



DESARROLLO DE TÉCNICAS DE ENSAYO PARA ANALIZAR EL EFECTO DEL HIDRÓGENO EN LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE HIDRÓGENO A PRESIÓN

Javier Belzunce,
Grupo investigación SIMUMECAMAT
E. P. Ingeniería de Gijón, universidad de Oviedo
belzunce@uniovi.es



CONTENIDO

1. ESTUDIO DE LA COMPATIBILIDAD DE LOS ACEROS EN CONTACTO CON HIDRÓGENO.
2. FENÓMENO DE FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO.
3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES EN CONTACTO CON HIDRÓGENO

2. ESTUDIO DE LA COMPATIBILIDAD DE LOS MATERIALES PARA TRABAJOS BAJO PRESIÓN DE HIDROGENO

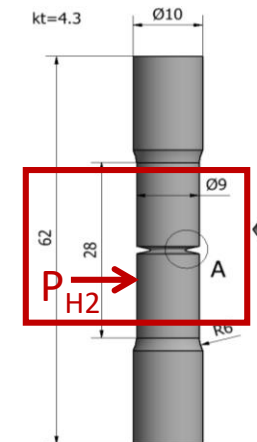
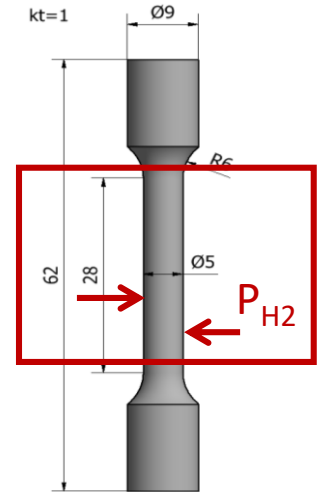
ENSAYOS MECANICOS BAJO LA PRESION DE HIDRÓGENO DEL SERVICIO

ENSAYO DE TRACCION UTILIZANDO PROBETAS LISAS O ENTALLADAS

. Reducción Area (Estricción): $IF_{RA} (\%) = 100 (RA_{AIRE} - RA_H) / RA_{AIRE}$

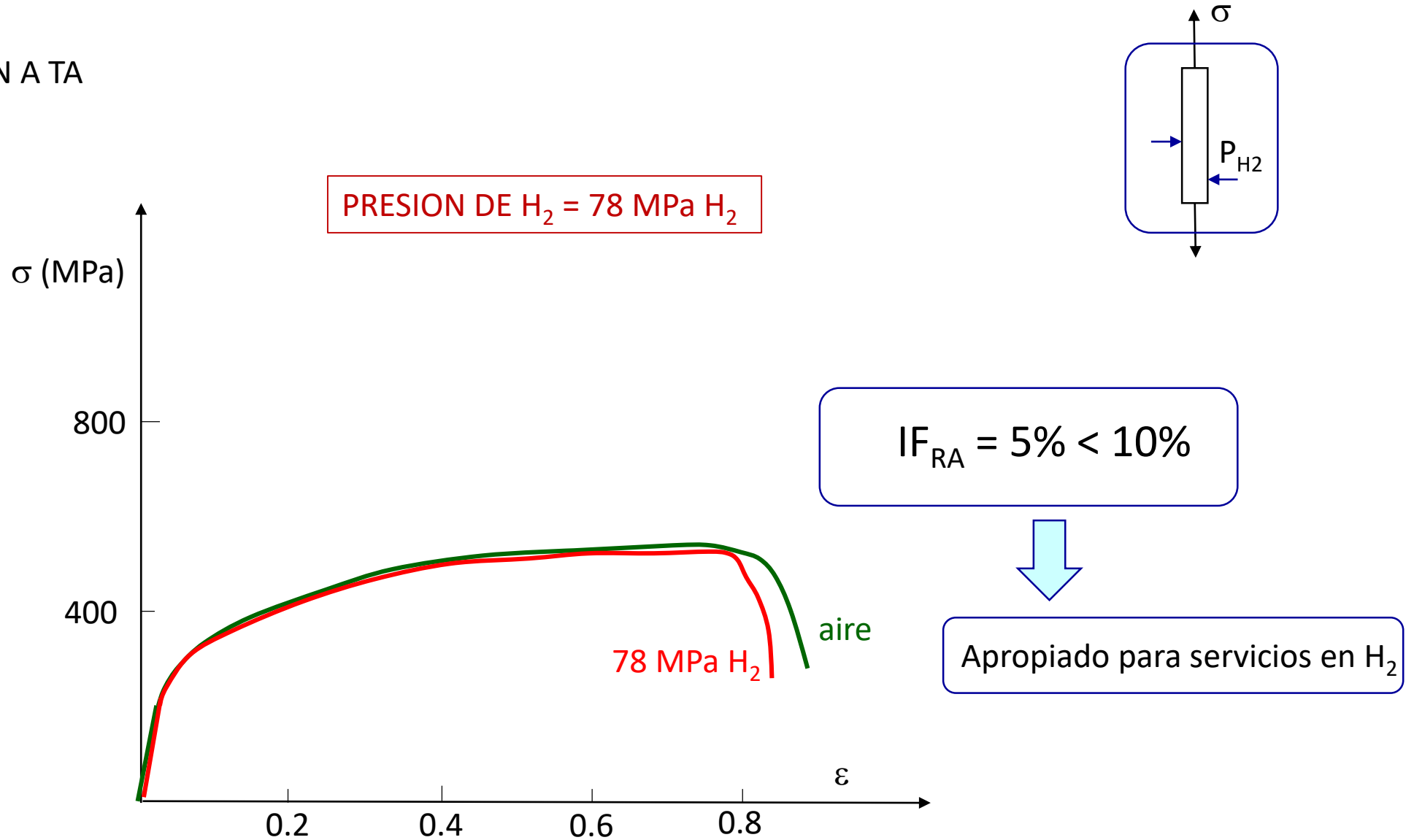
. Resistencia tracción entallada: $IF_{TE} (\%) = 100 (TE_{AIRE} - TE_H) / TE_{AIRE}$

IF (%)	CARACTERISTICAS	EJEMPLO DE ALEACIONES
$IF_{RA} < 10$ o $IF_{TE} < 10$	Plenamente compatibles con hidrógeno a presión	Aleaciones de aluminio y aceros inoxidables austeníticos
$10 < IF_{TE} < 50$	Muestran ya una fragilización significativa	La mayoría de los aceros estructurales de baja/media resistencia
$IF_{TE} > 50$	Incompatibles con hidrógeno a presión	Aceros de alta y muy alta resistencia

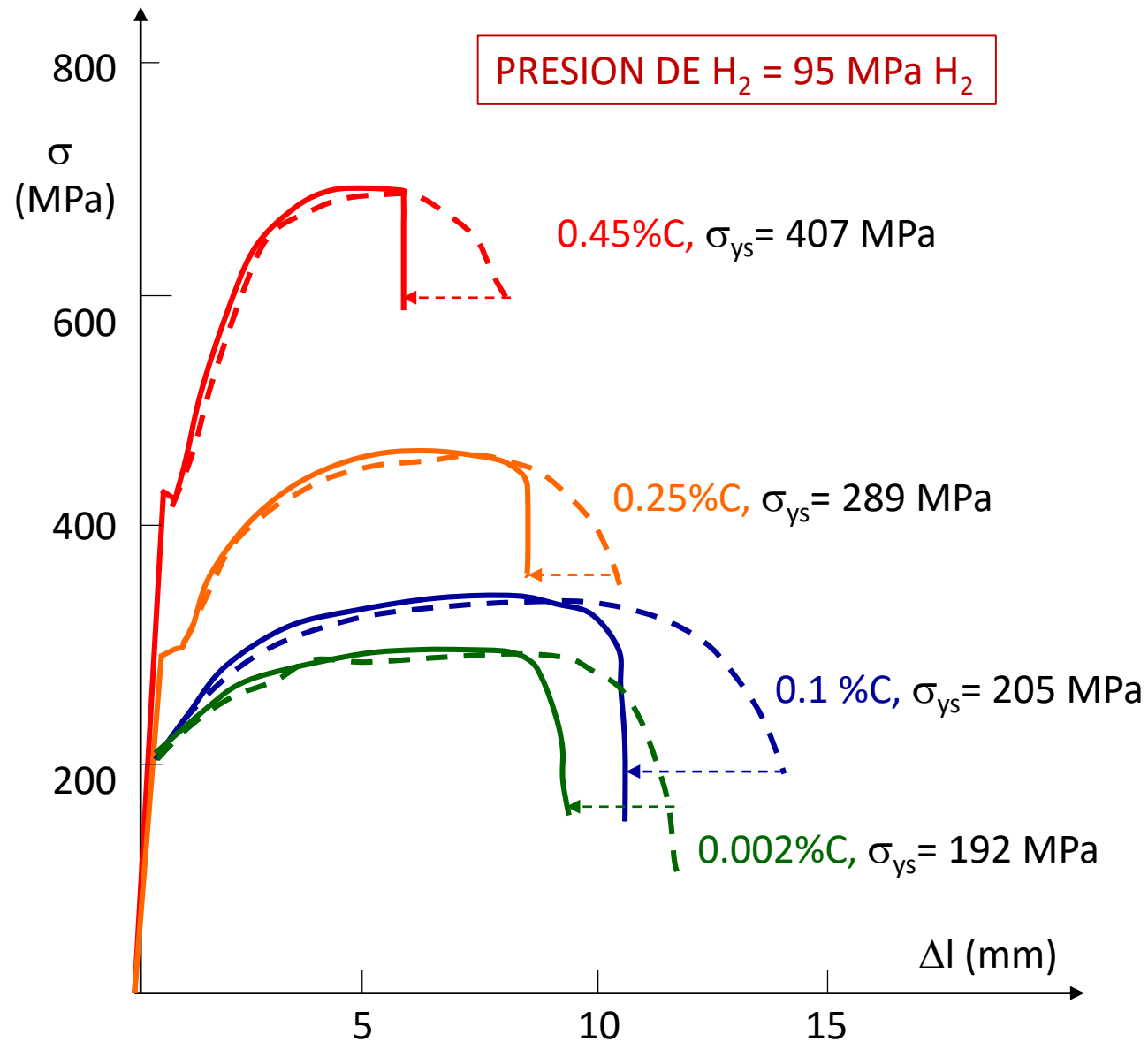


ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO 316L

ENSAYOS DE TRACCIÓN A TA



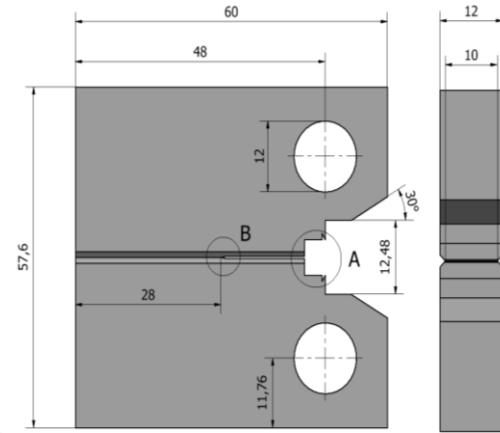
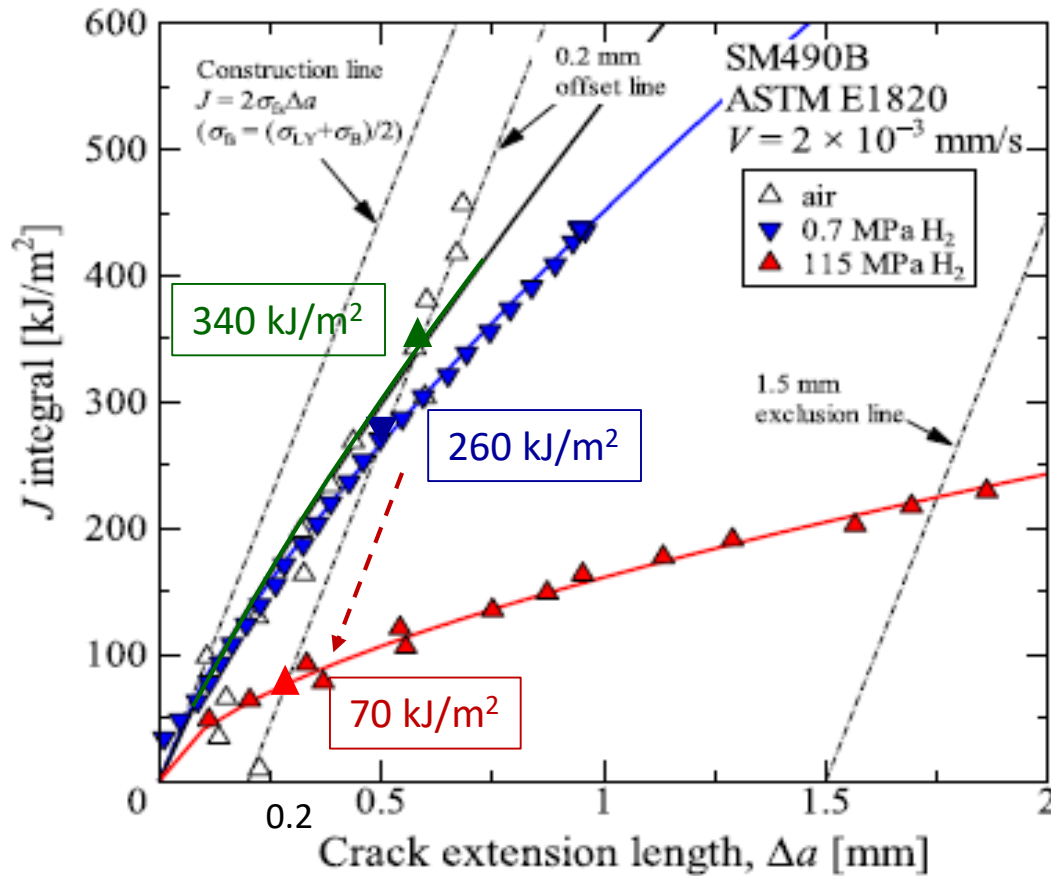
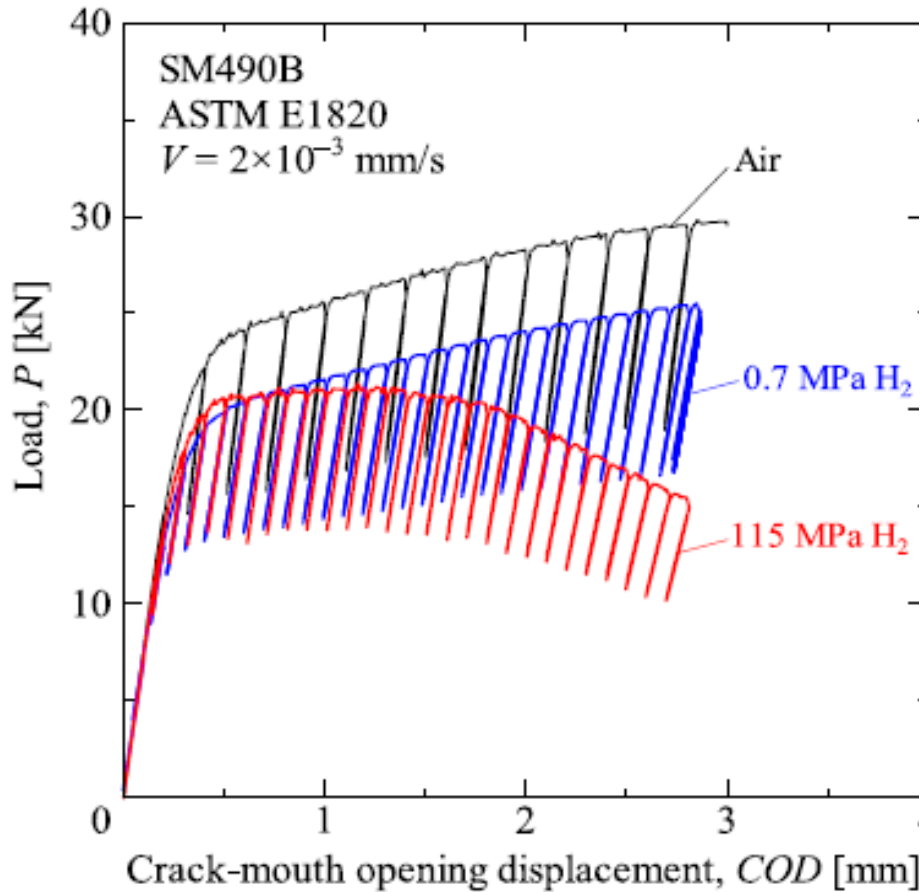
ENSAYOS DE TRACCIÓN DE ACEROS AL CARBONO, AL AIRE Y BAJO 95 MPa H₂



C %	σ_{ys} (MPa)	IF _{RA} (%)
0.002	192	32
0.1	205	40
0.25	289	49
0.45	407	56

TENACIDAD A LA FRACTURA (acero al carbono, $\sigma_{ys} = 360\text{MPa}$)

PRESION DE H₂ = 0.7 y 115 MPa H₂

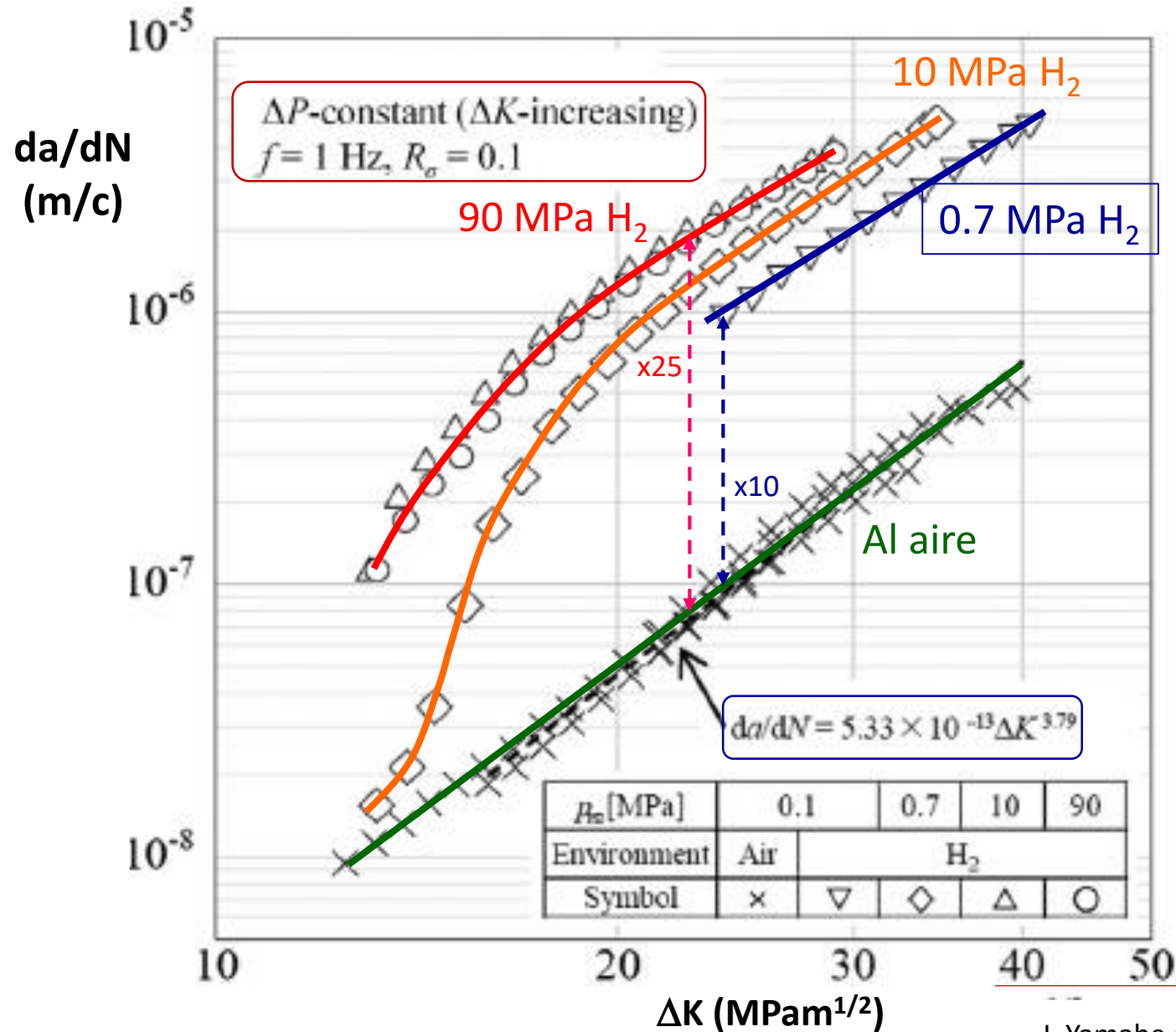


$IF_{J0.2} = 24\%$ (0.7 MPa)

$IF_{J0.2} = 80\%$ (115 MPa)

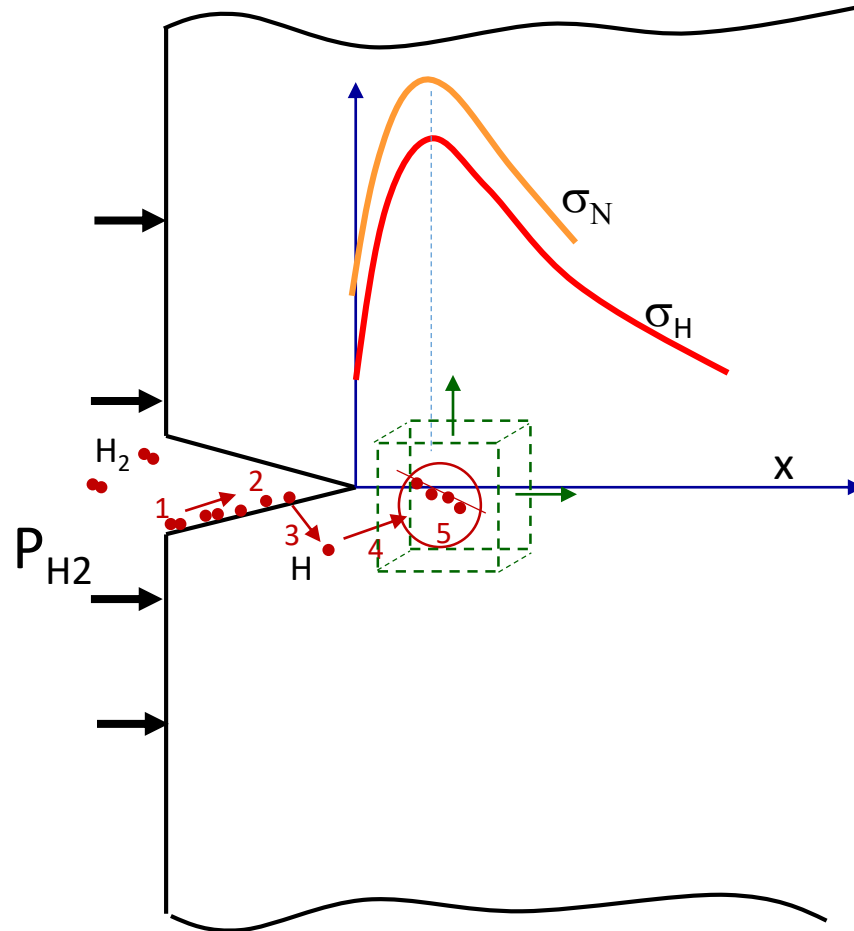
CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA: ACERO AL CARBONO, 0.16%C-1.43%Mn

$\sigma_{ys} = 360 \text{ MPa}$



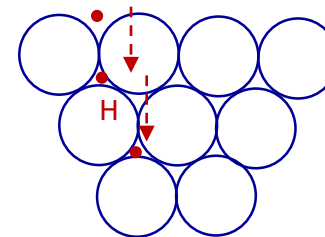
2. FENOMENO DE FRAGILIZACION POR HIDRÓGENO

COMPONENTE CON UN DEFECTO/GRIETA CARGADO BAJO PRESION DE H₂

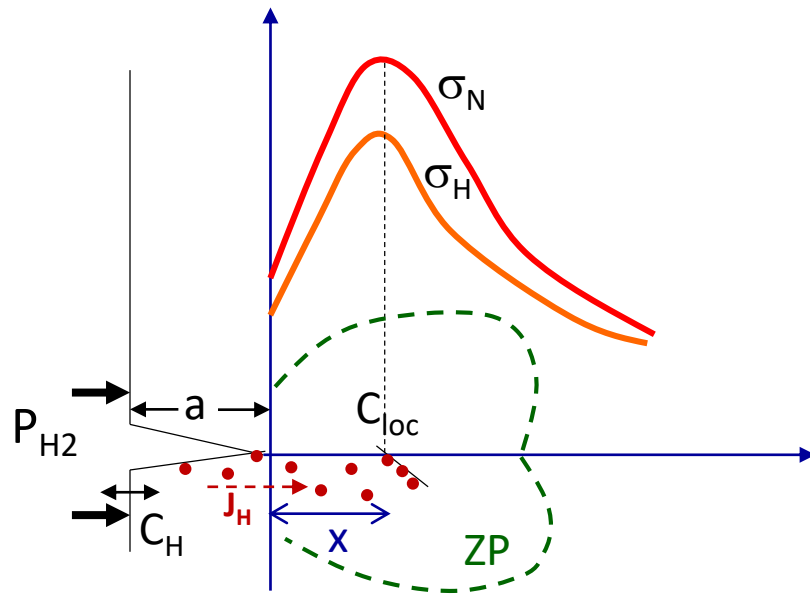


ETAPAS EN LA FRAGILIZACION

1. Adsorción física de la molécula H_2 .
2. Disociación y adsorción de los átomos de H: $H_2 \rightarrow H + H$
3. Entrada del H en la estructura cristalina: $H_{ad} \rightarrow H_{ab}$
4. Difusión de H hasta la zona de fragilización (Max. σ_H).
5. Mecanismo de fragilización local (descohesión intercaras internas)



FRAGILIZACION POR HIDRÓGENO



Componente con defectos (concentrador de tensión)

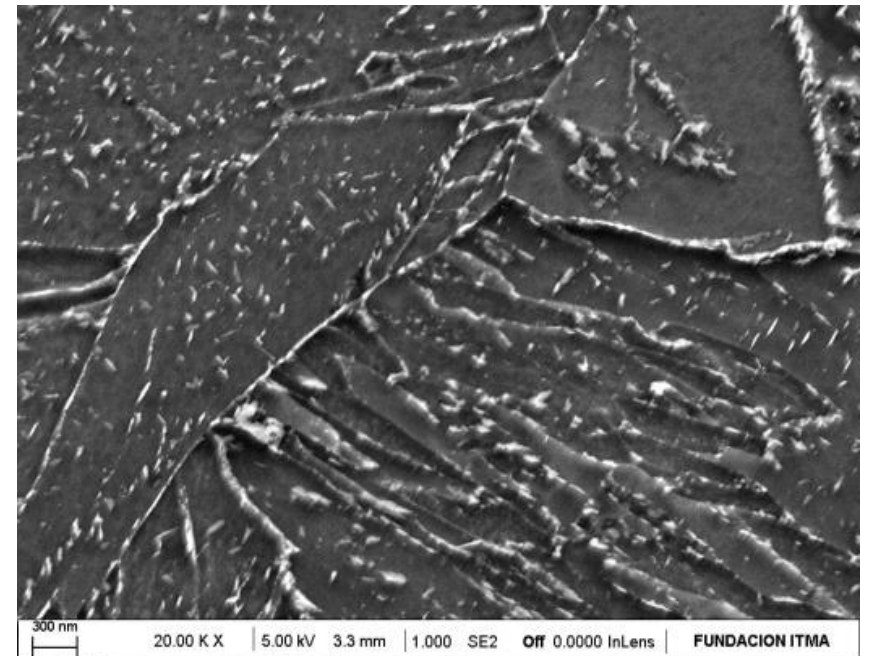
Ley de Sievert: $C_H = S_H (P_{H_2})^{1/2}$

Leyes de Fick: $J_H = D_H (dC_H/dx)$

$$C_{loc} = C_H \exp(V_H \sigma_H / RT)$$

$$\sigma_{H \text{ Max}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \approx 2.5 \sigma_{ys}$$

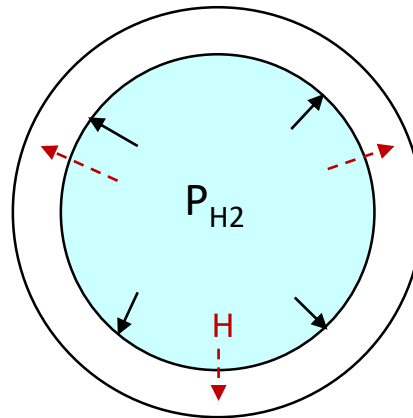
$$\sigma_{N \text{ Max}} \approx 3.5 \sigma_{ys}$$



Acero templado y revenido

3. EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DE MATERIALES EN CONTACTO CON HIDROGENO A PRESION

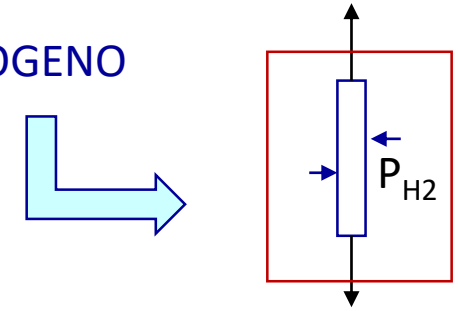
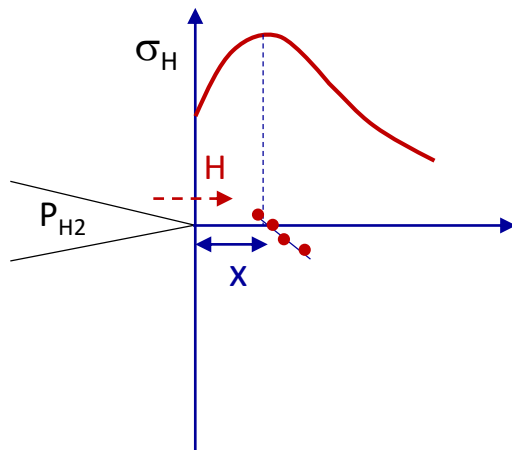
1. ENSAYOS CON CARGA DE HIDROGENO SIMULTANEA A LA CARGA MECANICA (H EXTERNO)
2. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE PROBETAS PRE-CARGADAS CON HIDROGENO (H INTERNO)



HIDROGENO EXTERNO

1. INSTALACIONES QUE PERMITEN ENSAYAR LOS MATERIALES BAJO ALTAS PRESIONES DE HIDROGENO

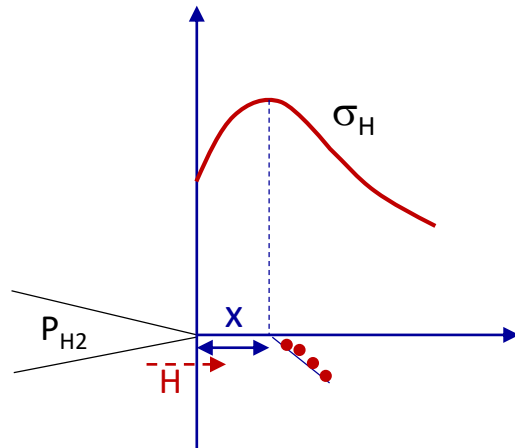
- . Instalaciones muy costosas, baja disponibilidad y dotadas de estrictas medidas de seguridad.
- . Reproduce fielmente la condición de servicio de depósitos y tuberías.
- . Necesidad de controlar la duración del ensayo (velocidad de desplazamiento, frecuencia)



HIDROGENO EXTERNO

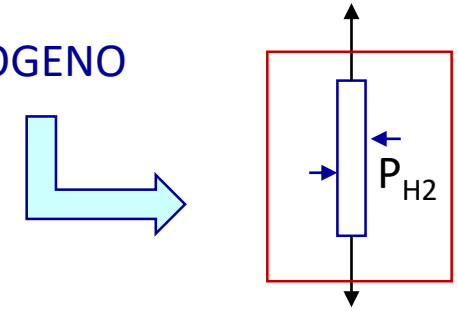
1. INSTALACIONES QUE PERMITEN ENSAYAR LOS MATERIALES BAJO ALTAS PRESIONES DE HIDROGENO

. Dificultad para ensayar materiales con coeficientes de difusión muy bajos.



$$K \approx 100 \text{ MPam}^{1/2} \quad J \approx 50 \text{ kJ/m}^2 \quad x \approx 0.1 \text{ mm}$$

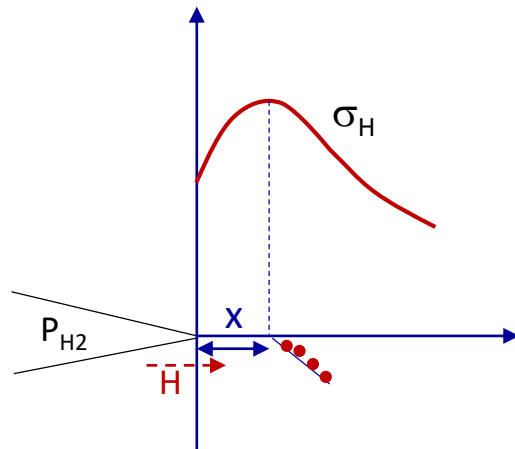
ACEROS	D (m ² /s)	Tiempo, x = 0.1 mm
S355	10 ⁻⁹	10 s
42CrMo4	10 ⁻¹⁰	100 s
2.25Cr1MoV	10 ⁻¹¹	16 min
Duplex	10 ⁻¹³	28 h
Austenítico	<10 ⁻¹⁵	115 días



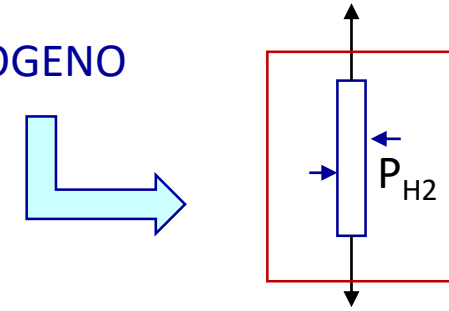
HIDROGENO EXTERNO

1. INSTALACIONES QUE PERMITEN ENSAYAR LOS MATERIALES BAJO ALTAS PRESIONES DE HIDROGENO

. Dificultad para ensayar materiales con coeficientes de difusión muy bajos.



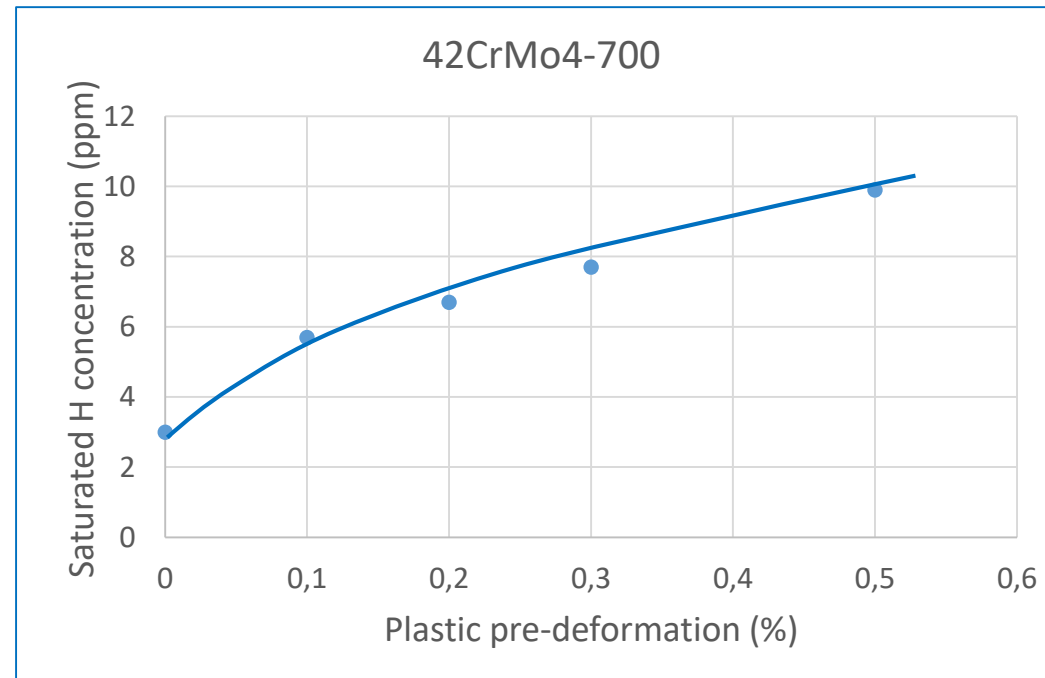
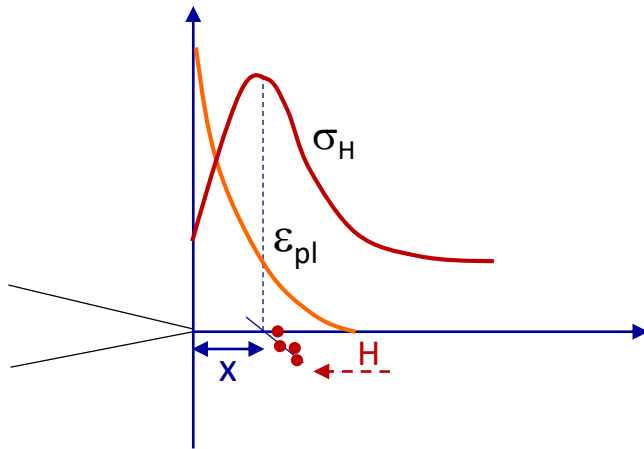
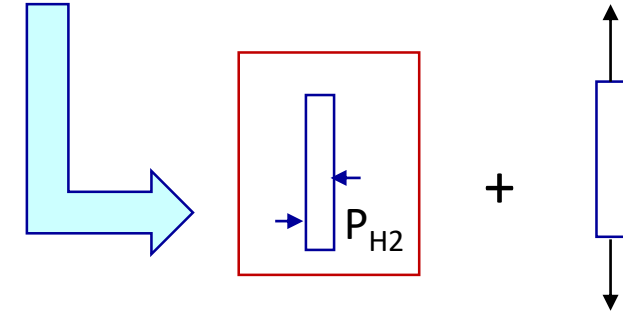
ACEROS	D (m ² /s)	Recorrido (mm)	f (Hz)
S355	10 ⁻⁹	0.1 mm	1
42CrMo4	10 ⁻¹⁰	32 μm	0.1
2.25Cr1MoV	10 ⁻¹¹	10 μm	0.01
Duplex	10 ⁻¹³	1 μm	10 ⁻⁴
Austenítico	<10 ⁻¹⁵	0.1 μm	10 ⁻⁷



HIDROGENO INTERNO

2. INSTALACIONES DE ENSAYO CONVENCIONALES UTILIZANDO PROBETAS PRE-CARGADAS BAJO PRESIÓN DE HIDRÓGENO

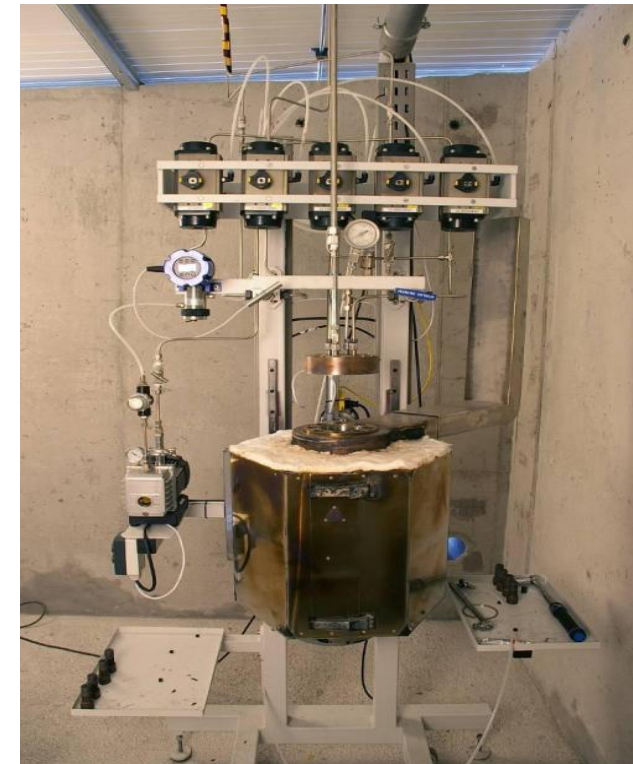
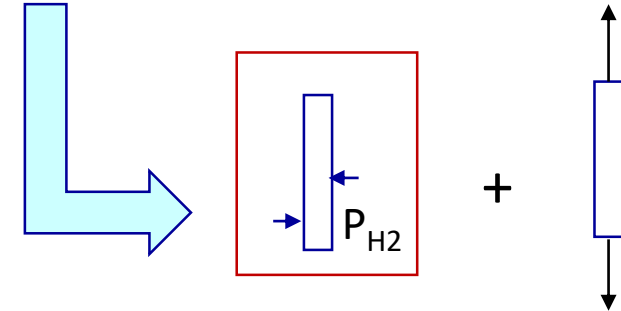
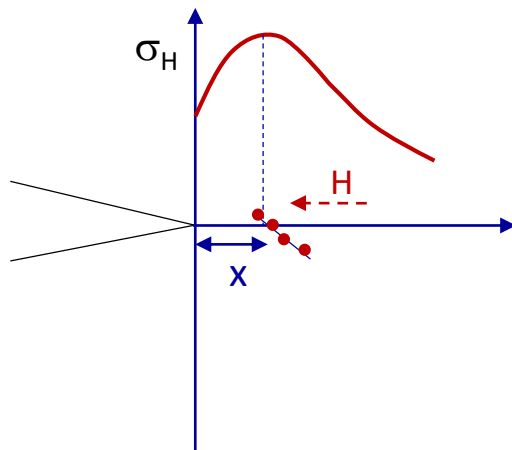
- . Facilidad de ensayo y disponibilidad más asequible.
- . Pérdida de hidrógeno desde la carga hasta el final del ensayo.
- . Resultados no trasladables a la condición real de servicio.



HIDROGENO INTERNO

2. INSTALACIONES DE ENSAYO CONVENCIONALES UTILIZANDO PROBETAS PRE-CARGADAS BAJO PRESIÓN DE HIDRÓGENO

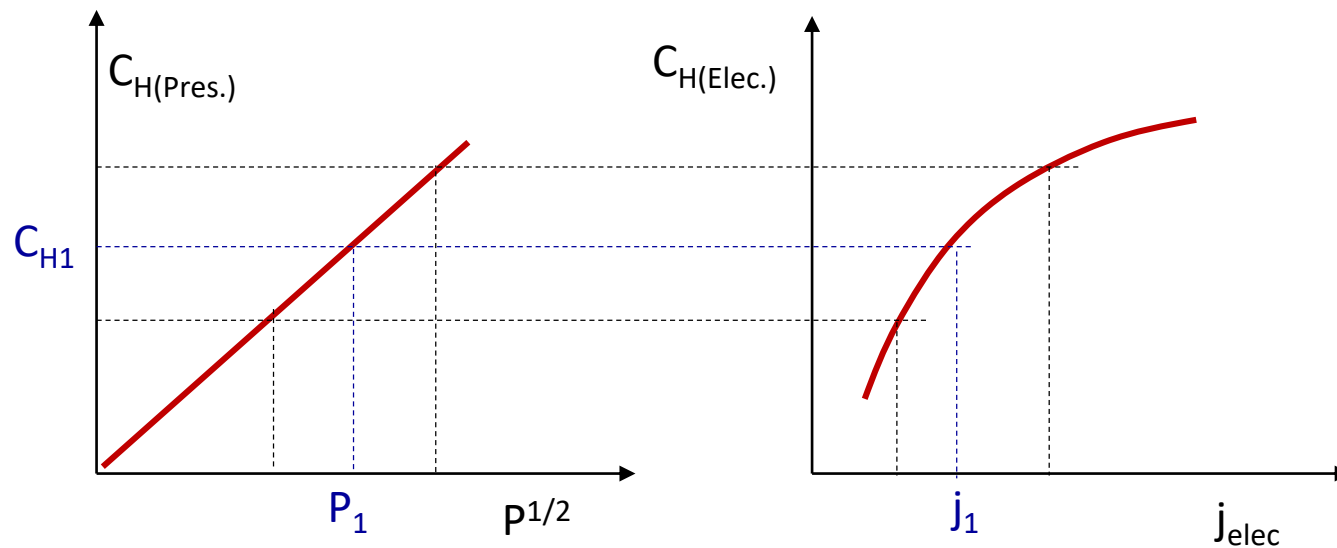
- . Facilidad de ensayo y disponibilidad más asequible.
- . Pérdida de hidrógeno desde la carga hasta el final del ensayo.
- . Resultados no trasladables a la condición real de servicio.
- . Permiten comparar el comportamiento de diferentes materiales
- . Permiten caracterizar aceros con bajos coeficientes de difusión.



HIDROGENO EXTERNO

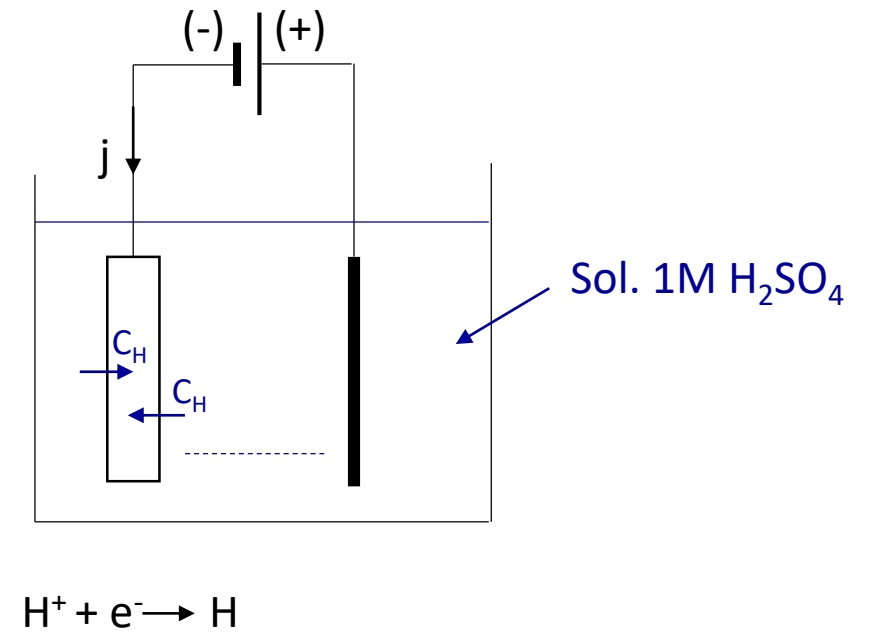
INSTALACIONES DE ENSAYO CONVENCIONALES UTILIZANDO CARGA ELECTROQUIMICA DE HIDROGENO

- . Facilidad de ensayo y alta disponibilidad
- . Resultados trasladables a la condición real de servicio si se asegura la misma entrada de H que bajo la presión gaseosa



Ley de Sievert: $C_H = S p^{1/2}$

$$C_{H(Pres)} \equiv C_{H(Elec.)}$$





RESUMEN FINAL

- . Las propiedades mecánicas de los aceros estructurales decaen bajo presión de hidrógeno: el límite elástico apenas se modifica, pero la tenacidad a la fractura y la velocidad de crecimiento de grieta por fatiga se deterioran notablemente.
- . El hidrógeno se acumula delante de concentradores de tensión (entallas, grietas) para dar lugar a descohesiones internas que justifican la fragilización, siendo ésta tanto mayor cuanto mayor es el límite elástico del material.
- . La caracterización mecánica en presencia de hidrógeno debe tener muy en cuenta el coeficiente de difusión del hidrógeno en el acero con objeto de utilizar una velocidad de carga que posibilite la movilidad del hidrógeno en su estructura.
- . Una caracterización realista del comportamiento de componentes bajo presión de hidrógeno exige introducir el hidrógeno al mismo tiempo que se carga mecánicamente la probeta en el ensayo, de modo que el hidrógeno entre a través de la zona plástica generada.



FUNDAMENTOS DE LA FRAGILIZACION POR HIDRÓGENO Y METODOS DE EVALUACION

Javier Belzunce,
Grupo investigación SIMUMECAMAT
E. P. Ingeniería de Gijón, universidad de Oviedo

belzunce@uniovi.es