



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

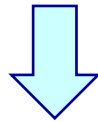
Javier Belzunce Varela

belzunce@uniovi.es

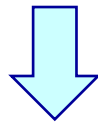


# Manejo de hidrógeno a presión

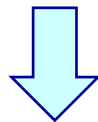
. Construcción de tanques de almacenamiento y tuberías para el transporte de hidrógeno a presión y de todos los componentes necesarios (compresores, válvulas, registros, ...)



. 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)**



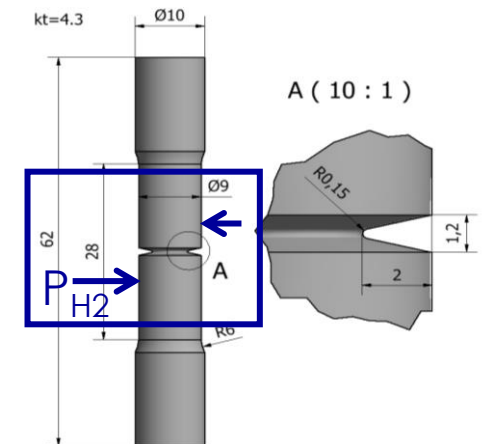
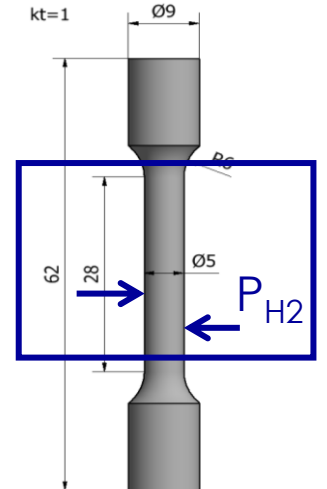
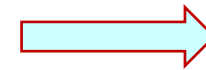
# Compatibilidad de los materiales en contacto con H<sub>2</sub> a presión

## ENSAYO DE TRACCION UTILIZANDO PROBETAS LISAS O ENTALLADAS BAJO P<sub>H2</sub> (ASTM G142)

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

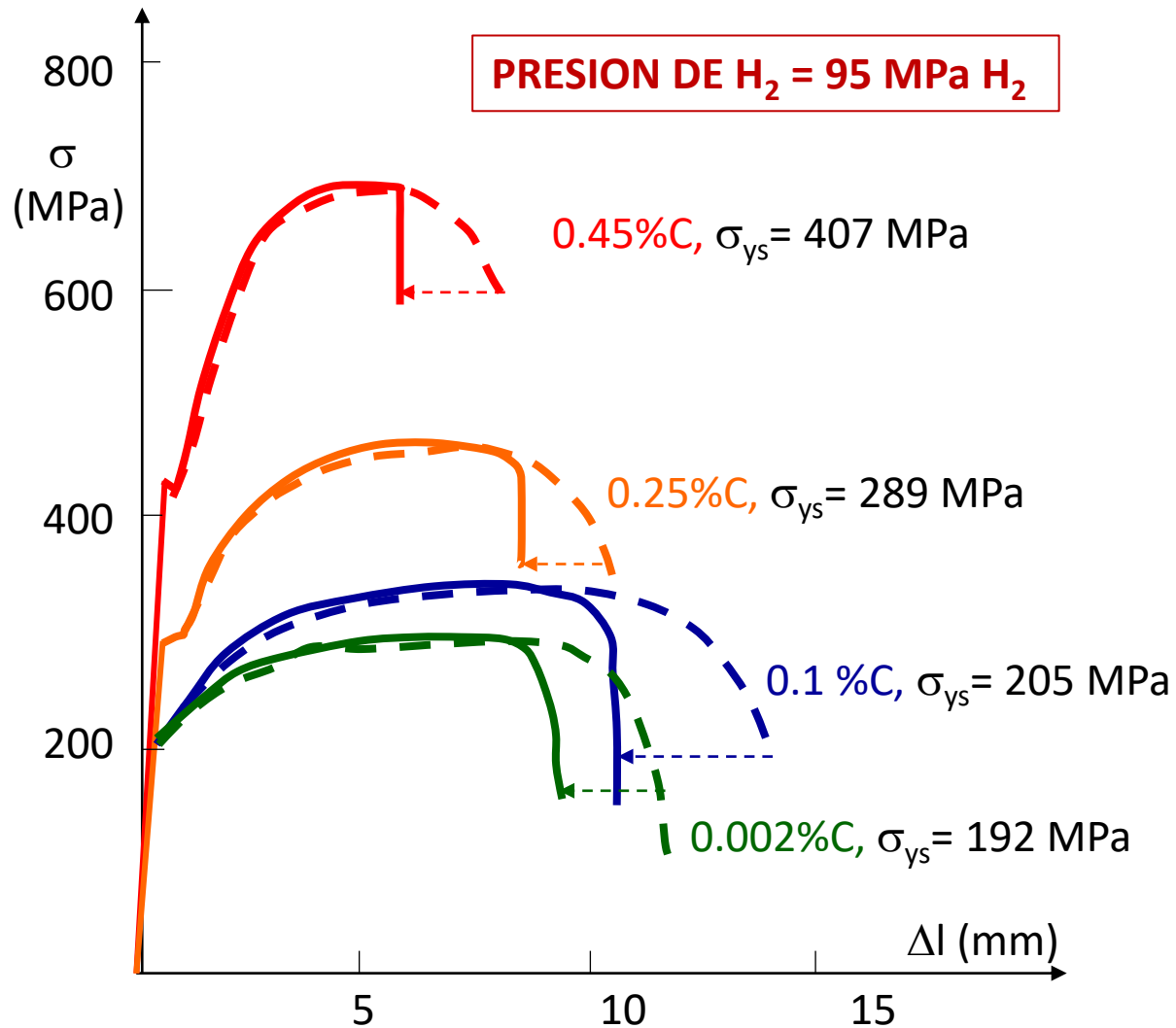
Resistencia tracción entallada:  $IF_{TE} (\%) = 100 (TE_{AIRE} - TE_H) / TE_{AIRE}$

0 < IF < 100



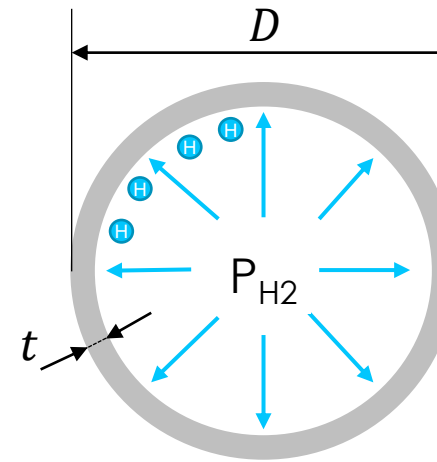
IF (%)	CARACTERISTICAS	EJEMPLO DE ALEACIONES
$IF_{RA} < 10$ o $IF_{TE} < 10$	Plenamente compatibles con hidrógeno a presión	Aleaciones de aluminio y aceros inoxidables austeníticos
$10 < IF_{TE} < 50$	Muestran ya una fragilización significativa	La mayoría de los aceros estructurales de baja/media resistencia
$IF_{TE} > 50$	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 H<sub>2</sub>



C %	$\sigma_{ys}$ (MPa)	IF <sub>RA</sub> (%)
0.002	192	32
0.1	205	40
0.25	289	49
0.45	407	56

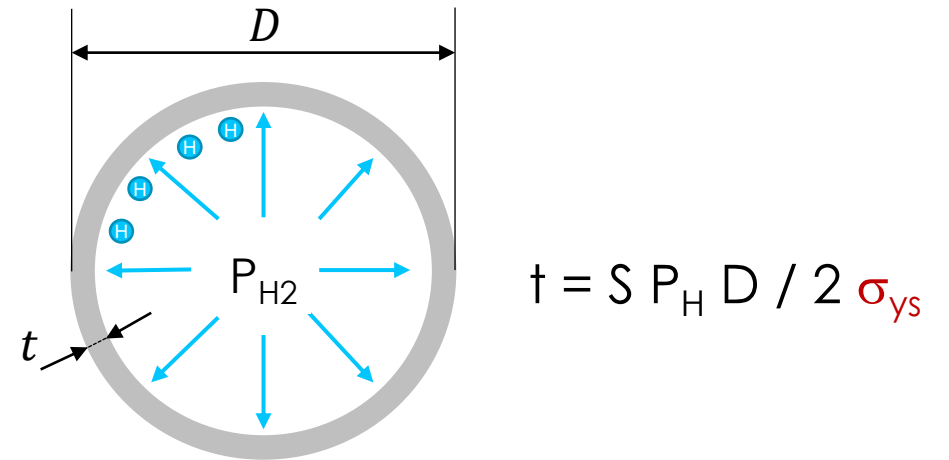
# DEPOSITOS, GASODUCTOS



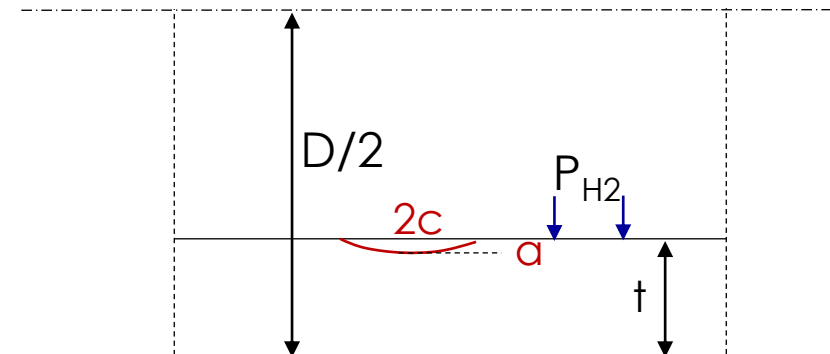
$$t = S P_H D / 2 \sigma_{ys}$$



# DEPOSITOS, GASODUCTOS

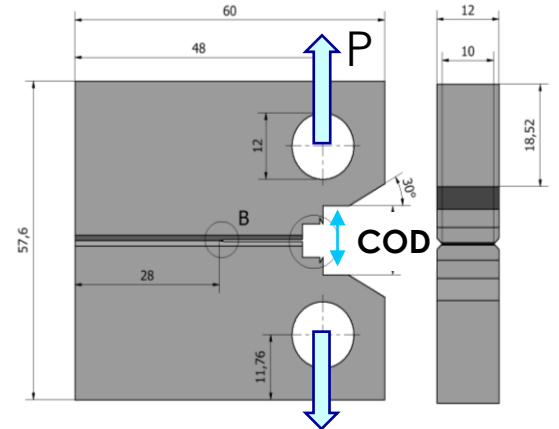
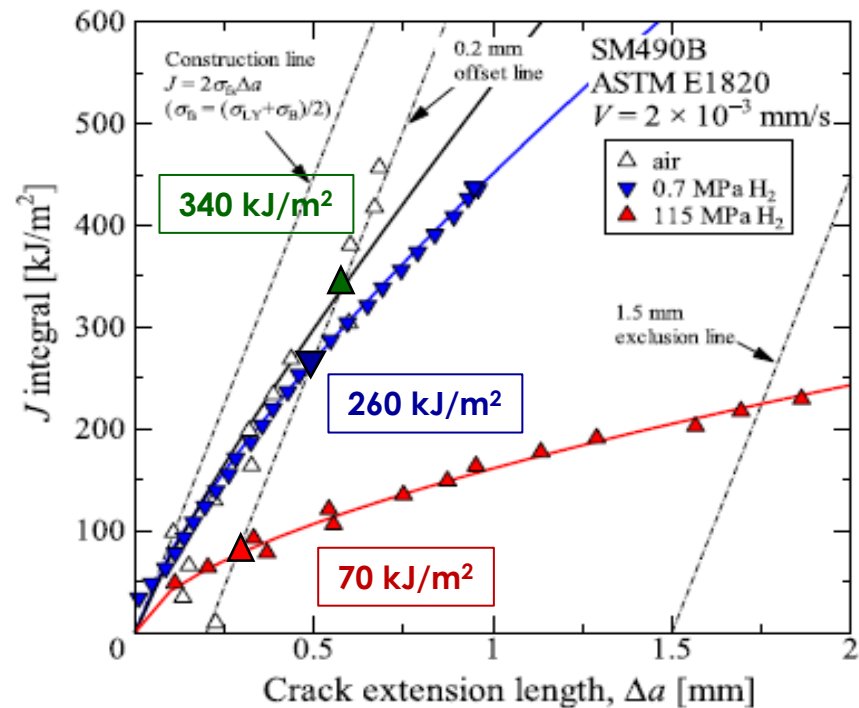
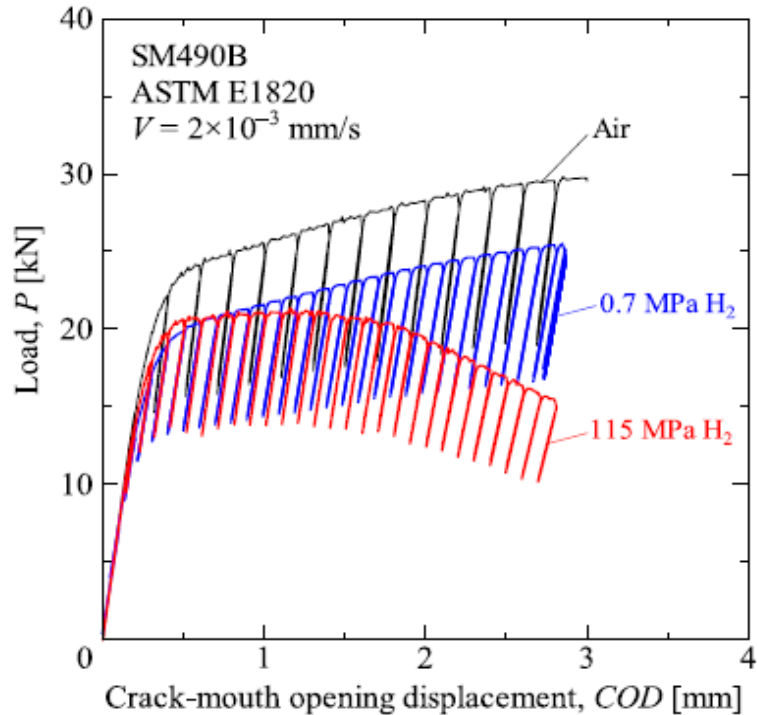


$$S K = S [1.12 P_H (1 + D/2t) \sqrt{\pi a}] / Q(a/c) = K_{Ic}$$



# Tenacidad a la fractura

Presión de H<sub>2</sub> = 0.7 y 115 MPa H<sub>2</sub>



Probetas compactas, CT,  
pre-agrietadas

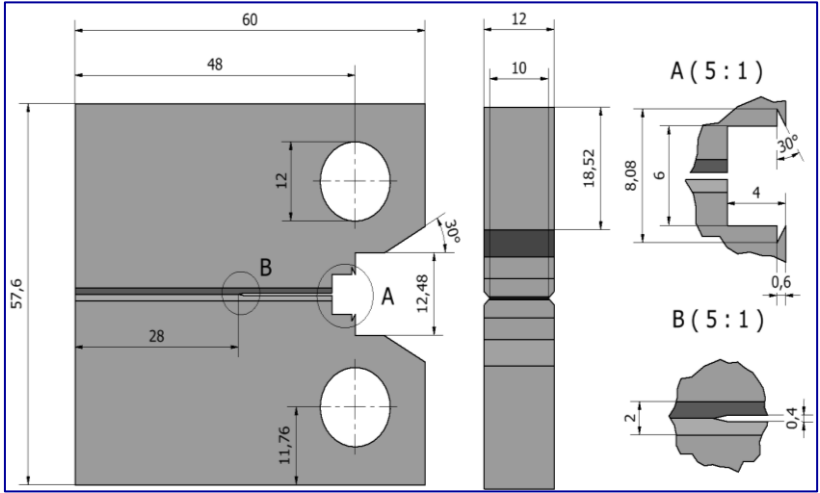
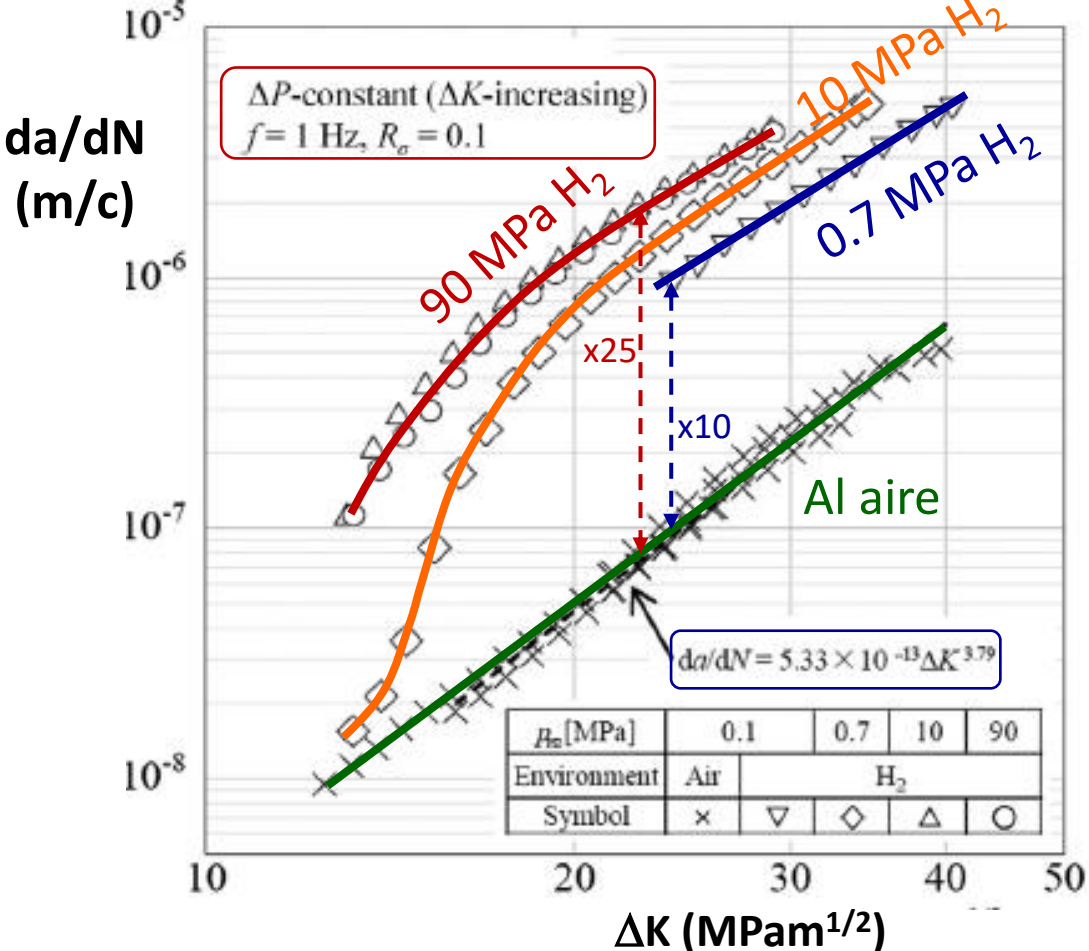
$IF_{J0.2} = 24\%$  (0.7 MPa)

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

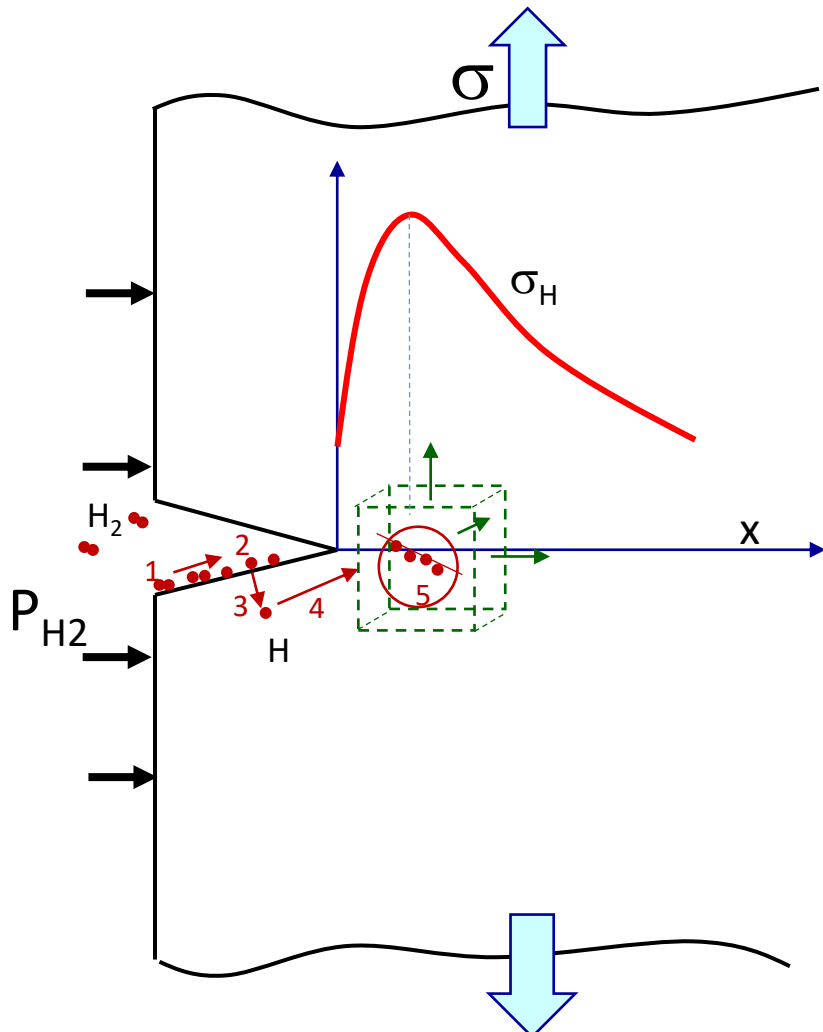
Acero al carbono, 0.16%C-1.43%Mn ( $\sigma_{ys}=360$  MPa)





# Fenómeno de fragilización por hidrógeno

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

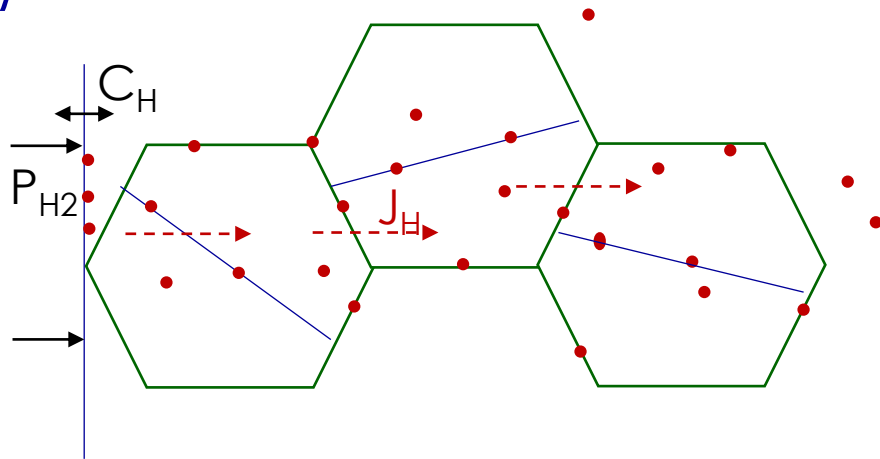


## ETAPAS EN LA FRAGILIZACION

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.  $\sigma_H$ ).
5. Mecanismo de fragilización local (descohesión intercaras internas)

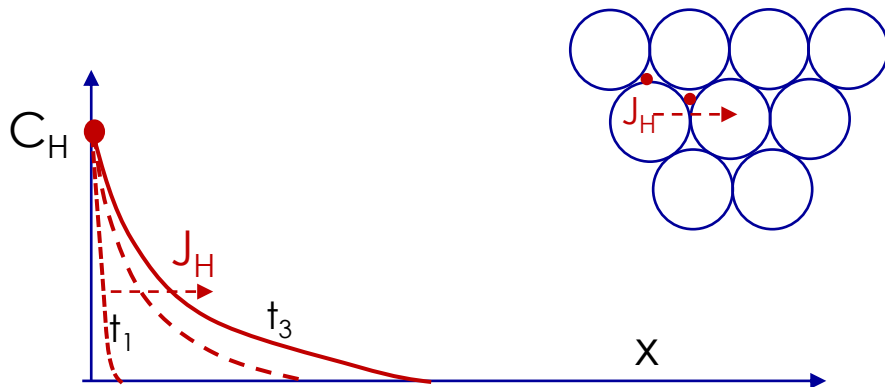
# Fenómeno de fragilización por hidrógeno

## 1) ENTRADA DEL HIDRÓGENO



Ley de Sievert:  $C_H = S_H (P_{H2})^{1/2}$

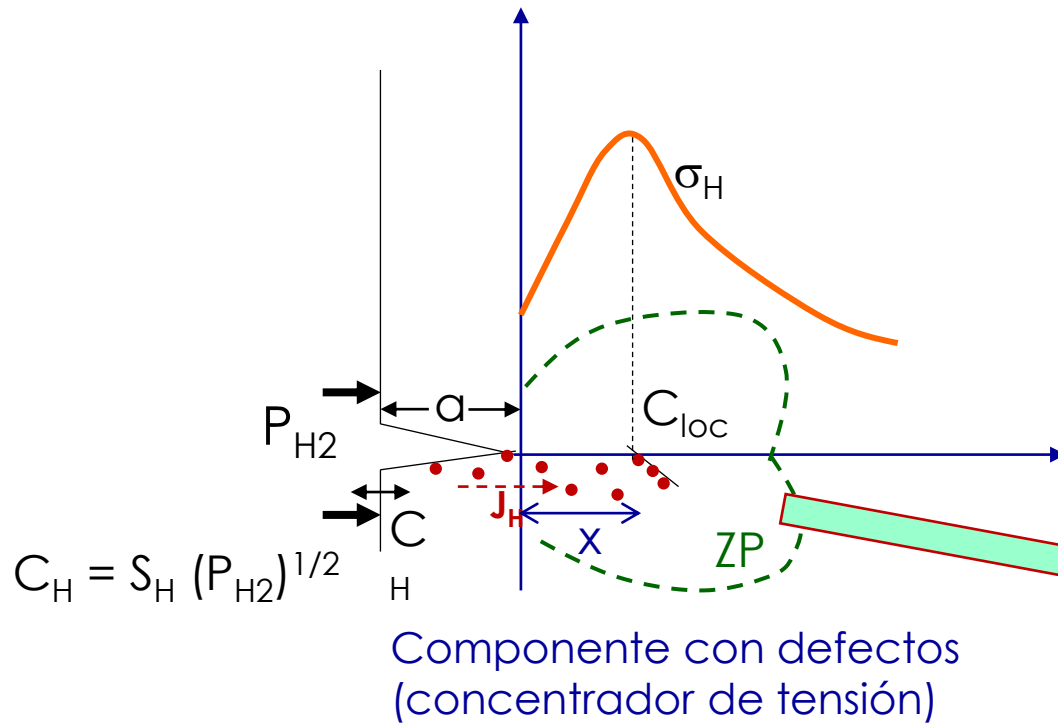
## 2) DIFUSIÓN DEL HIDRÓGENO



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

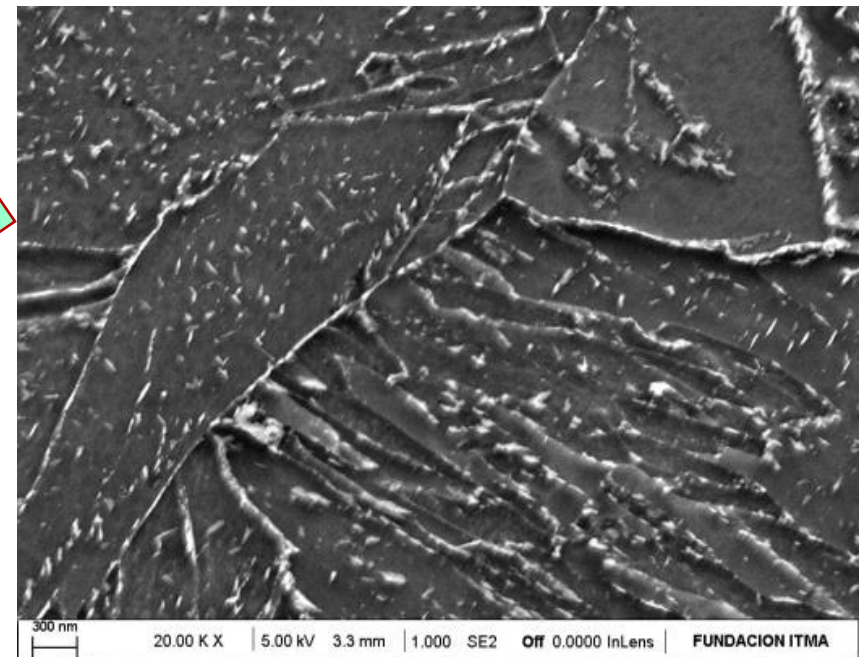
$$H_{int} \leftrightarrow H_{JG} \leftrightarrow H_{II}$$

# Fenómeno de fragilización por hidrógeno



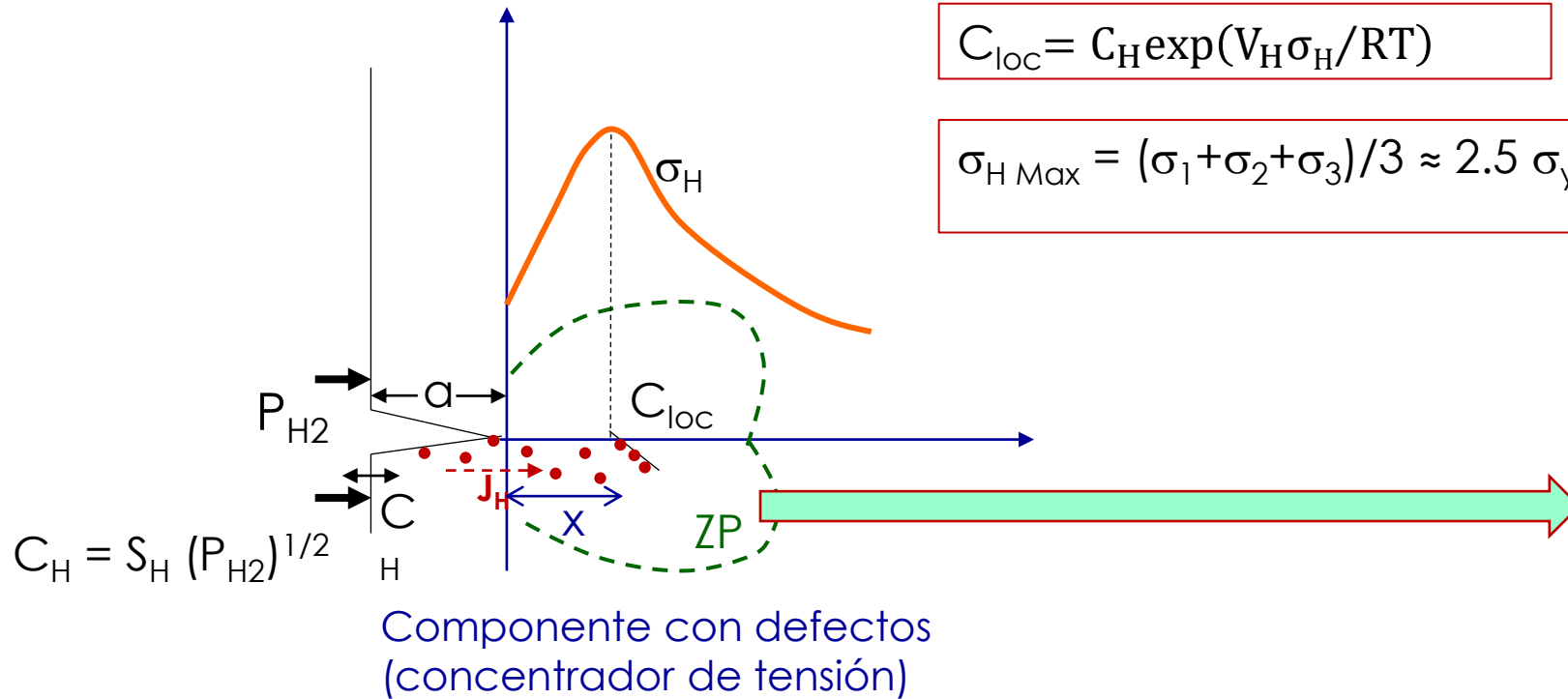
$$C_{loc} = C_H \exp(V_H \sigma_H / RT)$$

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

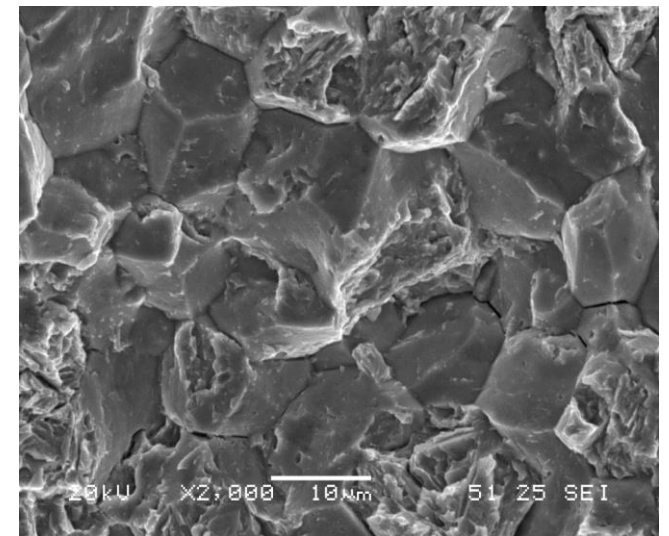
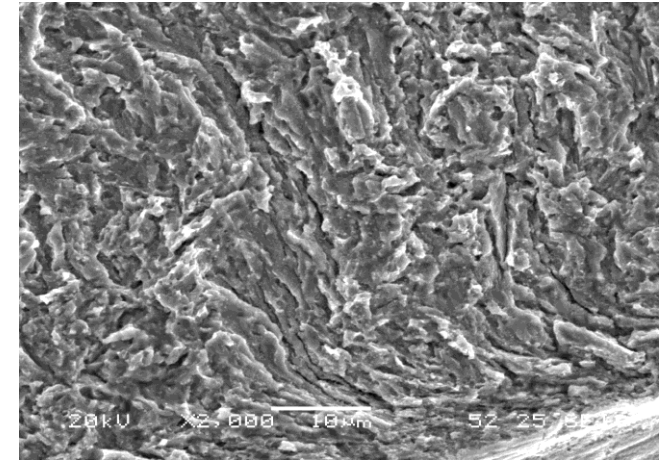


- Acumulaciones de H en las regiones de máxima triaxialidad,  $\sigma_H$ , y descohesión de las intercaras internas.
- Influencia de la resistencia del acero.

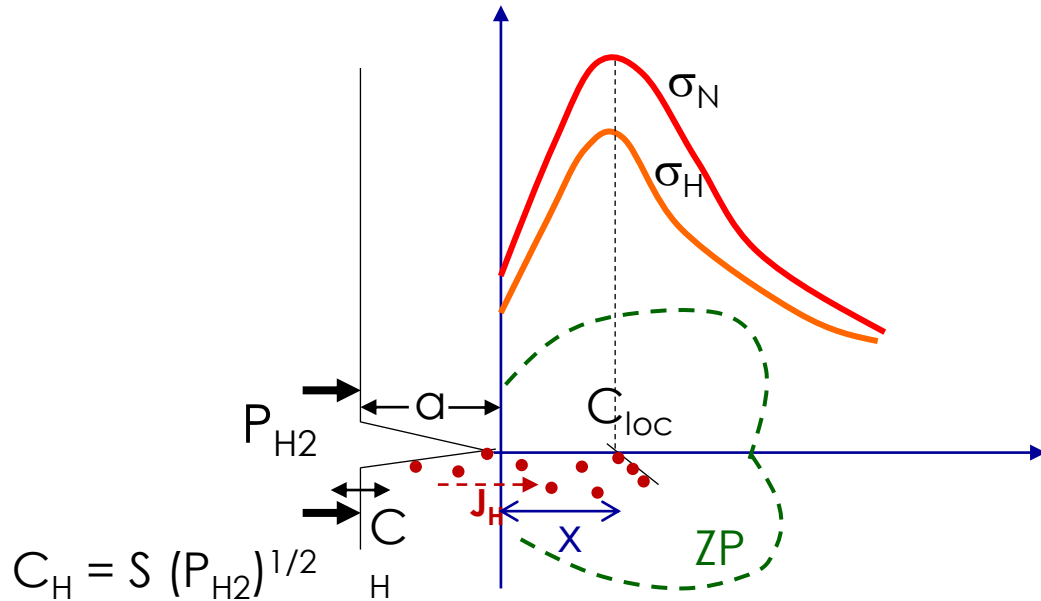
# Fenómeno de fragilización por hidrógeno



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

ACEROS	$D_H$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Tiempo, $x = 0.1$ mm
<b>S355 (<math>\alpha+p</math>)</b>	$10^{-9}$	10 s
<b>42CrMo4 (T+R)</b>	$10^{-10}$	100 s
<b>Dúplex (<math>\alpha/\gamma</math>)</b>	$6 \cdot 10^{-14}$	46 h
<b>Austenítico (<math>\gamma</math>)</b>	$3 \cdot 10^{-16}$	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

