



FUNDAMENTOS DE LA FRAGILIZACIÓN DE COMPONENTES DE ACERO SOMETIDOS A PRESIÓN DE HIDRÓGENO

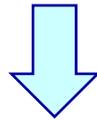
Javier Belzunce Varela

belzunce@uniovi.es

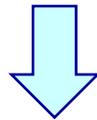


Manejo de hidrógeno a presión

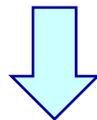
. Construcción de tanques de almacenamiento y tuberías para el transporte de hidrógeno a presión y de todos los componentes necesarios (compresores, válvulas, registros, ...)



. Utilización de materiales que aseguren la fiabilidad a largo plazo de todos estos componentes.



. Necesidad de estudiar la compatibilidad de los materiales frente al hidrógeno



FRAGILIZACION POR HIDRÓGENO (HE)



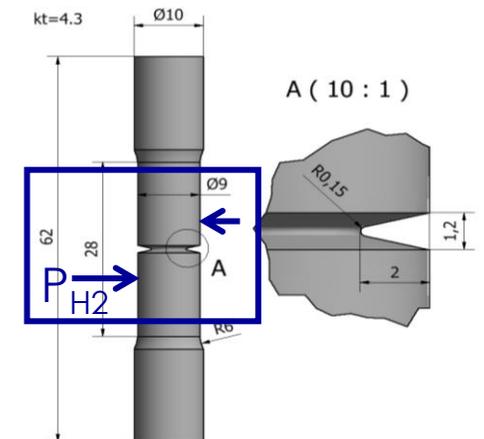
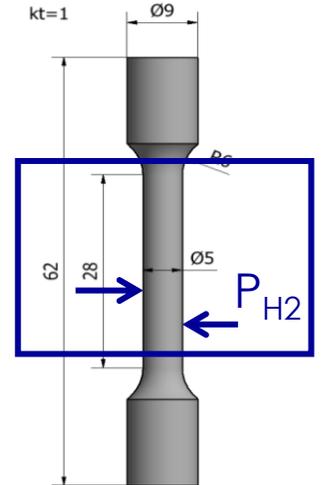
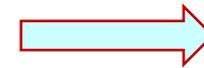
Compatibilidad de los materiales en contacto con H₂ a presión

ENSAYO DE TRACCION UTILIZANDO PROBETAS LISAS O ENTALLADAS BAJO P_{H2} (ASTM G142)

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

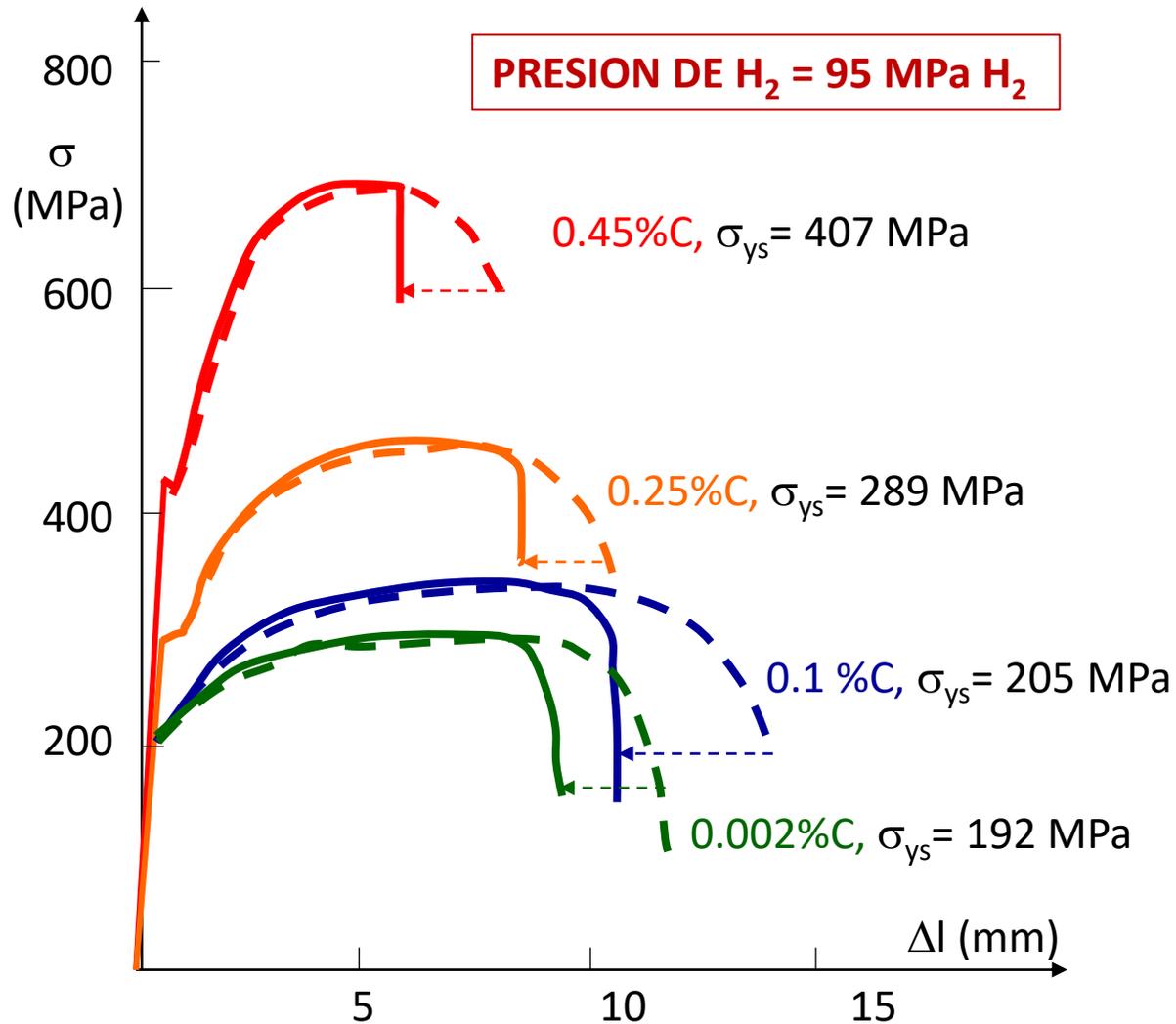
Resistencia tracción entallada: $IF_{TE} (\%) = 100 (TE_{AIRE} - TE_H) / TE_{AIRE}$

0 < IF < 100



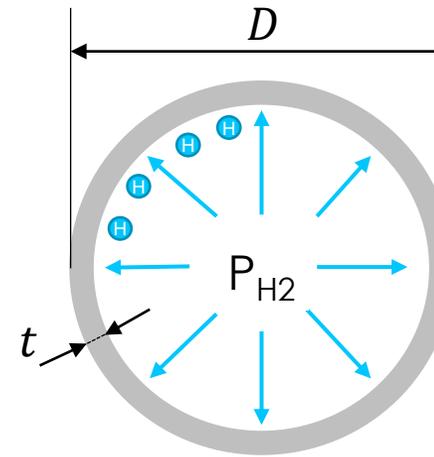
IF (%)	CARACTERISTICAS	EJEMPLO DE ALEACIONES
$IF_{RA} < 10$ o $IF_{TE} < 10$	Plenamente compatibles con hidrógeno a presión	Aleaciones de aluminio y aceros inoxidables austeníticos
$10 < IF_{TE} < 50$	Muestran ya una fragilización significativa	La mayoría de los aceros estructurales de baja/media resistencia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

Ensayos de tracción de aceros al carbono, al aire y bajo presión de H₂



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

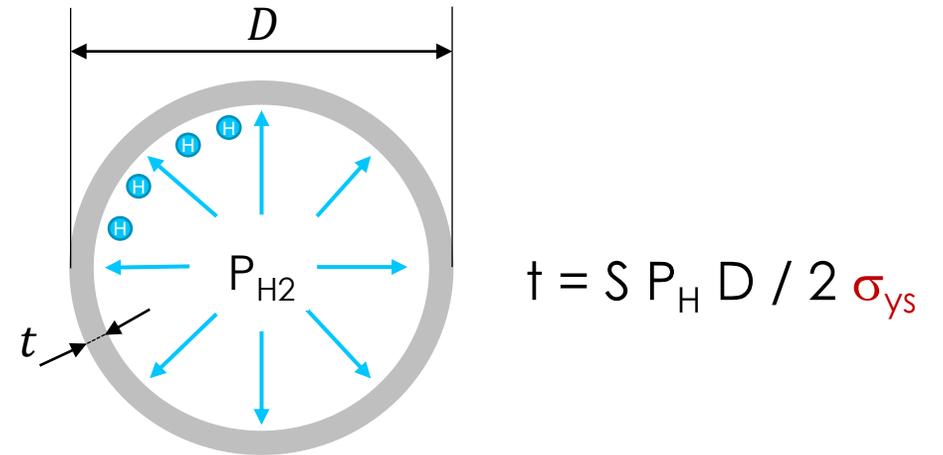
DEPOSITOS, GASODUCTOS



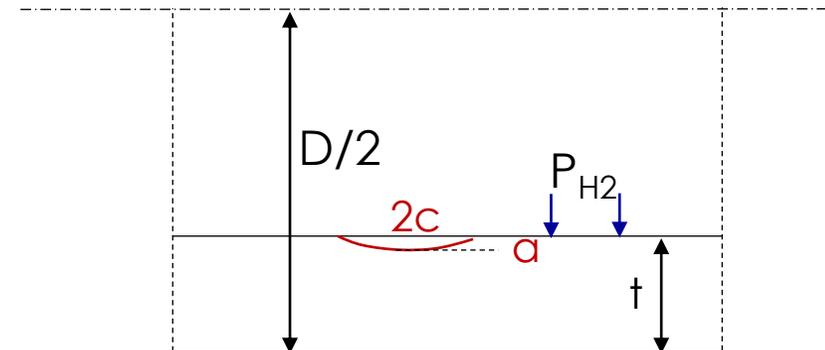
$$t = S P_H D / 2 \sigma_{ys}$$



DEPOSITOS, GASODUCTOS

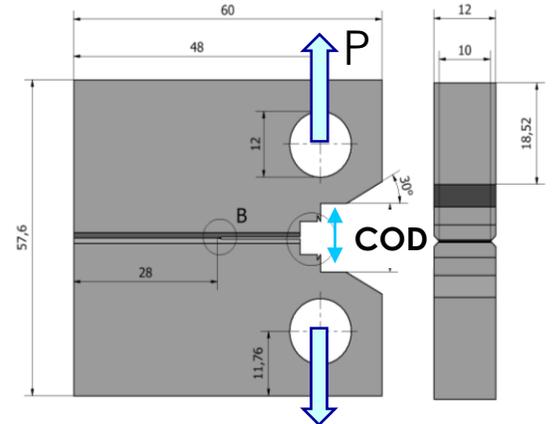
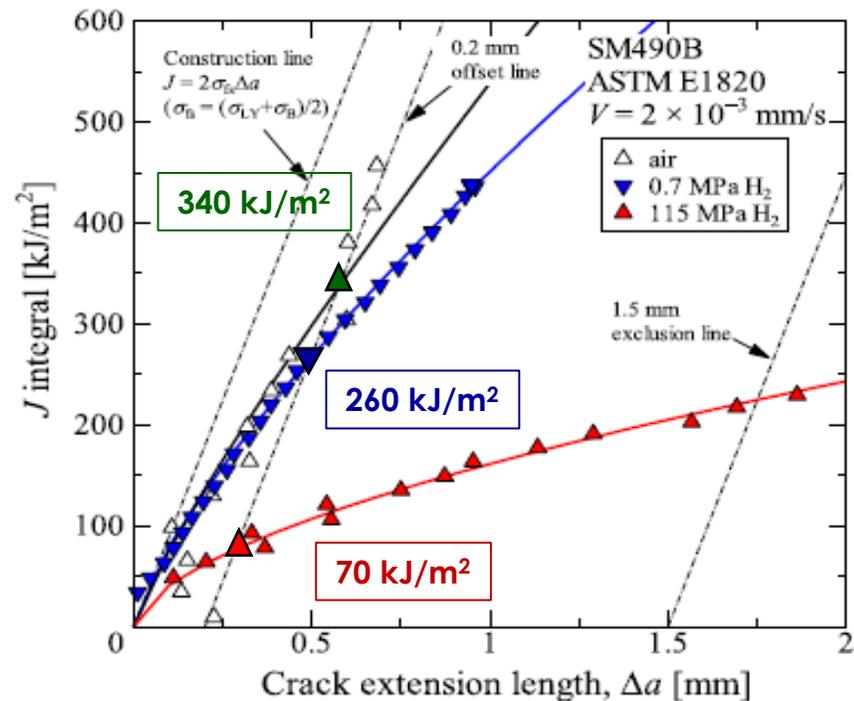
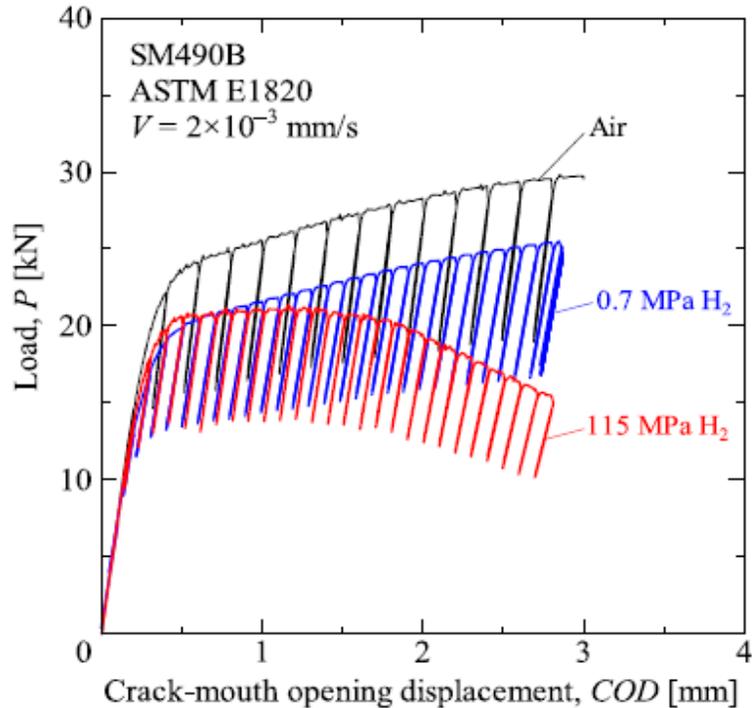


$$S K = S [1.12 P_H (1 + D/2t) \sqrt{\pi a}] / Q(a/c) = K_{Ic}$$



Tenacidad a la fractura

Presión de H₂ = 0.7 y 115 MPa H₂



Probetas compactas, CT,
pre-agrietadas

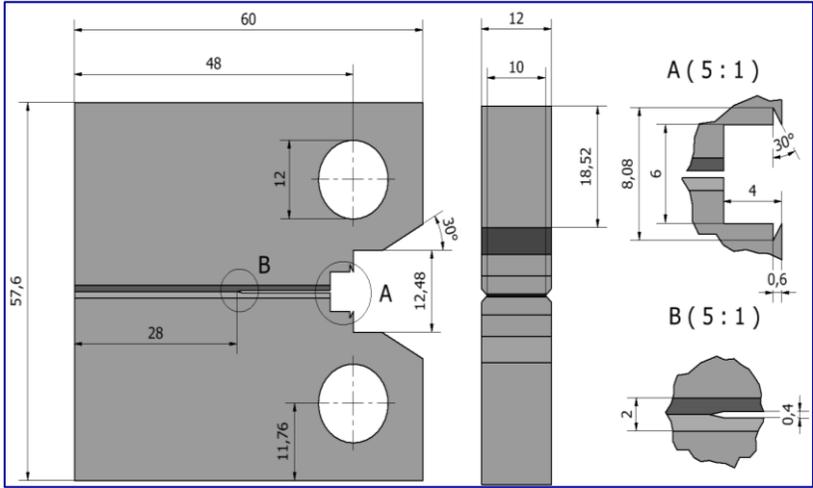
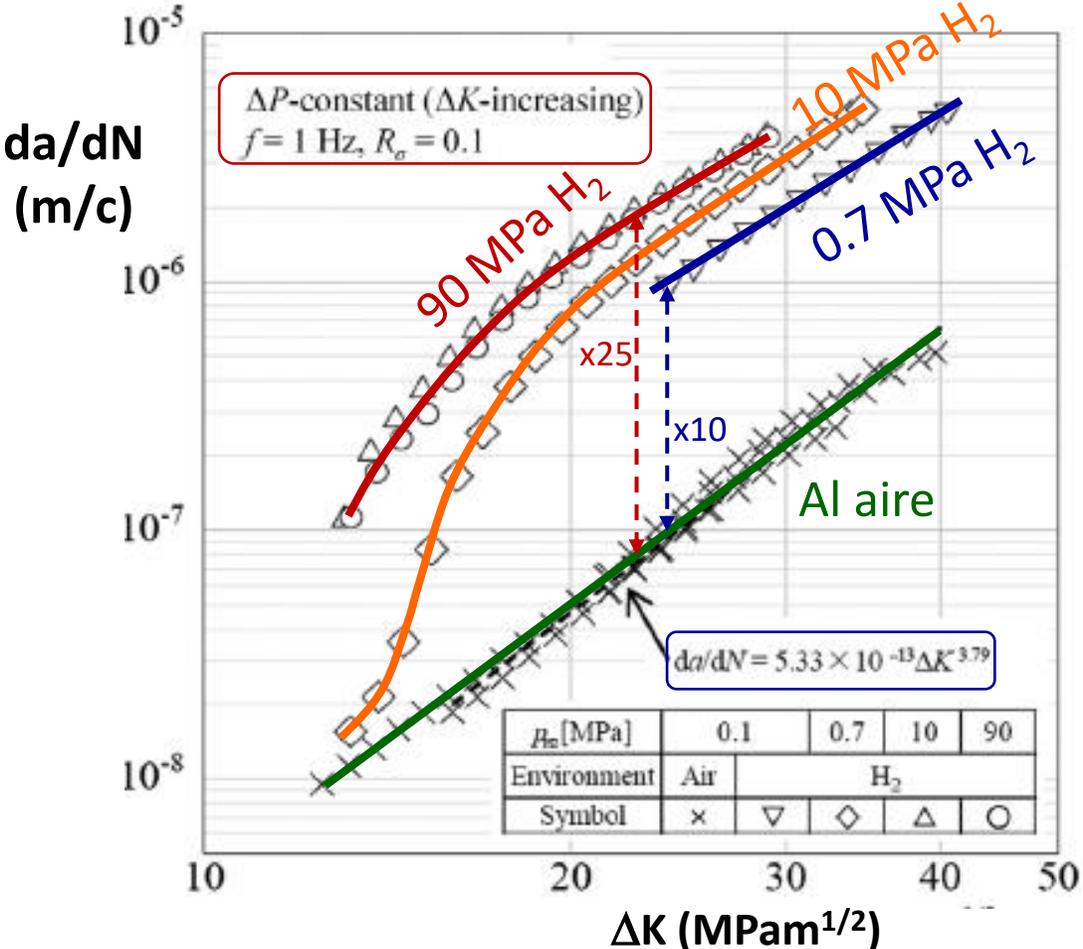
$IF_{J0.2} = 24\%$ (0.7 MPa)

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

Acero al carbono (LC: F+P): 0.16%C-1.43%Mn-0.44%Si
 $\sigma_{ys} = 360$ MPa, $R_t = 540$ MPa, 153 HV

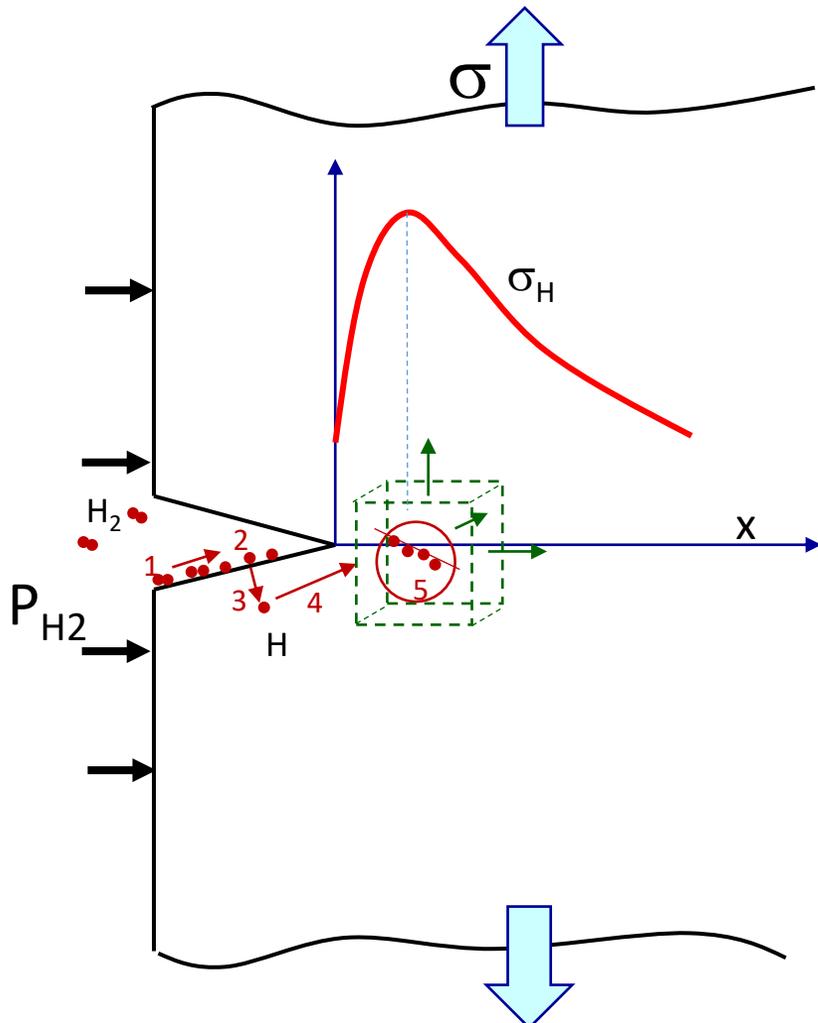
Crecimiento de grieta por fatiga

Acero al carbono, 0.16%C-1.43%Mn ($\sigma_{ys}=360$ MPa)



Fenómeno de fragilización por hidrógeno

Componente con un defecto/grieta, cargado bajo presión de H_2

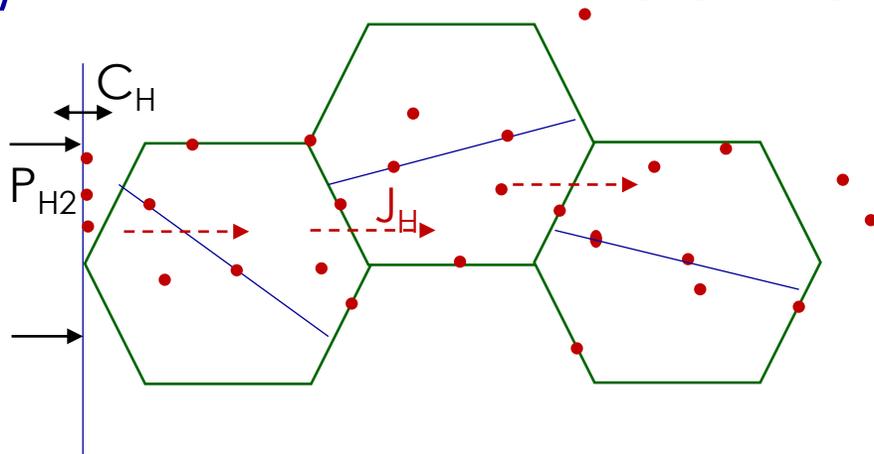


ETAPAS EN LA FRAGILIZACION

1. Adsorción física de la molécula H_2 .
2. Disociación y adsorción de los átomos de H: $H_2 \rightarrow H_{ad} + H_{ad}$
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)

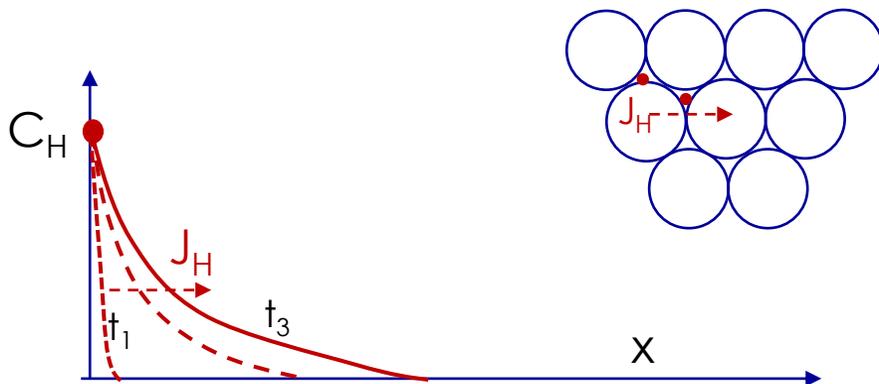
Fenómeno de fragilización por hidrógeno

1) ENTRADA DEL HIDRÓGENO



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

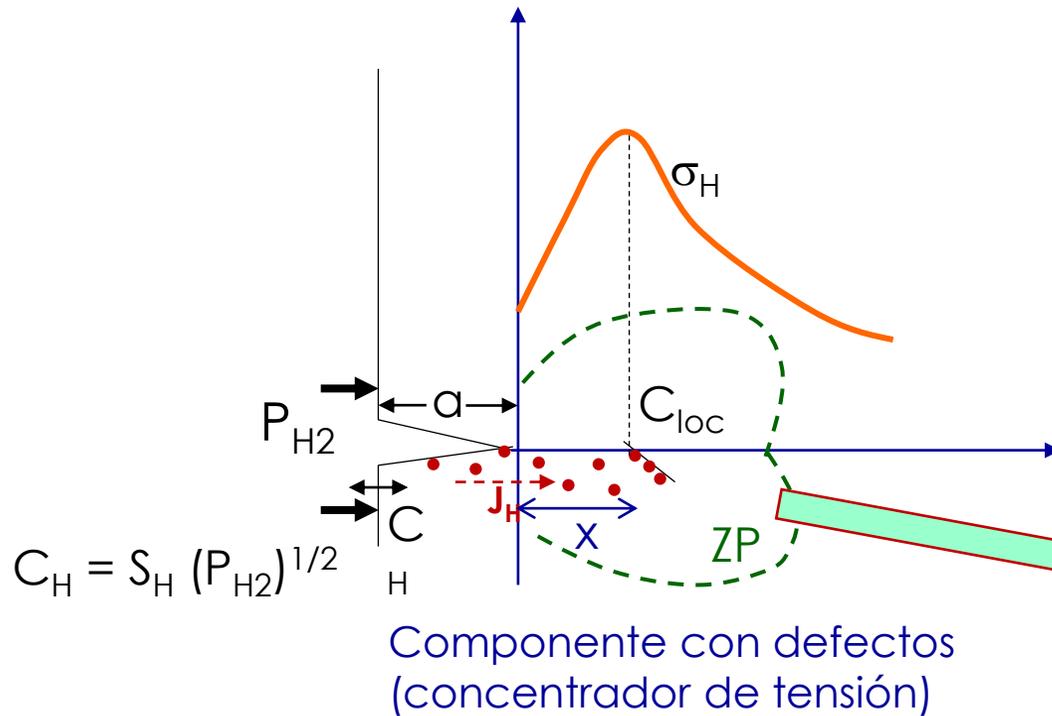
2) DIFUSIÓN DEL HIDRÓGENO



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

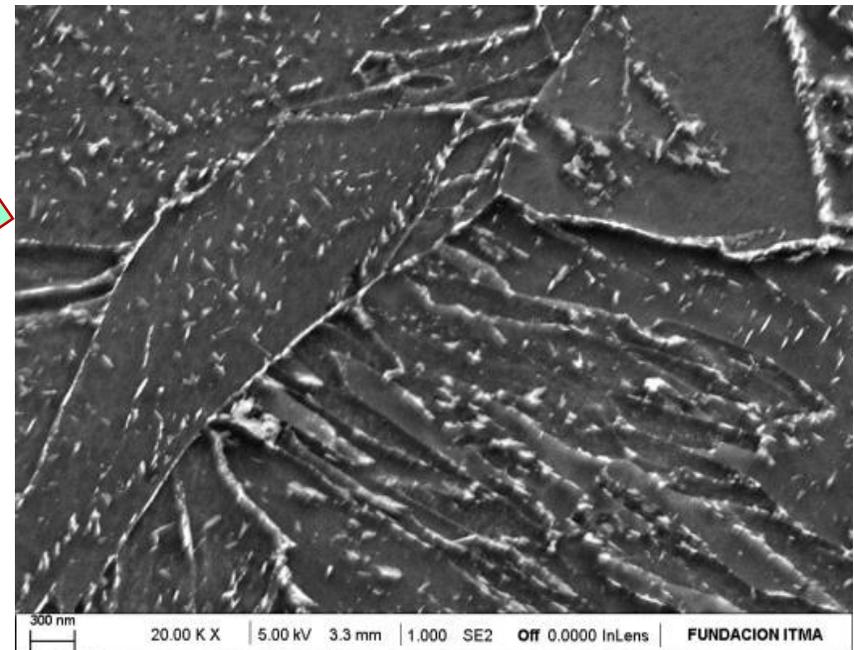
$$H_{int} \leftrightarrow H_{JG} \leftrightarrow H_{II}$$

Fenómeno de fragilización por hidrógeno



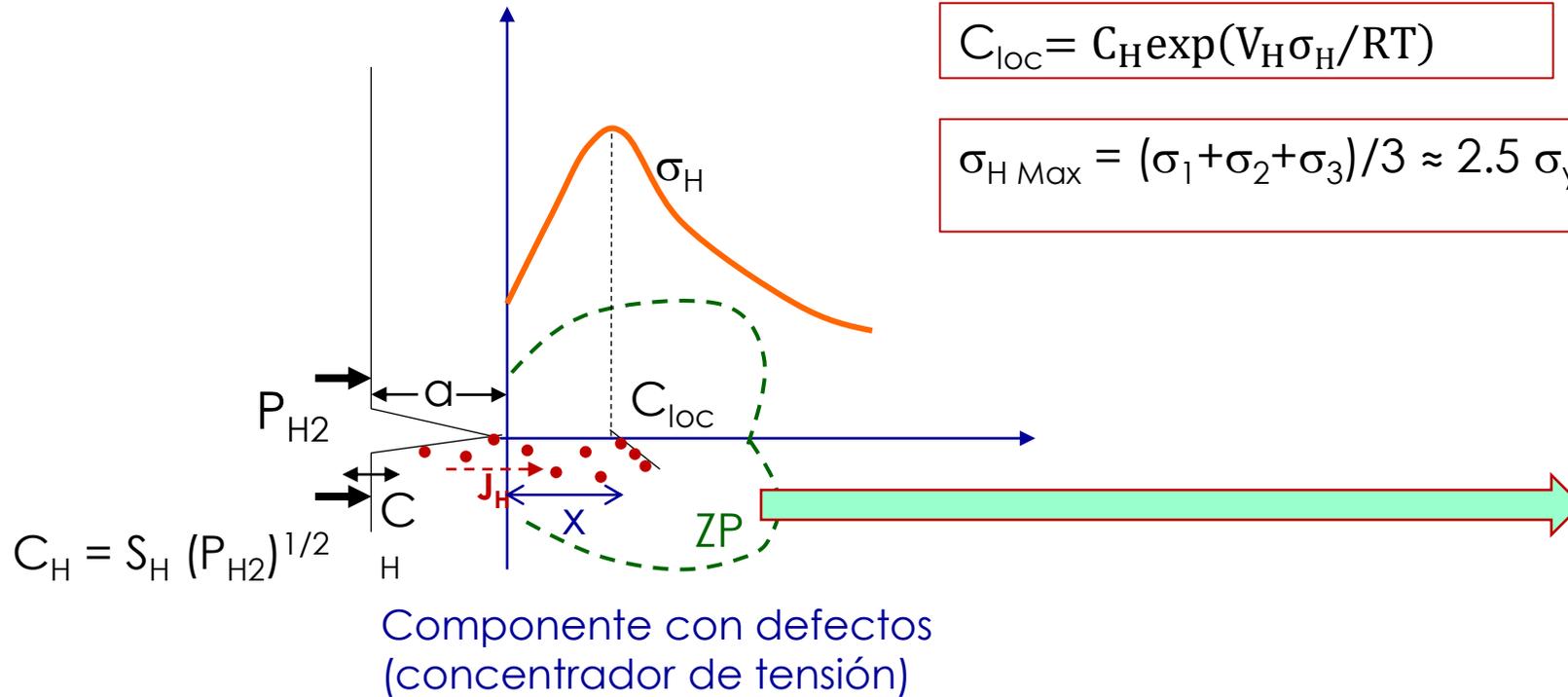
$$C_{loc} = C_H \exp(V_H \sigma_H / RT)$$

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

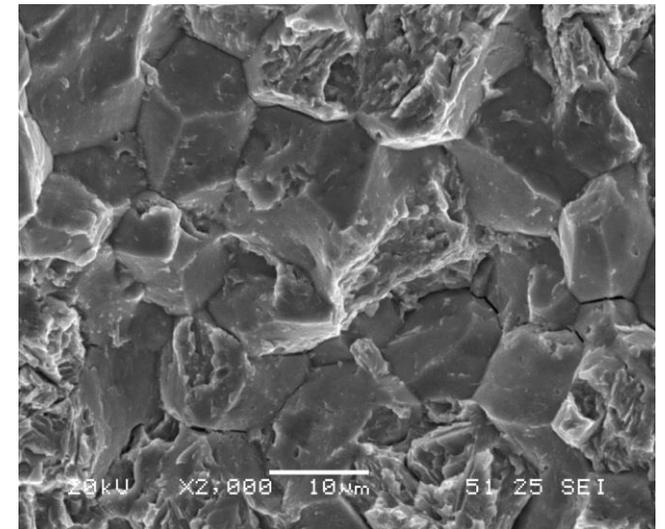
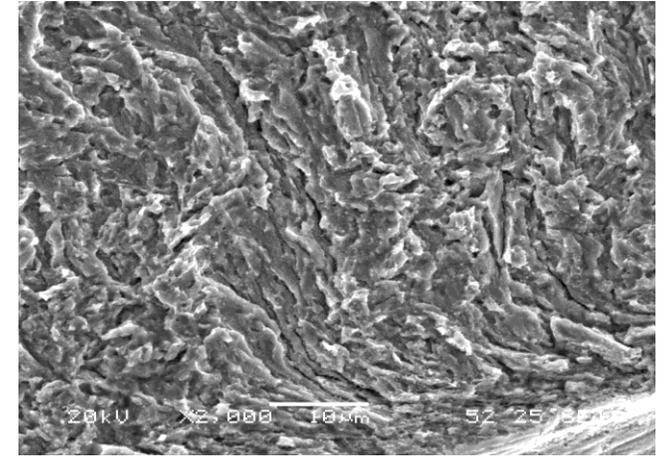


- Acumulaciones de H en las regiones de máxima triaxialidad, σ_H , y descohesión de las intercaras internas.
- Influencia de la resistencia del acero.

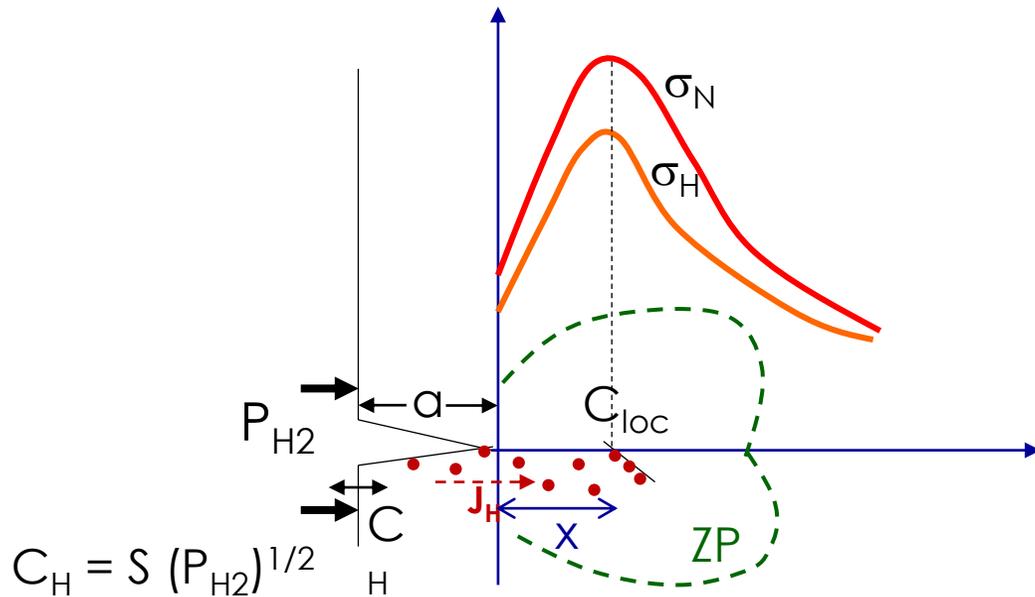
Fenómeno de fragilización por hidrógeno



- Acumulaciones de H en las regiones de máxima triaxialidad, σ_H , y descohesión de las intercaras internas.
- Influencia de la resistencia del acero.



Fenómeno de fragilización por hidrógeno



Componente con defectos
(concentrador de tensión)

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

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

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

- Acumulaciones de H en las regiones de máxima triaxialidad, σ_H , y descohesión de las intercaras internas.
- Influencia del tiempo (frecuencia).

ACEROS	D_H (m ² /s)	Tiempo, x = 0.1 mm
S355 (α+p)	10^{-9}	10 s
42CrMo4 (T+R)	10^{-10}	100 s
Dúplex (α / γ)	$6 \cdot 10^{-14}$	46 h
Austenítico (γ)	$3 \cdot 10^{-16}$	386 d

- La entrada de hidrógeno no modifica apenas el límite elástico de los aceros, pero disminuye mucho la tenacidad a la fractura y aumenta también mucho la velocidad de crecimiento de grieta por fatiga.
- Los efectos negativos del hidrógeno aumentan con la resistencia mecánica del acero.
- La fragilización por hidrógeno está controlada por la solubilidad del hidrógeno, por el coeficiente de difusión del hidrógeno en el acero y por las acumulaciones locales que tienen lugar en regiones microestructurales específicas.



FUNDAMENTOS DE LA FRAGILIZACIÓN DE COMPONENTES DE ACERO SOMETIDOS A PRESIÓN DE HIDRÓGENO

Javier Belzunce Varela

belzunce@uniovi.es

