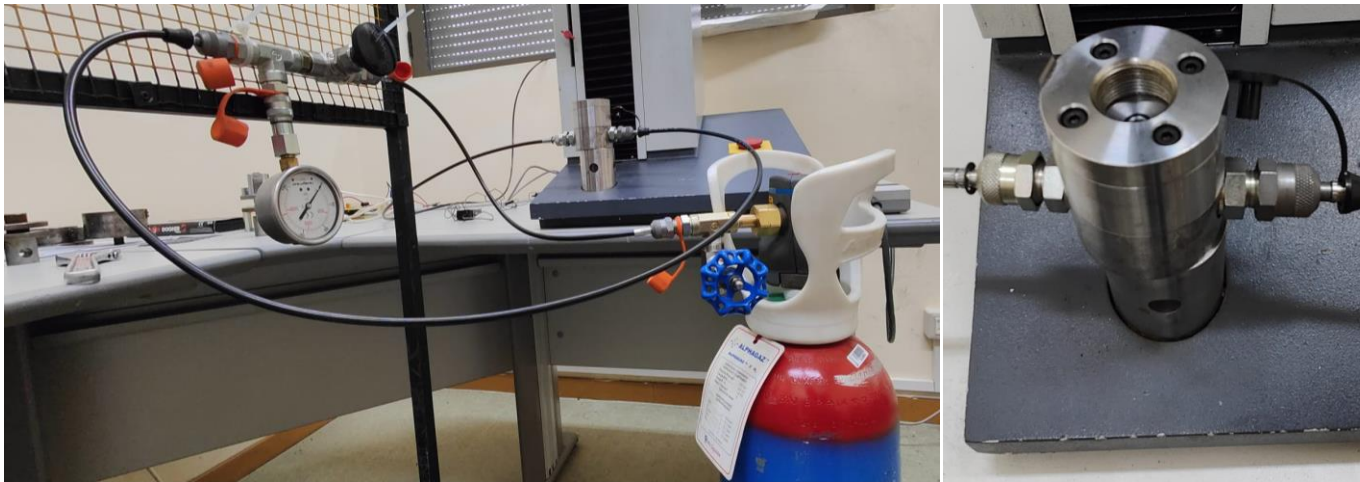
**En desarrollo*

ENSAYOS INSITU
HIDRÓGENO GAS A PRESIÓN



SMALL PUNCH TEST

1. Se ha modificado el dispositivo SPT para realizar los ensayos con hidrógeno gas a presión.
2. Primeros resultados



MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Ensayos mecánicos para la determinación de las propiedades de tracción, tenacidad a la fractura y velocidad de crecimiento de grieta por fatiga en aceros en contacto con hidrógeno

Guillermo Álvarez Díaz

alvarezdguillermo@uniovi.es



Comportamiento en servicio de componentes de acero en contacto con hidrógeno a presión

(PID2021-124768OB-C22)

Parque Tecnológico de Gijón
23 de Mayo del 2024



SimuMecaMat

Simulación Numérica, Modelización, Caracterización Mecánica y Optimización Microestructural de Componentes Industriales



GOBIERNO DEL
PRINCIPADO DE ASTURIAS

