

# Caracterización de Materiales

## Tema 6. Caracterización en fractura



**Isidro Carrascal Vaquero**  
**Soraya Diego Cavia**  
**José Antonio Casado del Prado**  
**Diego Ferreño Blanco**  
**Jesús Setién Marquínez**

DPTO. DE CIENCIA E INGENIERÍA  
DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



**ÍNDICE:**

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2 ESTADO TENSIONAL EN EL FRENTE DE UN DEFECTO**
- 3 CÁLCULO CLÁSICO VS. CÁLCULO EN FRACTURA**
- 4 FRACTURA DESDE UN PUNTO DE VISTA ATÓMICO**
- 5 CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL)**
- 6 CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD A F.E.LINEAL**
- 7 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TENACIDAD**
- 8 LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)**
- 9 CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD A F.E. PLÁSTICA**
- 10 MICROMEKANISMOS DE FRACTURA**
- 11 LOS DIAGRAMAS DE FALLO**

## 1. INTRODUCCIÓN

### ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE LA MECÁNICA DE FRACTURA?

- ¡Porque las cosas se rompen! (y, en principio, nadie desea que eso suceda).
- Se ha estimado que los costes asociados con la rotura de componentes y estructuras en los EEUU suponen un **4% del su PIB**.
- Nuestro conocimiento relativo a los procesos de fractura ha avanzado notablemente desde la II Guerra Mundial y, particularmente, desde mediados de los años 70.

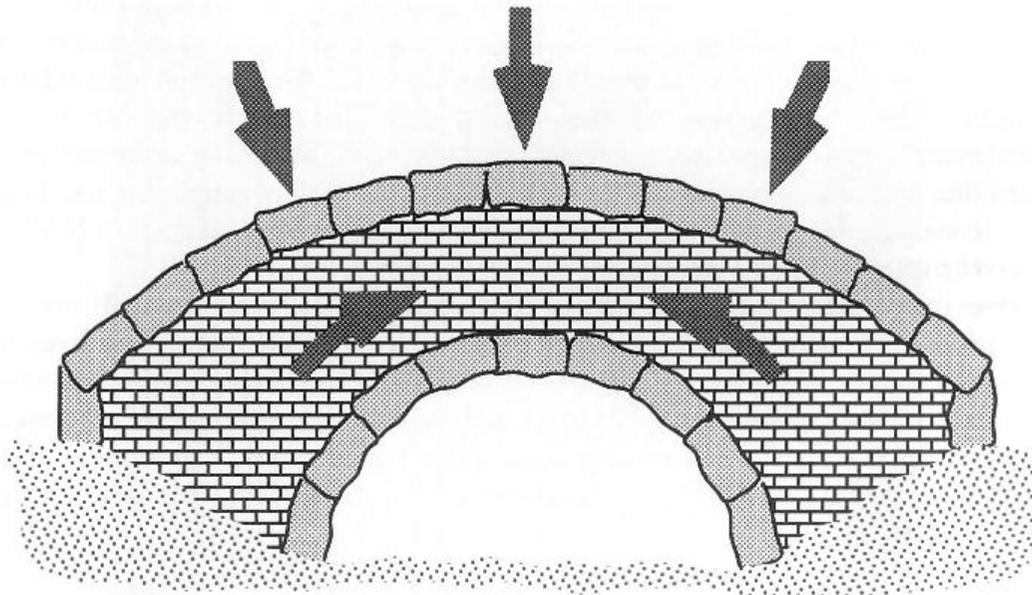
### ¿POR QUÉ SE ROMPEN LAS ESTRUCTURAS / COMPONENTES?

- Negligencia** durante el diseño, la construcción o las condiciones de operación.
  - Aplicación de un **nuevo diseño**, de una nueva técnica de fabricación o de un nuevo material que produce un resultado inesperado (e indeseado).
- El estado de conocimiento presente puede afrontar con solvencia la situación a) y ayudar frente a la situación b).

## 1. INTRODUCCIÓN

### PERSPECTIVA HISTÓRICA:

- Materiales **pétreos**: riesgo de rotura en estructuras sometidas a tracción / flexión.
- Solución: búsqueda de estados compresivos (**antifunicularidad**).
- Los metales (en particular el **acero**, protagonista desde la revolución industrial) poseen buena resistencia frente a tracción, luego debieran estar protegidos frente a la fractura, sin embargo...



## 1. INTRODUCCIÓN

### LIBERTY SHIPS (1943):

- En los comienzos de la II Guerra Mundial, la armada alemana hundía cargueros británicos tres veces más rápido que lo que éstos eran capaces de construirlos.
- EEUU colaboró con Gran Bretaña suministrando los cargueros Liberty. A diferencia de los barcos tradicionales, fabricados mediante chapas roblonadas, los Liberty eran estructuras monolíticas completamente soldadas.



## 1. INTRODUCCIÓN

### LIBERTY SHIPS (1943):

- Todo funcionaba bien hasta diciembre de 1943, cuando un barco Liberty navegaba entre Siberia y Alaska....
- De 2700 barcos, 400 experimentaron fracturas de diversa índole, 90 de ellas muy serias. 20 de los barcos se partieron por la mitad espontáneamente.
- Todo ello debido a una “ligera” modificación en el proceso de fabricación.
- **CAUSAS:** soldadura frágil, con presencia de defectos. Efecto fragilizante de las bajas temperaturas.



## 1. INTRODUCCIÓN

### ACCIDENTE DEL VUELO B-737 DE ALOHA AIRLINES (1988):

- Desprendimiento parcial del fuselaje en pleno vuelo.
- Desaparición de una de las azafatas.
- **CAUSAS:** procesos de **fatiga** que condujeron a la **fractura** en una zona de **unión del fuselaje**.



## 1. INTRODUCCIÓN

### ACCIDENTE DEL PRESTIGE (2002):

- Vertido de 77000 Tm de fuel.
- **CAUSAS**: Acumulación del daño debido a **fatiga térmica y mecánica** que condujo a la fractura total del buque (Comisión Permanente de Investigación de Siniestros Marítimos).



## 1. INTRODUCCIÓN

### ACCIDENTE DEL CHALLENGER (1986):

- Muerte de los 7 tripulantes. Paralización del Programa Espacial.
- **CAUSAS**: mal funcionamiento de los anillos O debido a las bajas temperaturas en el momento del lanzamiento (Comisión Rogers).
- El vuelo había sido retrasado hasta en 7 ocasiones, debido a las bajas temperaturas.
- Según Feynman, las previsiones de fiabilidad de la NASA se alejaban a veces hasta un factor mil de lo que estimaban los ingenieros.
- *“Para una gestión exitosa, la realidad debe estar por delante de las relaciones públicas porque a la naturaleza no se la puede engañar”.*
- Feynman también hizo una demostración en televisión de la fragilización térmica de los anillos O...



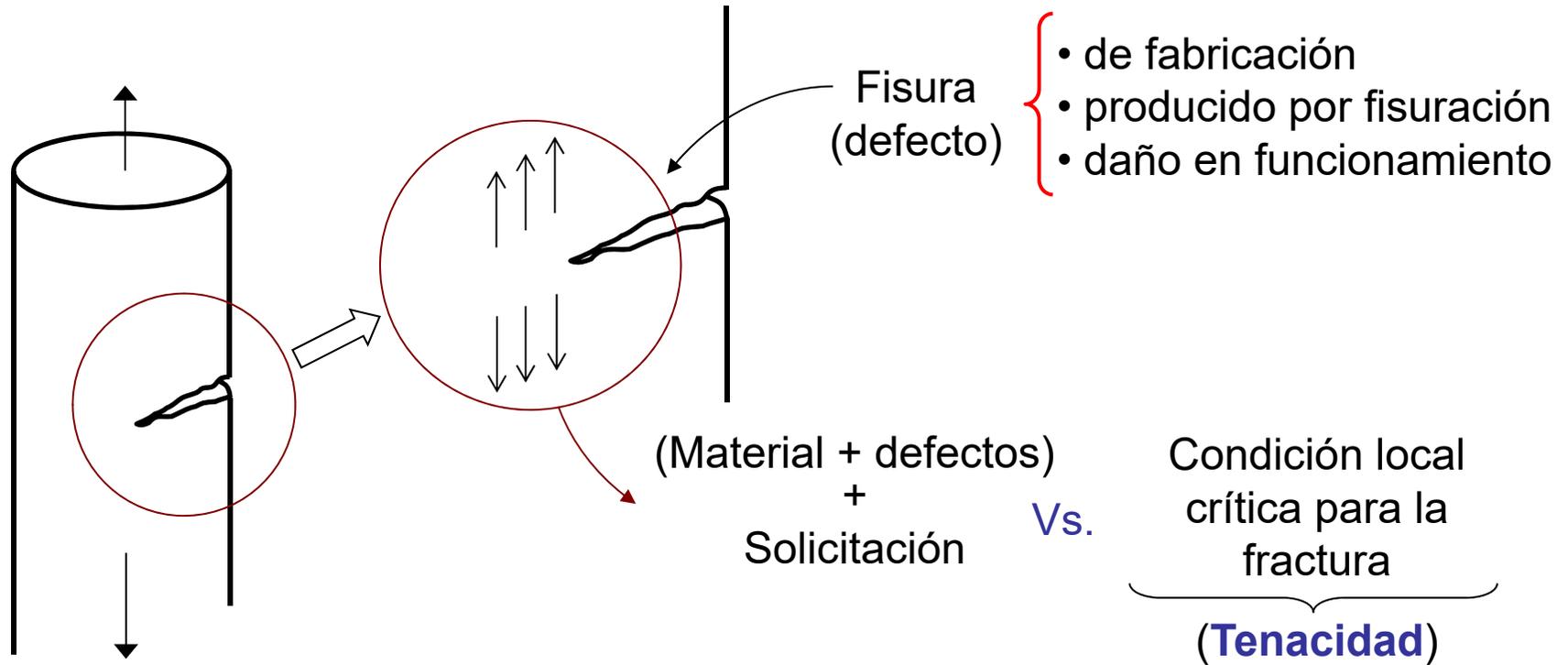
## 1. INTRODUCCIÓN

### IDEAS CLAVE DE LA MECÁNICA DE FRACTURA:

- La rotura final (FRACTURA) de los materiales (o de los componentes estructurales) está asociada a la presencia de **defectos** sometidos a un estado tensional local (proveniente de la sollicitación externa).
- Se produce cuando el binomio (**Defecto + Estado tensional local**) alcanza una condición crítica que depende del material (**Tenacidad a fractura**).

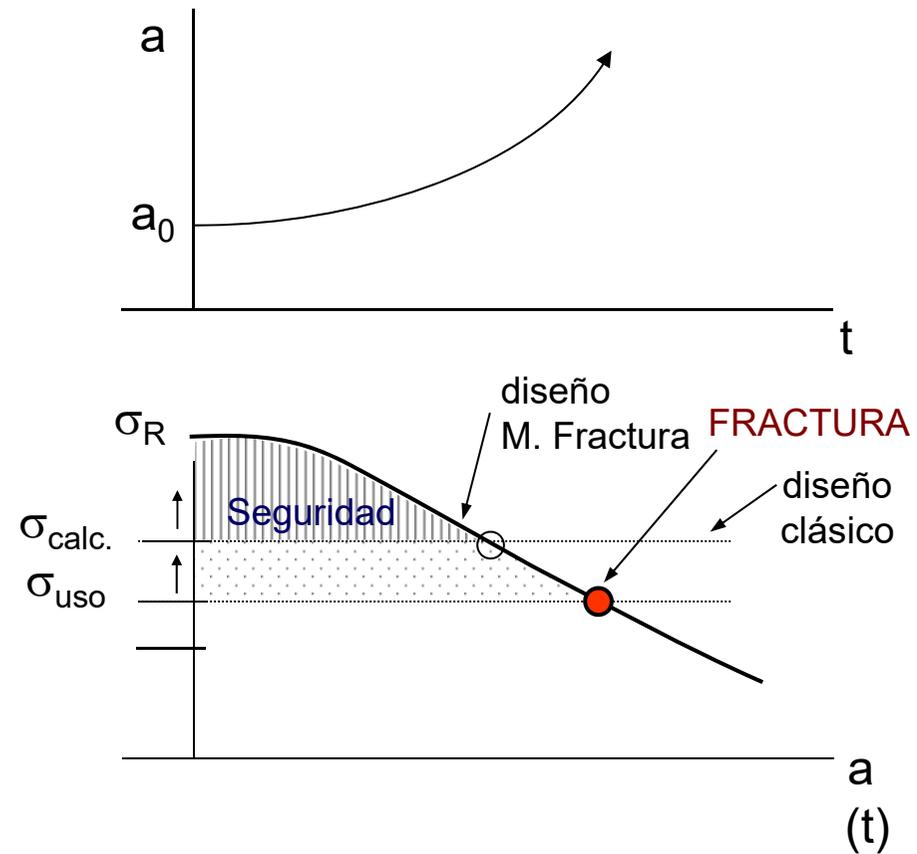
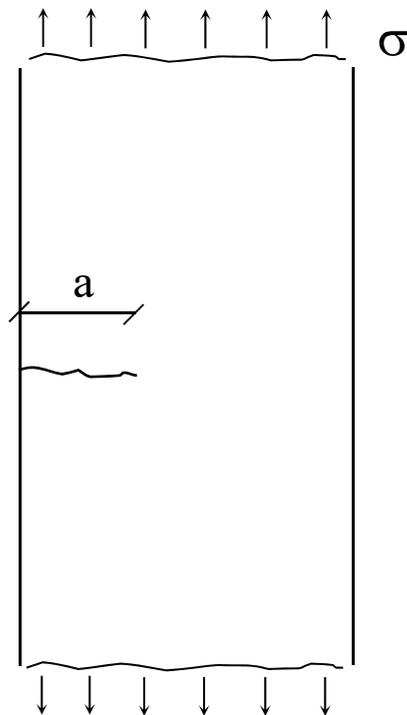
## 1. INTRODUCCIÓN

### IDEAS CLAVE DE LA MECÁNICA DE FRACTURA:



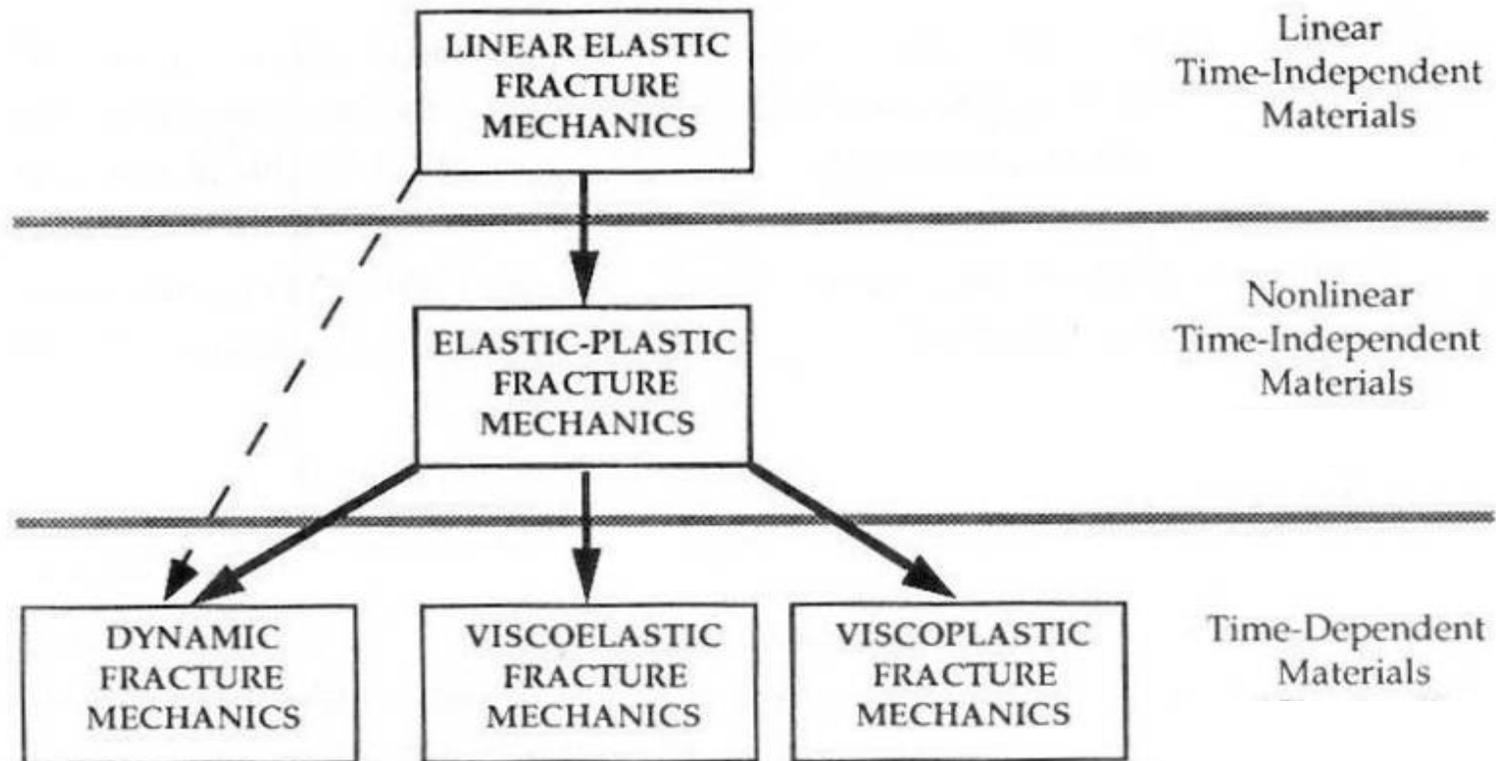
## 1. INTRODUCCIÓN

### IDEAS CLAVE DE LA MECÁNICA DE FRACTURA:



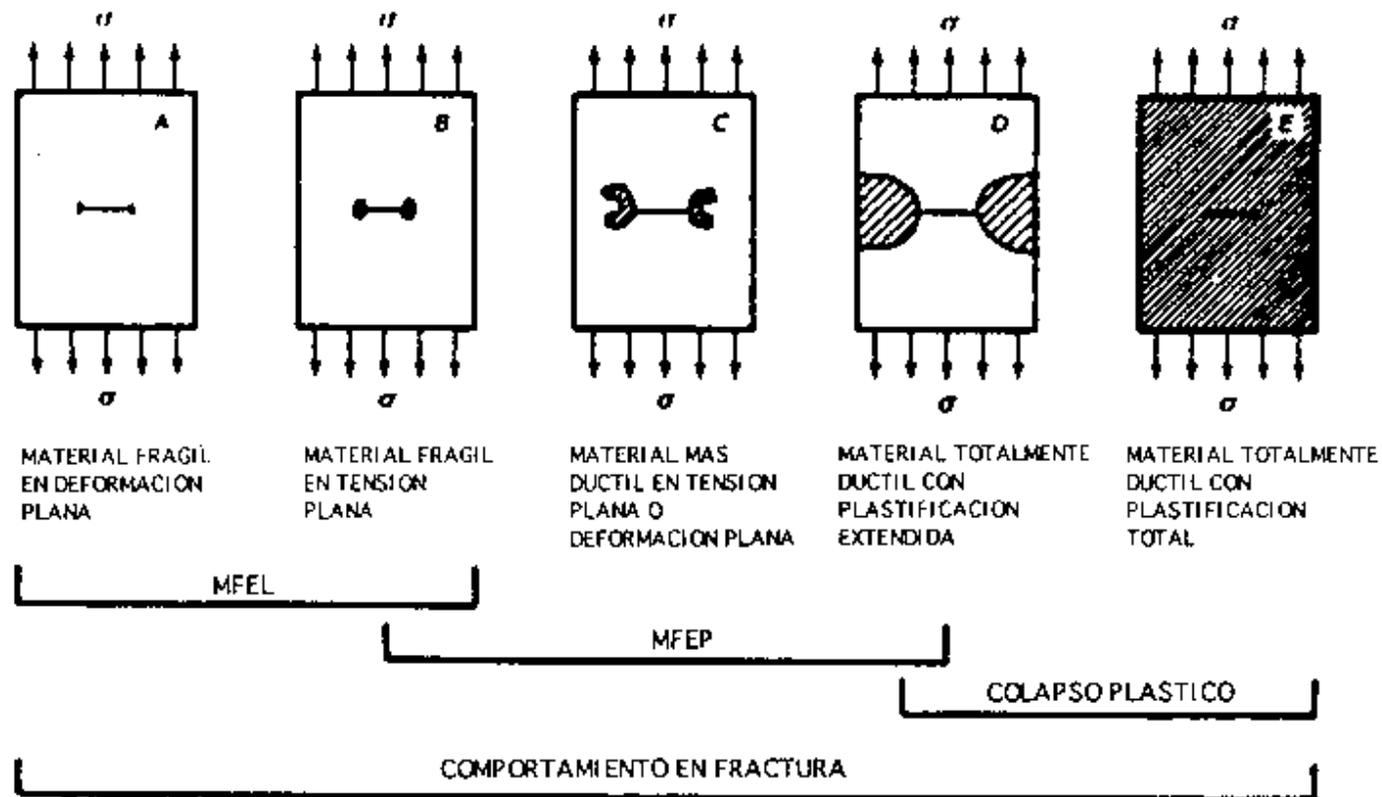
## 1. INTRODUCCIÓN

### ESTRUCTURA DE LA MECÁNICA DE FRACTURA:



## 1. INTRODUCCIÓN

### Tipos de comportamiento en fractura



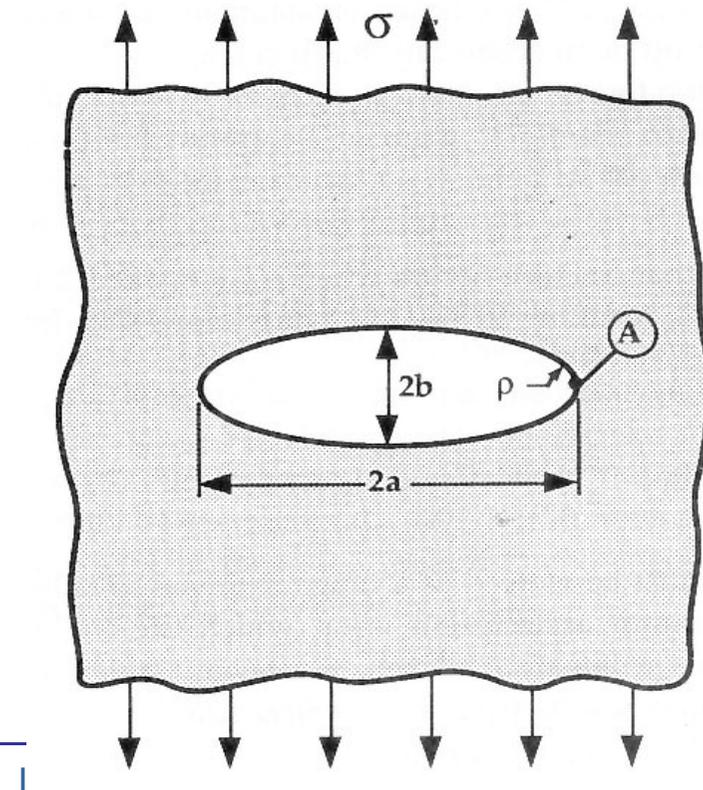
## 2. ESTADO TENSIONAL EN EL FRENTE DE UN DEFECTO

- La fractura es consecuencia del efecto concentrador de tensiones producido por discontinuidades del medio continuo (“defectos”).
- **Ejemplo:** rotura de un folio con una pequeña fisura.
- **Inglis (1913)** estudió el efecto de concentración de tensiones de un taladro elíptico en una placa plana infinita, en **régimen elástico lineal**.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_A &= \sigma \left( 1 + \frac{2a}{b} \right) \\ \rho &= \frac{b^2}{a} \end{aligned} \right\} \sigma_A = \sigma \left( 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \Rightarrow$$

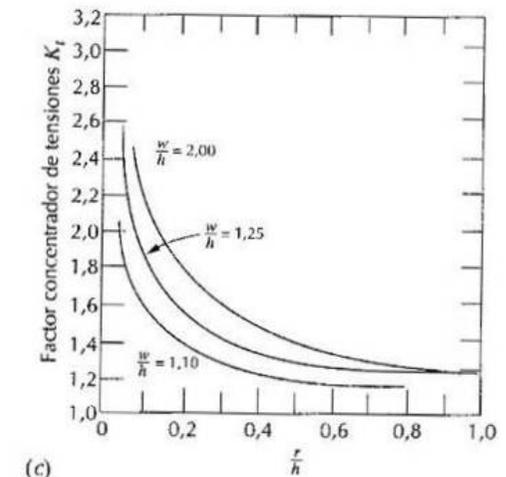
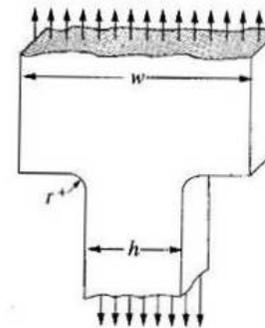
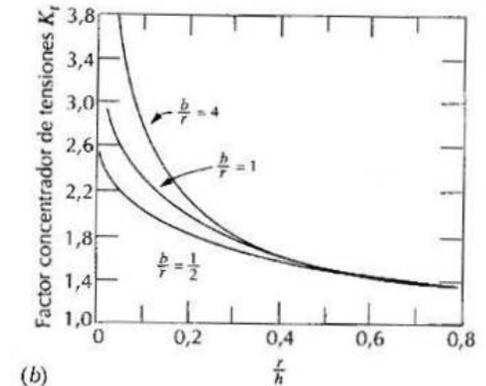
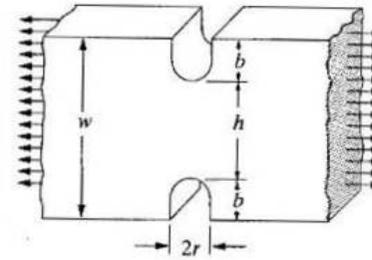
$$\Rightarrow a \gg \rho \Rightarrow \sigma_A \approx 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (\rho \rightarrow 0) \Rightarrow (\sigma_A \rightarrow \infty)$$



## 2. ESTADO TENSIONAL EN EL FRENTE DE UN DEFECTO

- Este hecho es generalizable a otras geometrías.
- Las entallas suponen estados concentrados de tensiones (distinguir entre **tensión remota** y **tensión local**).
- La fractura se produce cuando el estado tensional local en las proximidades de un defecto supera un determinado umbral, propio del material (**tenacidad a fractura del material**).



## 2. ESTADO TENSIONAL EN EL FRENTE DE UN DEFECTO

### Ejercicio propuestos:

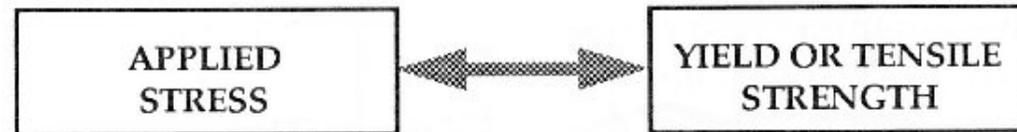
- 1) Una placa de grandes dimensiones se encuentra sometida a una tensión de tracción de 100 MPa. Aplicando el modelo de Inglis, calcular la tensión en el frente de un defecto elíptico de 10 mm de longitud total si el radio de curvatura vale  $10^{-3}$  mm.

**Respuesta:** 
$$\sigma_A \approx 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} = 2 \cdot 100 \sqrt{\frac{10}{10^{-3}}} = 20000 \text{ MPa}$$

**Comentario:** la tensión de rotura de un acero de alta resistencia es de “tan sólo” 2000 MPa.

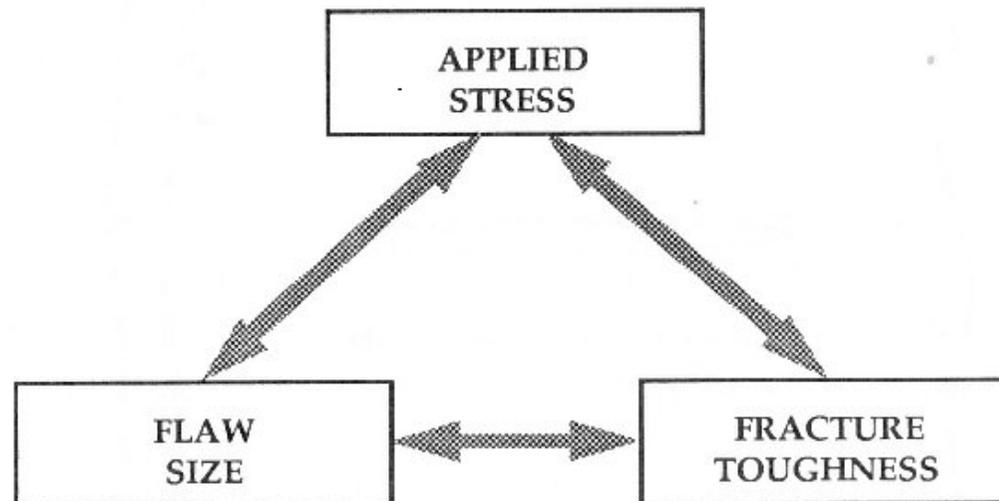
### 3. CÁLCULO CLÁSICO VS. CÁLCULO EN FRACTURA

#### Aproximación clásica (Resistencia de Materiales)



(a) The strength of materials approach.

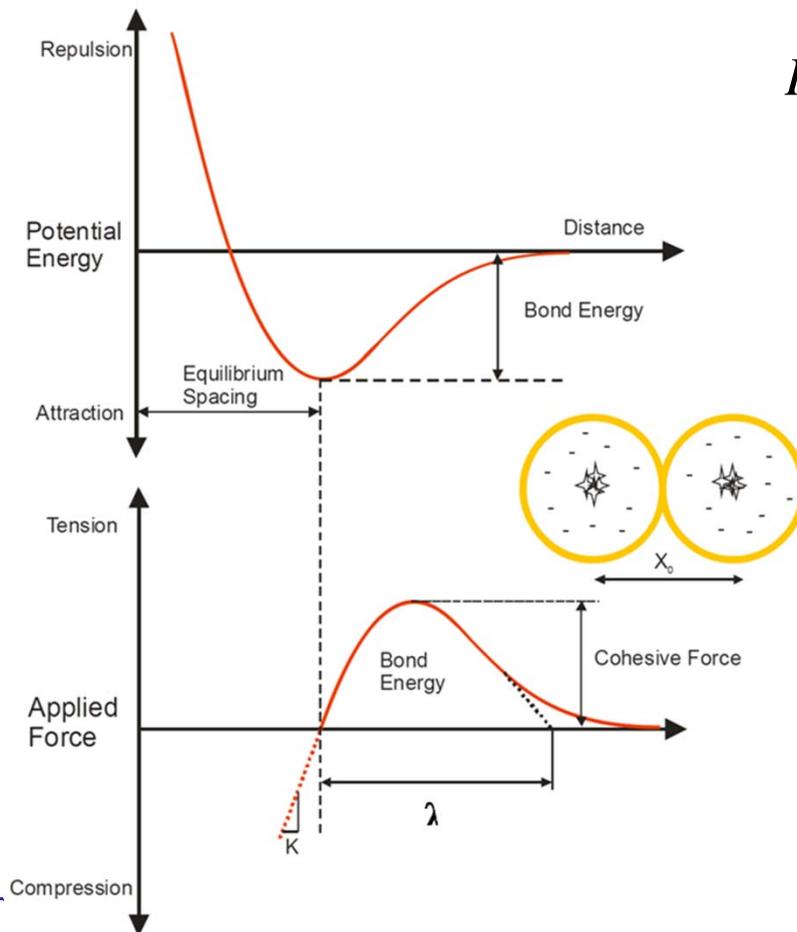
#### Aproximación de la Mecánica de Fractura



(b) The fracture mechanics approach

## 4. FRACTURA DESDE UN PUNTO DE VISTA ATÓMICO

- A nivel atómico (monocristal), la fractura implica la rotura de enlaces atómicos.
- Puede hacerse una **primera estimación de la resistencia a fractura**:



$$F \approx F_c \operatorname{sen} \left( \frac{\pi x}{\lambda} \right)$$

$$\left. \frac{dF}{dx} \right|_{x=x_0} = k \quad \left. \vphantom{\frac{dF}{dx}} \right\} F_c \frac{\pi}{\lambda} = k$$

$$E = \frac{k}{x_0} = \frac{F_c \frac{\pi}{\lambda}}{x_0} = \frac{F_c}{x_0^2} \frac{\pi x_0}{\lambda} = \sigma_c \frac{\pi x_0}{\lambda}$$

$$\sigma_c = \frac{E \lambda}{\pi x_0} \approx \frac{E}{\pi}$$

## 4. FRACTURA DESDE UN PUNTO DE VISTA ATÓMICO

### Ejercicios propuestos:

- 1) Estimar la tensión crítica para un acero,  $\sigma_c$ , empleando para ello un valor típico del módulo de elasticidad.

Respuesta: 
$$\sigma_c \approx \frac{E}{\pi} = \frac{200 \text{ GPa}}{\pi} \approx 70 \text{ GPa}$$

- 
- Este valor es 25 veces superior a la resistencia del mejor acero.
  - ***La inevitable existencia de numerosos defectos es la razón que justifica esta importante discrepancia.***
  - Aunque existen defectos a todas las escalas (desde microdefectos hasta discontinuidades macroscópicas), el término Mecánica de Fractura se aplica en el estudio del comportamiento de macrofisuras afiladas (sharp cracks).
  - Las macrofisuras están presentes en el material como consecuencia del **proceso de fabricación** (p.ej. soldaduras) o se desarrollan debido a las **condiciones de servicio** (fatiga, creep).

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL)

### Dos enfoques:

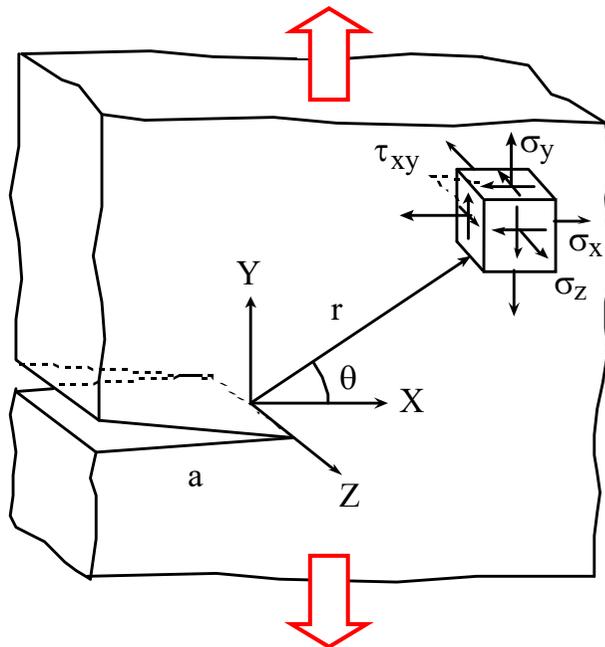
- ENFOQUE TENSIONAL
  - ENFOQUE ENERGÉTICO
- } → SE DEMUESTRA SU EQUIVALENCIA

### Objetivo:

- Obtener las **condiciones que determinan la rotura**.
- Identificar e interpretar la **tenacidad del material** (propiedad que expresa su resistencia frente a rotura en presencia de defectos).

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

- Material elástico-lineal perfecto.
- Sólido fisurado (**fisura perfecta**), sometido a un estado tensional (remoto) arbitrario, con un sistema de referencia polar en el frente del defecto.



Westergaard, Irwin, Sneddon y Williams:

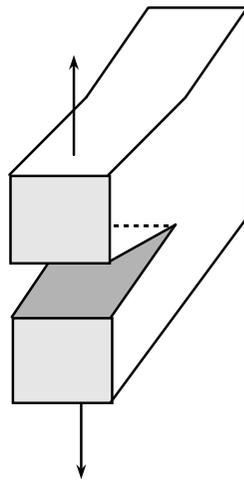
$$\sigma_{ij} = \frac{k}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{m/2} g_{ij}^{(m)}(\theta)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij} = \frac{k}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \Rightarrow \infty$$

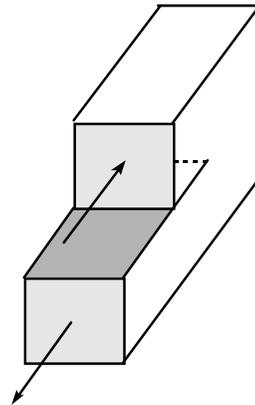
El modelo asume una fisura perfecta y un material perfectamente elástico-lineal (lo cual supone una idealización de la realidad).

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

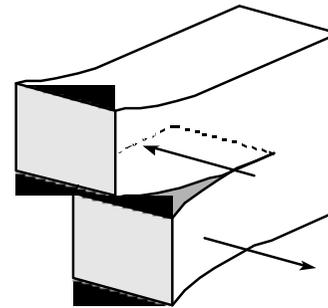
### MODOS DE FALLO



MODO I  
Tracción



MODO II  
Cortante



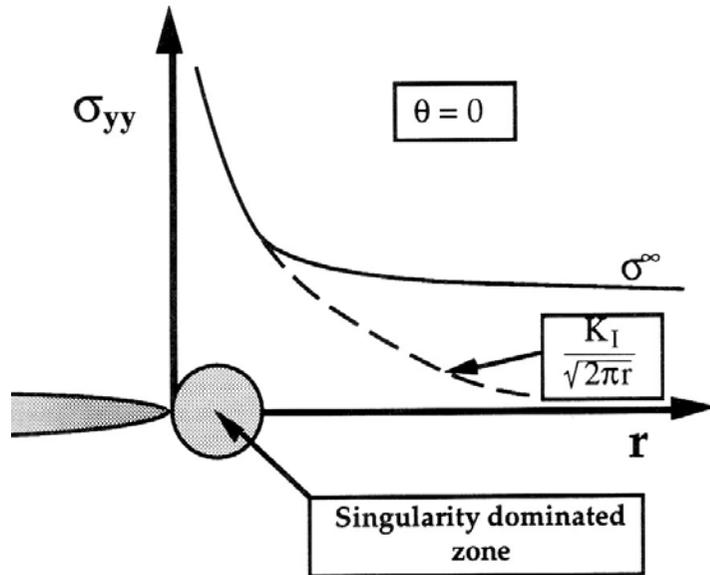
MODO III  
Torsión

$$\left. \begin{aligned} \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta) \\ \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(II)} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(II)}(\theta) \\ \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(III)} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(III)}(\theta) \end{aligned} \right\}$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(I)} + \sigma_{ij}^{(II)} + \sigma_{ij}^{(III)}$$

- $K_I, K_{II}, K_{III}$ : Factores de Intensidad de Tensiones (FIT).
- El FIT determina el estado tensional en las proximidades del frente de fisura.

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

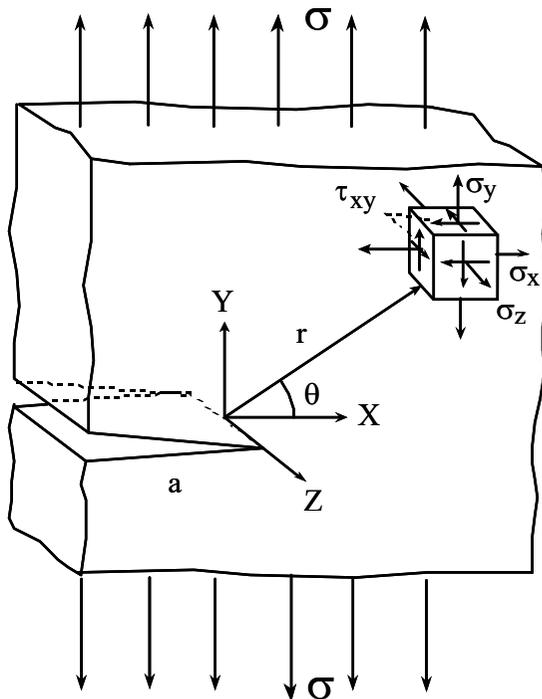


$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{yy}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

- La singularidad  $r^{-1/2}$  sólo domina los campos de tensiones en las proximidades del frente de fisura (**zona dominada por la singularidad**).
- A mayor distancia el estado tensional depende de las tensiones remotas (participación de los demás términos del desarrollo de Williams).

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### FORMULACIÓN: MFEL



### TENSIONES:

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \left[ \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right) \right]$$

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \left[ \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right) \right]$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \left[ \cos \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_z = 0 \quad (\text{TP}) \quad \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{DP})$$

### DESPLAZAMIENTOS:

$$u = \frac{\sigma}{2E} \sqrt{\frac{ar}{2}} (1+\nu) \left[ (2\kappa-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$v = \frac{\sigma}{2E} \sqrt{\frac{ar}{2}} (1+\nu) \left[ (2\kappa+1) \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} - \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$w = -\frac{\nu}{E} \int (\sigma_x + \sigma_y) dz$$

$$\kappa = 3 - 4\nu \quad (\text{TP}) \quad \kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu} \quad (\text{DP})$$

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES:

- Define completamente el estado tensional y deformacional en las proximidades del frente de fisura (región dominada por la singularidad).
- Depende de la tensión remota ( $\sigma$ ) y de las características del defecto ( $a$ ).

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta) \quad \Rightarrow \quad \text{Unidades FIT: } \text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2} = \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

- La expresión más sencilla que puede proponerse, válida dimensionalmente es:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad Y: \text{Factor geométrico.}$$

- Este tipo de expresiones funcionan en geometrías muy simétricas (placas infinitas o semi-infinitas).

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES:

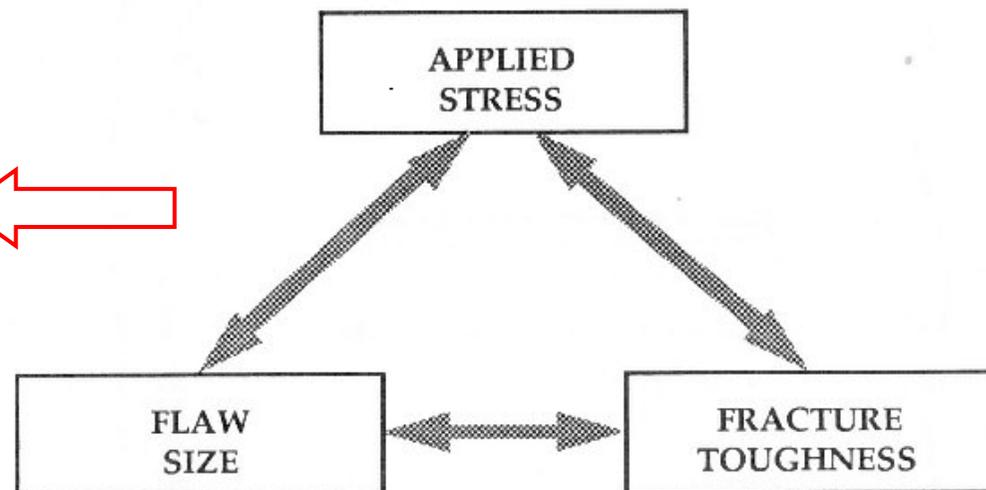
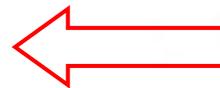
- La rotura se producirá cuando los estados tensionales y/o deformacionales en el frente de fisura (zona de proceso) alcancen un determinado límite del material.
- A pesar de no conocer dicha combinación crítica, puesto que  $K_I$  controla las condiciones en la zona de proceso, la **condición de fractura** será:

$$K_I = K_{Ic}$$

$K_I$ : Depende del estado de cargas y de la geometría del defecto.

$K_{Ic}$ : Propiedad del material: **TENACIDAD A FRACTURA**

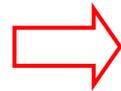
$$K_I(\sigma, a) = K_{Ic}(\text{material})$$



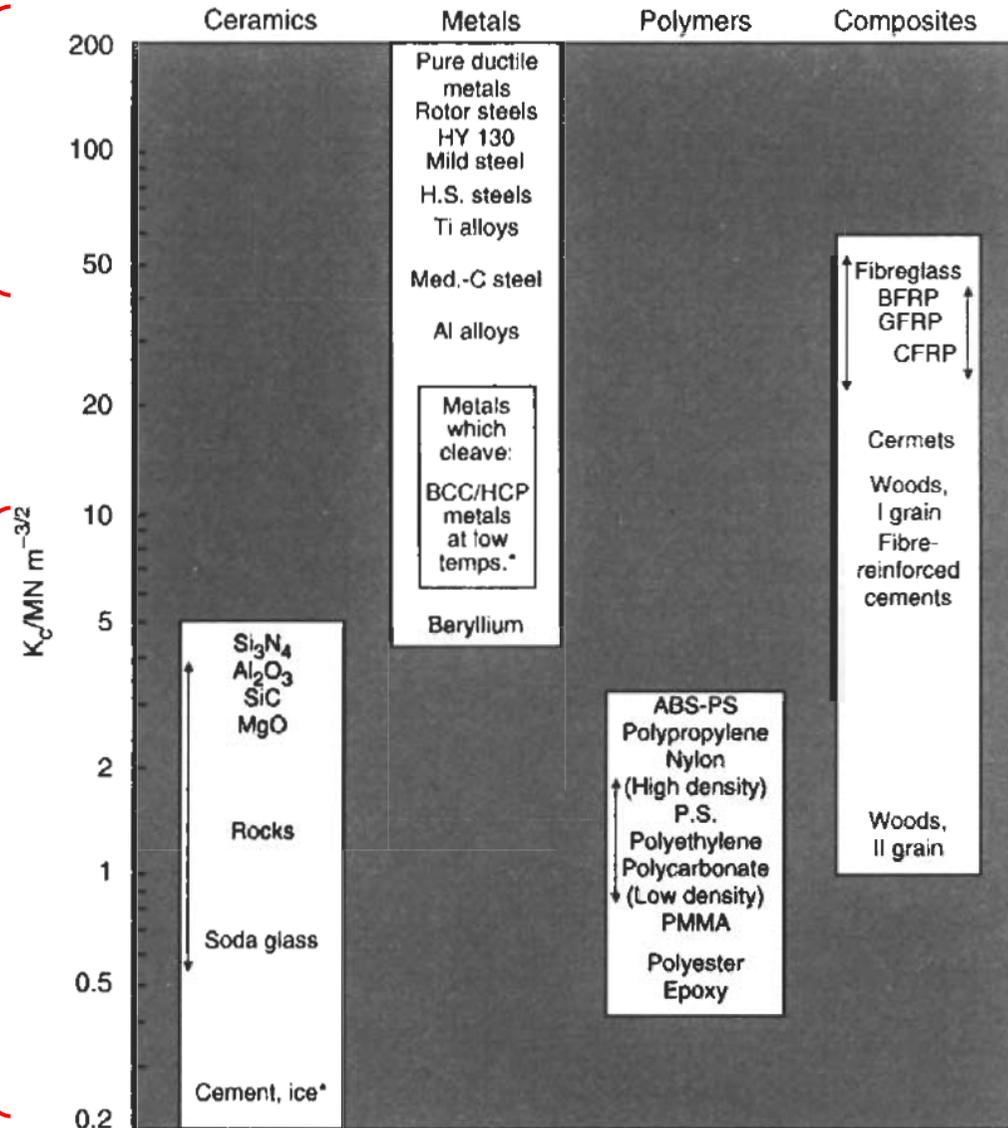
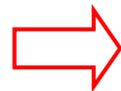
## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

Valores típicos de  $K_{Ic}$ :

MATERIALES  
TENACES



MATERIALES  
FRÁGILES



## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### Ejercicio propuesto:

- 1) Obtener la máxima fisura admisible en una placa semi-infinita (factor geométrico  $Y=1.12$ ) fabricada en un acero de tenacidad  $K_{Ic} = 100$   $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , sometida a un estado tensional (modo I)  $\sigma = 100$   $\text{MPa}$ .

Respuesta:  $K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} = K_{Ic} \quad a_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{Ic}}{Y\sigma} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left( \frac{100}{1.12 \cdot 100} \right)^2 = 25 \text{ mm}$

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### LA TENACIDAD

- Considerando, por simplicidad modo I, en las proximidades de la fisura será:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

- K caracteriza las condiciones en el fondo de fisura
- Se puede definir la llamada "Región dominada por la singularidad" (RDS) cuyo tamaño viene dado por K.

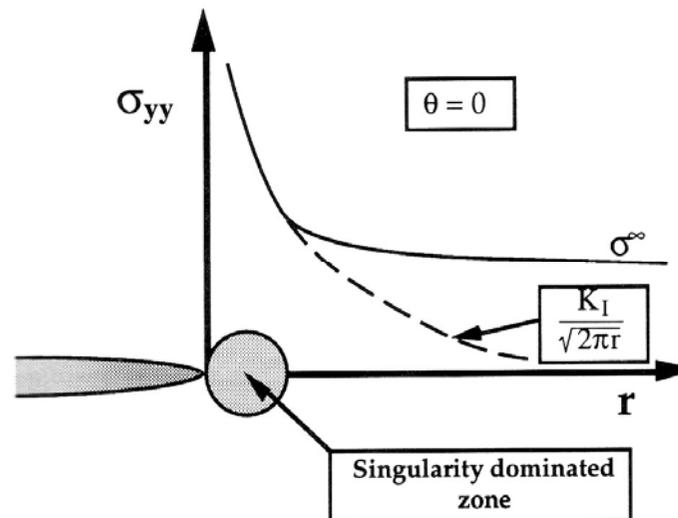


FIGURE 2.15 Stress normal to the crack plane in Mode I.

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

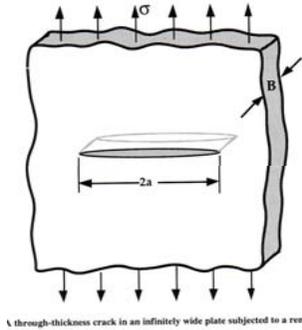
### DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES:

Diversas posibilidades:

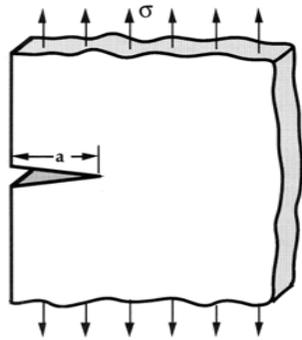
- Compendios de soluciones.
- Obtención de la solución para un problema elástico con condiciones de contorno.
- Técnicas experimentales (galgas extensométricas, fotoelasticidad)
- Métodos energéticos.
- **Métodos numéricos (Elementos Finitos).**

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

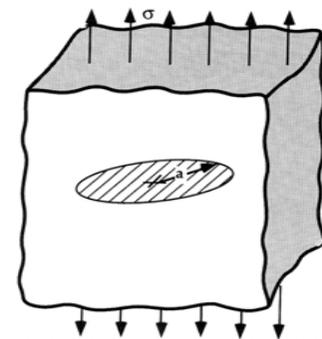
### DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES:



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$



$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a}$$



$$K_I = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi a}$$

| GEOMETRY                                  | $f(a/W)^*$   |
|---|--|
| <p>Single Edge Notched Tension (SENT)</p> | $\frac{\sqrt{2 \tan \frac{\pi a}{2W}}}{\cos \frac{\pi a}{2W}} \left[ 0.752 + 2.02 \left( \frac{a}{W} \right) + 0.37 \left( 1 - \sin \frac{\pi a}{2W} \right)^3 \right]$  |
| <p>Single Edge Notched Bend (SENB)</p>    | $\frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left( 1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left( 1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \left[ 1.99 - \frac{a}{W} \left( 1 - \frac{a}{W} \right) \left\{ 2.15 - 3.93 \left( \frac{a}{W} \right) + 2.7 \left( \frac{a}{W} \right)^2 \right\} \right]$ |
| <p>Center Cracked Tension (CCT)</p>       | $\frac{\sqrt{\frac{\pi a}{4W} \sec \frac{\pi a}{2W}}}{1 - 0.025 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 0.06 \left( \frac{a}{W} \right)^4}$   |
| <p>Double Edge Notched Tension (DENT)</p> | $\frac{\sqrt{\frac{\pi a}{2W}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}} \left[ 1.122 - 0.561 \left( \frac{a}{W} \right) - 0.205 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 0.471 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 0.190 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \right]$  |
| <p>Compact Specimen</p>                   | $\frac{2 + \frac{a}{W}}{\left( 1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \left[ 0.886 + 4.64 \left( \frac{a}{W} \right) - 13.32 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left( \frac{a}{W} \right)^3 - 5.60 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \right]$  |

\*  $K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f(a/W)$  where B is the specimen thickness.

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### LA TENACIDAD (MFEL)

#### ¿CUÁNTO VALE K Y CÓMO FUNCIONA?

- K define perfectamente el campo de tensiones, deformaciones y movimientos en la RDS para materiales elásticos.
- K como criterio de fractura: Admitiendo que el fallo acontece localmente ante una combinación  $(\sigma, \epsilon)$  la propagación de la fisura sucederá para un valor  $K=K_c$ .
- Ésto es válido en materiales elásticos pero, ¿funciona para comportamientos inelásticos? Al fin y al cabo, se comprueba experimentalmente que el fallo se inicia, en las más de las veces en la zona de daño (ZP), fuera del alcance de las consideraciones presentadas.
- Como se verá, bajo ciertas condiciones, K todavía caracteriza la descripción de eventos en el frente, incluso en presencia de ZP.

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### LA TENACIDAD (MFEL)

¿CUÁNTO VALE K Y CÓMO FUNCIONA?

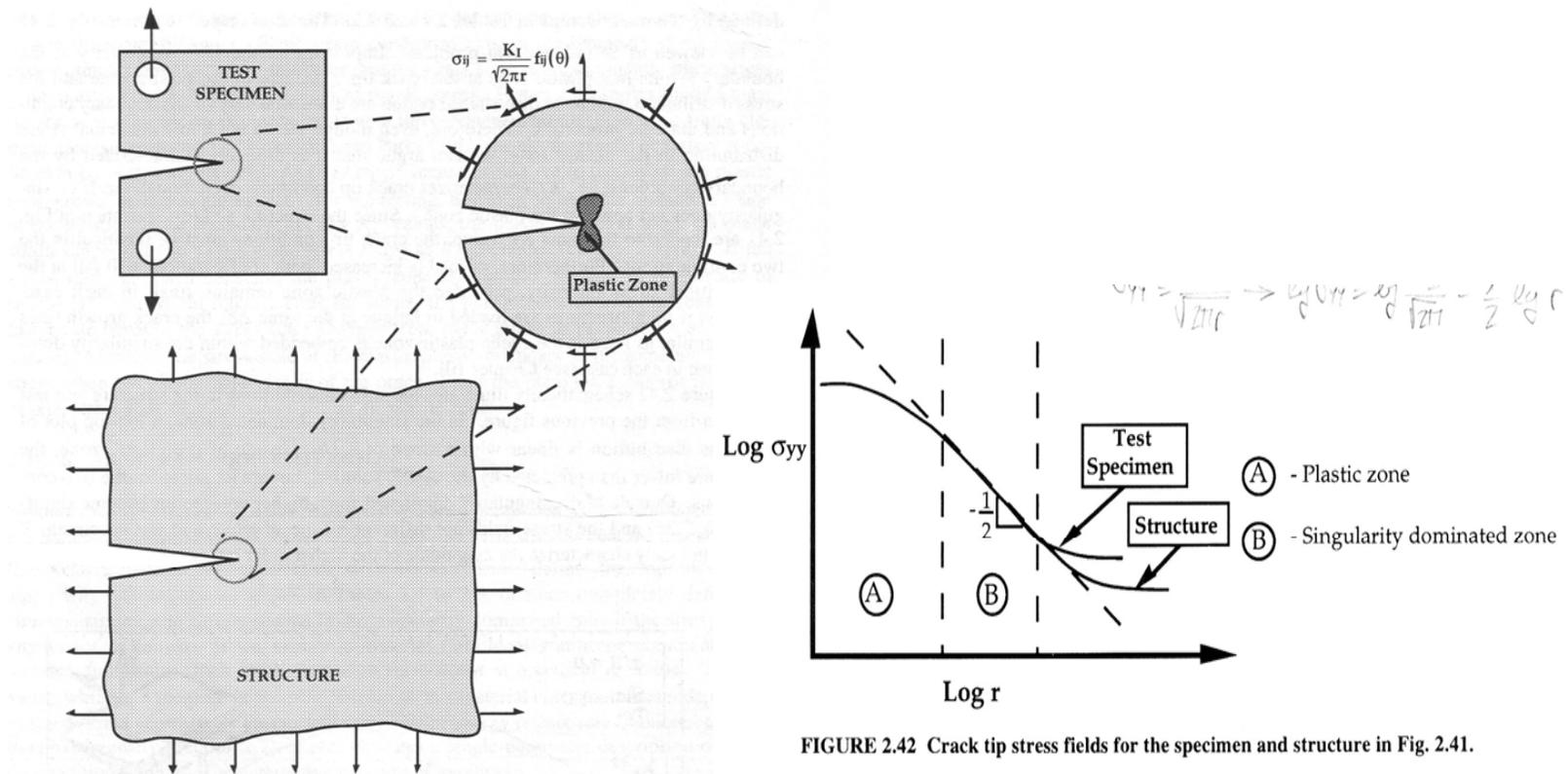


FIGURE 2.41 Schematic test specimen and structure loaded to the same stress intensity. The crack tip conditions should be identical in both configurations as long as the plastic zone is small compared to all relevant dimensions. Thus both will fail at the same critical  $K$  value.

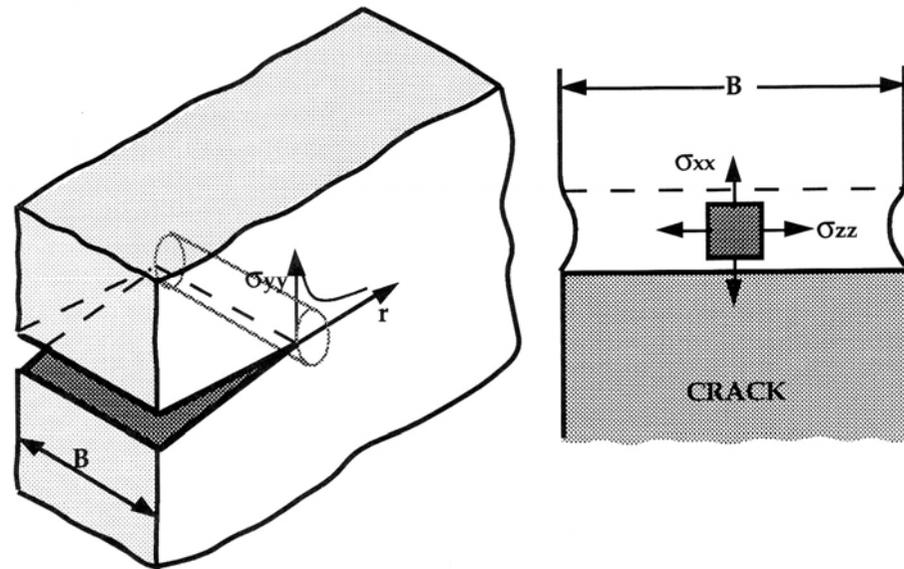
FIGURE 2.42 Crack tip stress fields for the specimen and structure in Fig. 2.41.

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### LA TENACIDAD (MFEL)

EL TAMAÑO SÍ IMPORTA: TP Vs DP

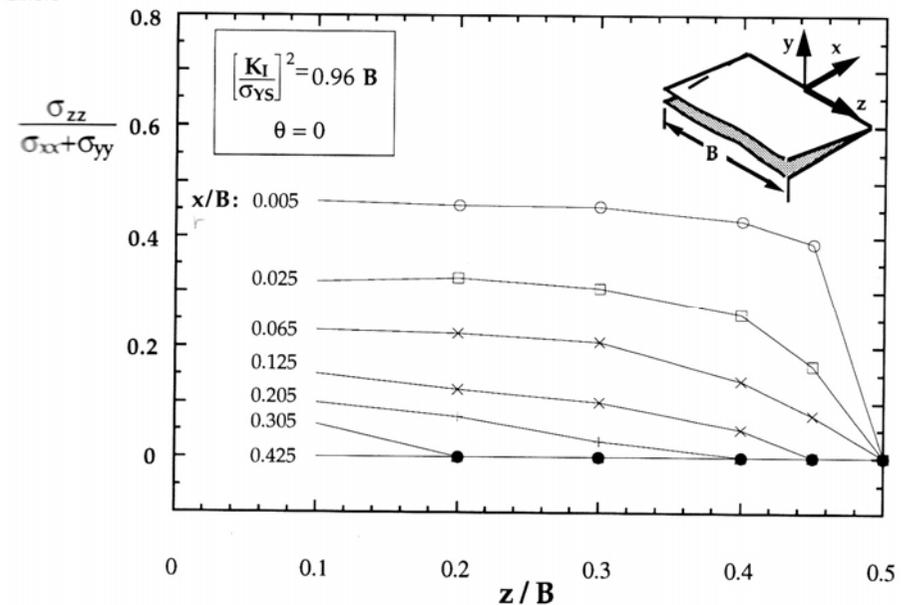
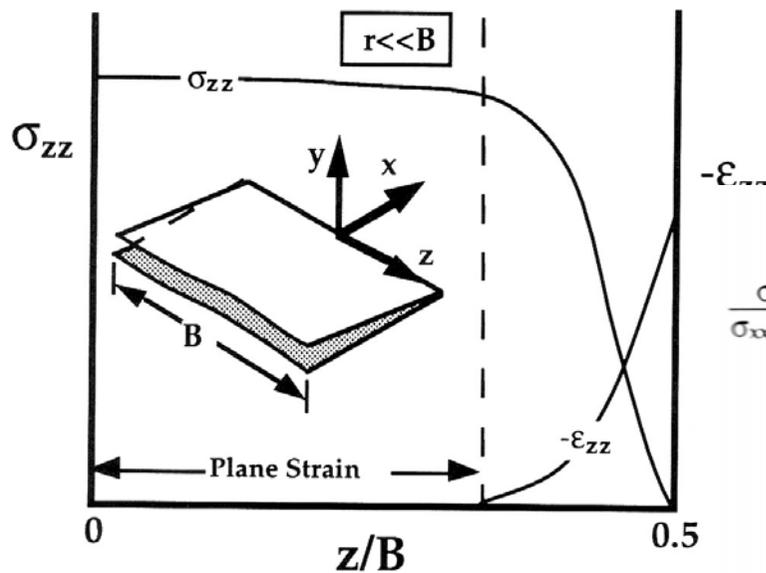
- En las proximidades del frente el material está fuertemente solicitado.
- Por ello tiende a contraerse en las direcciones x-z.
- El resto de material impide tal contracción.
- Fuerte triaxialidad en frente de fisura: DP
- En los contornos, TP.



## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### LA TENACIDAD (MFEL)

EL TAMAÑO SÍ IMPORTA: TP Vs DP

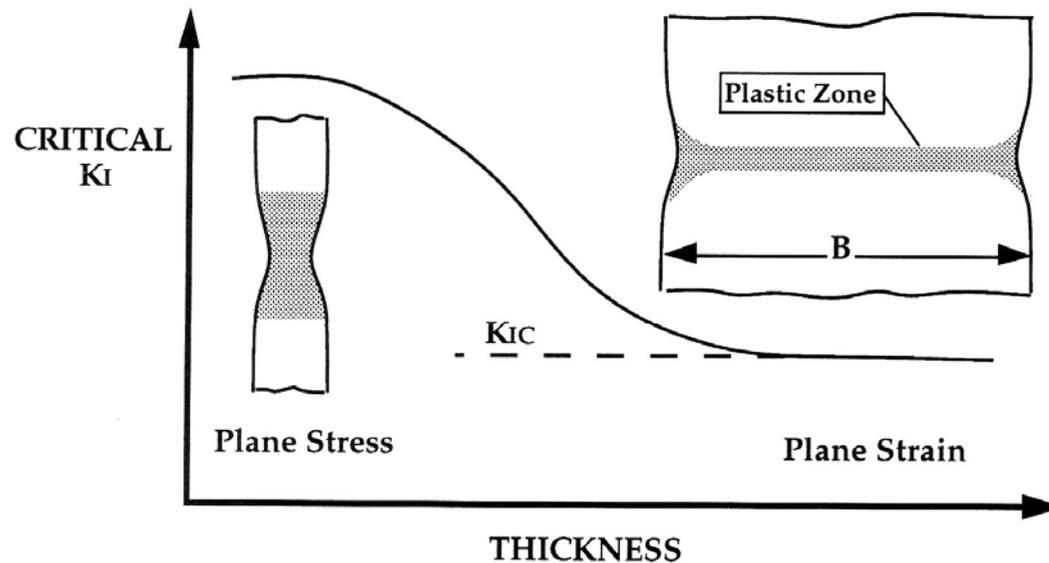


## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE TENSIONAL

### LA TENACIDAD (MFEL)

EL TAMAÑO SÍ IMPORTA: TP Vs DP

- En condiciones de alta triaxialidad la ZP es pequeña .
- Condiciones más desfavorables desde el punto de vista de la tenacidad.

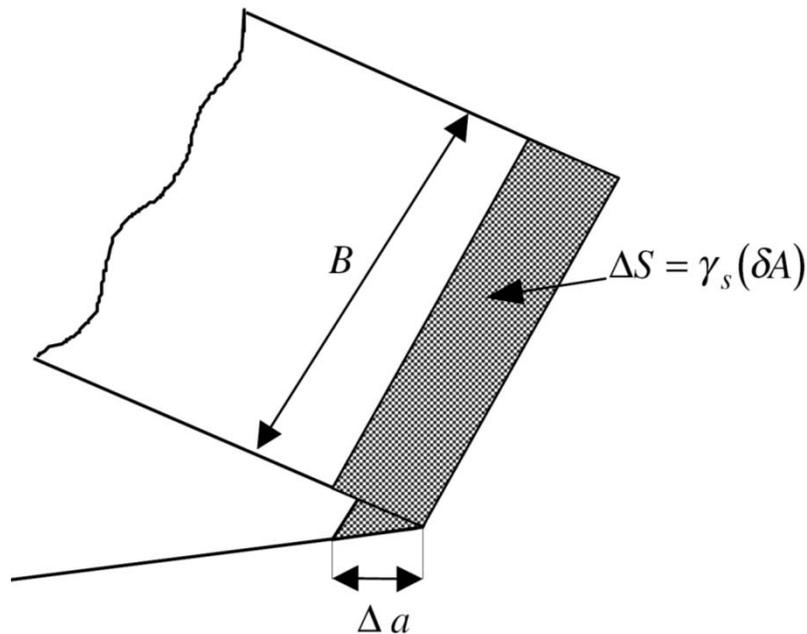


$K_{Ic}$ : Tenacidad a  
Fractura en DP

FIGURE 2.43 Effect of specimen thickness on Mode I fracture toughness.

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE ENERGÉTICO

- **Griffith** (1924) propuso un criterio de fractura basado en consideraciones energéticas (Principio de Conservación de la Energía).



$$\Delta U + \Delta E_s = 0$$

$$\Delta E_s = \gamma_s \Delta A = \gamma_s (2B \Delta a)$$

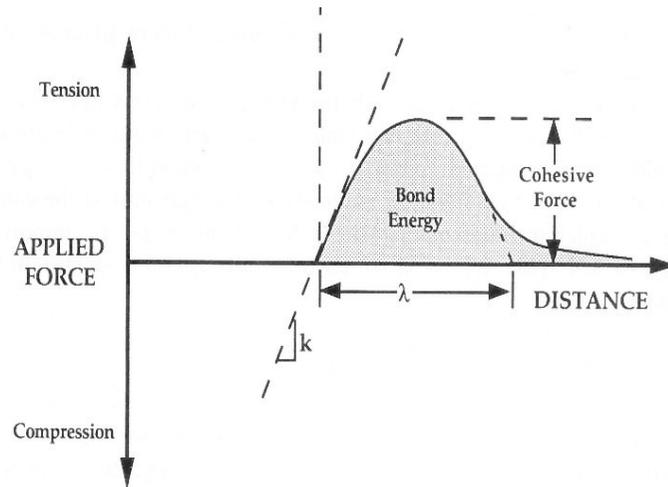
$$\frac{-1}{B} \frac{\Delta U}{\Delta a} = 2\gamma_s \quad \Rightarrow \quad \frac{-1}{B} \frac{\partial U}{\partial a} = 2\gamma_s$$

$$G = \frac{-1}{B} \frac{\partial U}{\partial a} = G_c = 2\gamma_s$$

- Como se verá en breve, esta expresión representa sólo una aproximación restringida de una formulación más general.

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE ENERGÉTICO

- Interpretación del término  $\gamma_s$ :



$$\gamma_s = \frac{1}{2} \int_0^{\lambda} \sigma_c \operatorname{sen} \left( \frac{\pi x}{\lambda} \right) dx = \sigma_c \frac{\lambda}{\pi}$$

$$\lambda = \frac{\pi x_0 \sigma_c}{E}$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E \gamma_s}{x_0}}$$

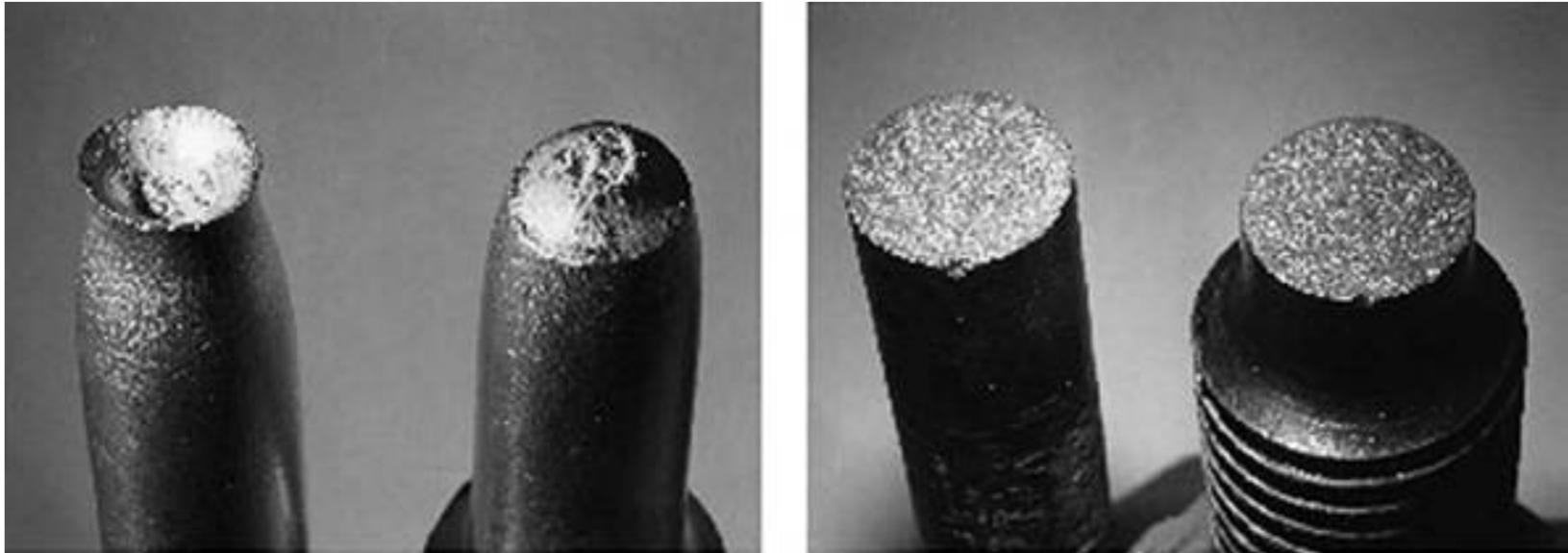
### Ejercicios propuestos:

- 2) Estimar la energía superficial teórica,  $\gamma_s$ , de un acero.

Respuesta:  $\gamma_s = \sigma_c \frac{\lambda}{\pi} = (7 \cdot 10^{10} \text{ Pa}) \left( \frac{10^{-8} \text{ m}}{\pi} \right) \approx 250 \text{ Pa} \cdot \text{m} \equiv 250 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE ENERGÉTICO

### PROPUESTA DE GRIFFITH Y OROWAN (1948)



- El balance de energía que ellos proponen tiene en consideración la energía de **deformación plástica**, que también se disipa en la rotura.

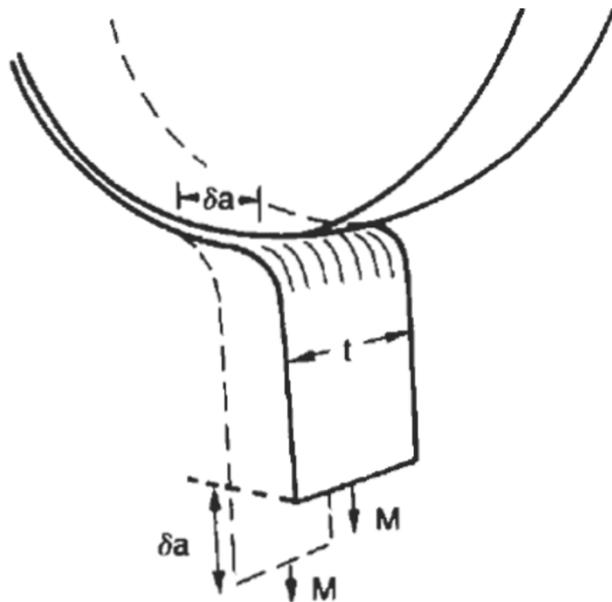
$$\gamma = \gamma_s + \gamma_p \quad \Rightarrow \quad G = -\frac{\delta \Pi}{dA} = 2(\gamma_s + \gamma_p) = G_c$$

- Como se verá más adelante, en la práctica  $G_c$  se determina mediante procedimientos experimentales.

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE ENERGÉTICO

### Ejercicios propuestos:

- 1) Estimar el valor de  $G_c$  para un rollo de adhesivo de 1 cm de anchura sabiendo que es preciso suspender una masa de 100 g para conseguir despegarlo (a efectos de cálculo puede despreciarse la variación en la energía de deformación).



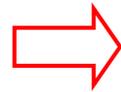
$$G = -\frac{\delta \Pi}{dA} = -\frac{(dU - \delta W_{mec})}{dA} = G_c$$

$$\frac{\delta W_{mec}}{dA} = \frac{M g da}{t da} = G_c \quad \Rightarrow \quad G_c = \frac{M g}{t}$$

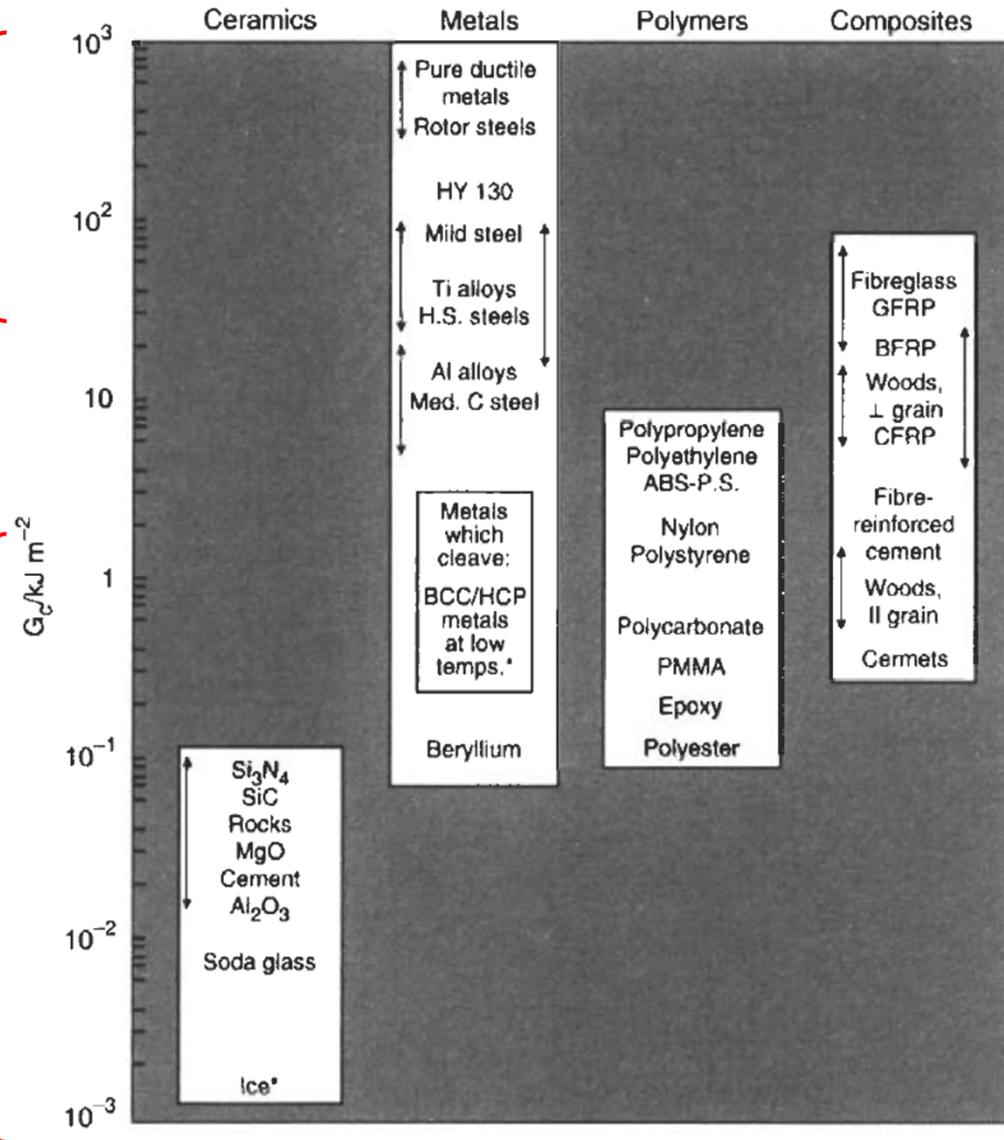
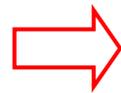
$$G_c \approx \frac{0.110}{0.01} = 11 \text{ J m}^{-2}$$

## 5. CRITERIOS DE FRACTURA (MFEL): ENFOQUE ENERGÉTICO

MATERIALES  
TENACES



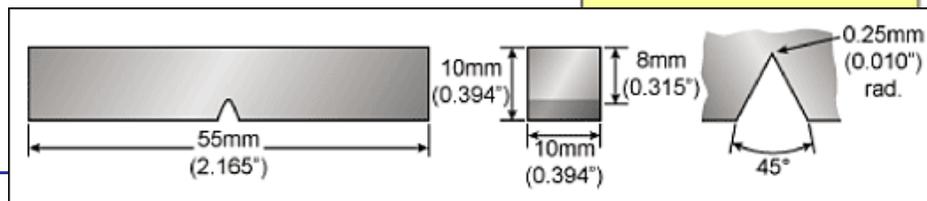
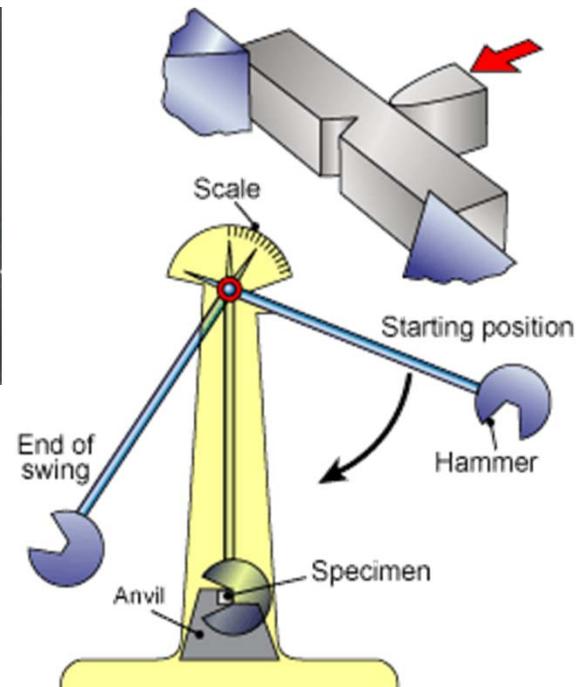
MATERIALES  
FRÁGILES



## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

- **HISTÓRICAMENTE:** ensayo de impacto Charpy.
- **ACTUALMENTE:** ensayos propios de la MFEL y MFEP.

### ENSAYO DE IMPACTO CHARPY:



## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO DE IMPACTO CHARPY:

#### RESULTADOS DEL ENSAYO:

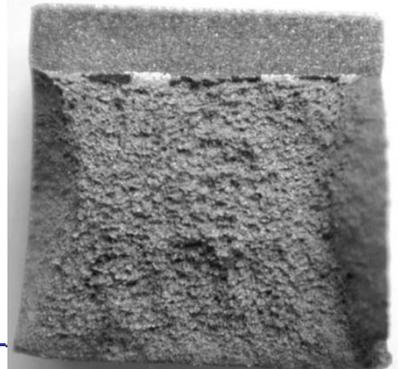
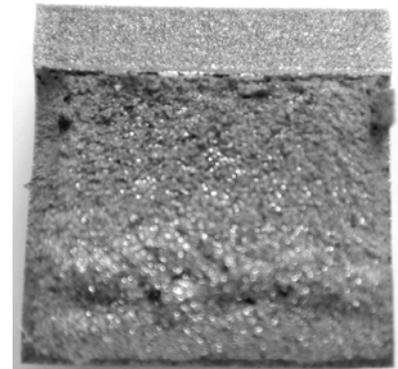
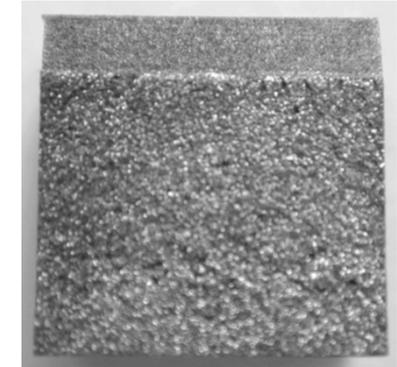
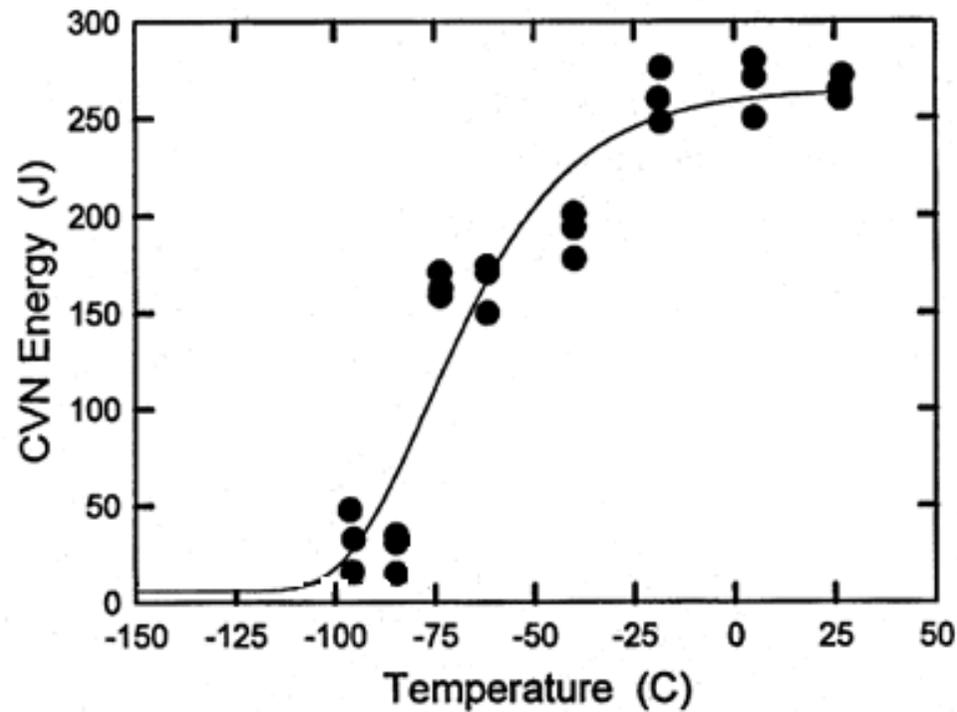
- El principal resultado del ensayo es la **energía absorbida** por la probeta; la **resiliencia** representa la energía absorbida por unidad de sección resistente.
- Otros resultados relevantes son la fracción de rotura dúctil / frágil o la expansión lateral de la probeta.
- Se emplea con asiduidad para determinar la influencia de la temperatura sobre la tenacidad.

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO DE IMPACTO CHARPY:

#### RESULTADOS DEL ENSAYO:

- Influencia de la temperatura sobre la tenacidad:

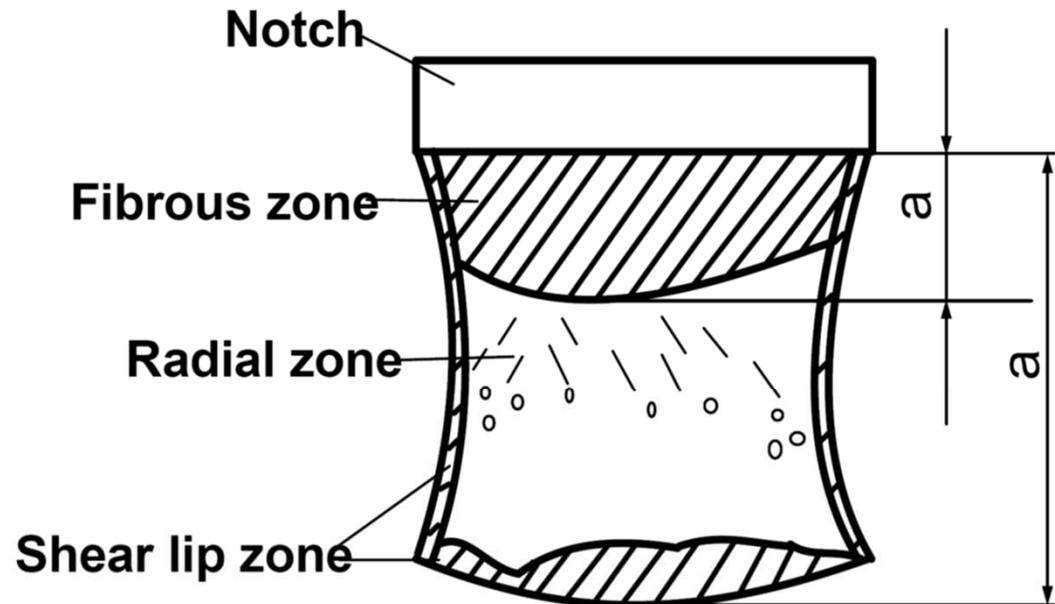


## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO DE IMPACTO CHARPY:

#### RESULTADOS DEL ENSAYO:

- Influencia de la temperatura sobre la tenacidad:



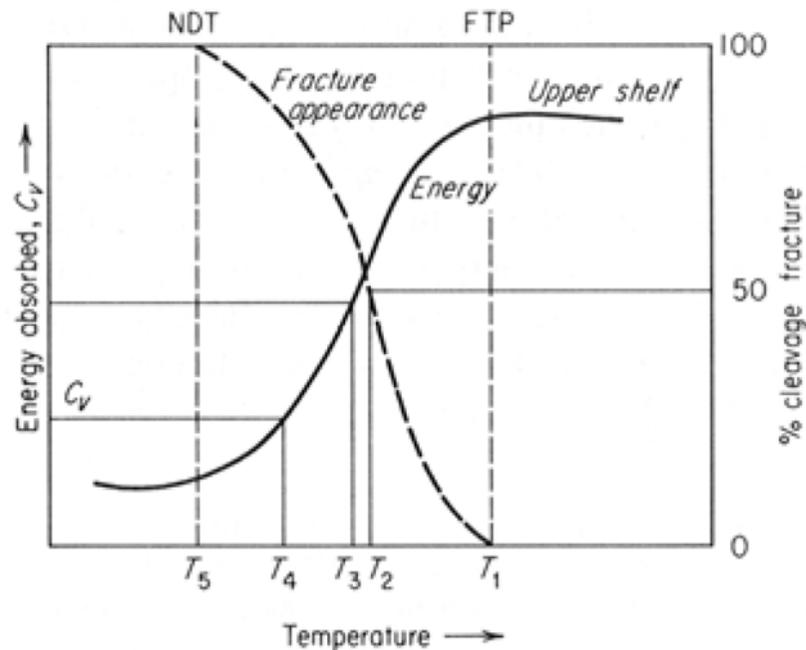
*A sketch of the appearance of fractured surface of impact specimen after Charpy test*

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO DE IMPACTO CHARPY:

#### RESULTADOS DEL ENSAYO:

- Influencia de la temperatura sobre la tenacidad:



- ✓  $T_1$ : Conservative, above  $T_1$  fracture is 100% fibrous. *Fracture Transition Plastic* (FTP) very demanding.
- ✓  $T_2$ : 50% cleavage - 50% ductile *Fracture Appearance Trans. Temp.* (FATT).
- ✓  $T_3$ : Average of upper and lower shelf values. (often approx =  $T_2$ )
- ✓  $T_4$ : Arbitrary value of energy absorbed, (CVN) e.g. 20 J (15 ft.lb) for low strength ship steel. *Ductility Transition Temp.*
- ✓  $T_5$ : 100% cleavage fracture. *Nil Ductility Temperature* (NDT)

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO DE IMPACTO CHARPY:

#### **CARACTERÍSTICAS RESEÑABLES:**

- El ensayo fue desarrollado en 1905 por el ingeniero francés Georges Charpy.
- Ampliamente usado por la industria (construcción, naval, nuclear, etc.) por tratarse de un ensayo de preparación y ejecución sencillas, rápido y barato.
- Ensayo de naturaleza dinámica (impacto).
- Probeta entallada, no prefisurada.
- El mayor inconveniente es que la información que proporciona sólo puede emplearse en términos comparativos.

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL



Designation: E 399 – 90 (Reapproved 1997)

**Standard Test Method for  
Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials<sup>1</sup>**



Designation: E 561 – 98

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS  
100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428  
Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM

**Standard Practice for  
R-Curve Determination<sup>1</sup>**



Designation: E 1820 – 01

**Standard Test Method for  
Measurement of Fracture Toughness<sup>1</sup>**



Designation: E 1823 – 96 (Reapproved 2002)

**Standard Terminology  
Relating to Fatigue and Fracture Testing<sup>1</sup>**

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

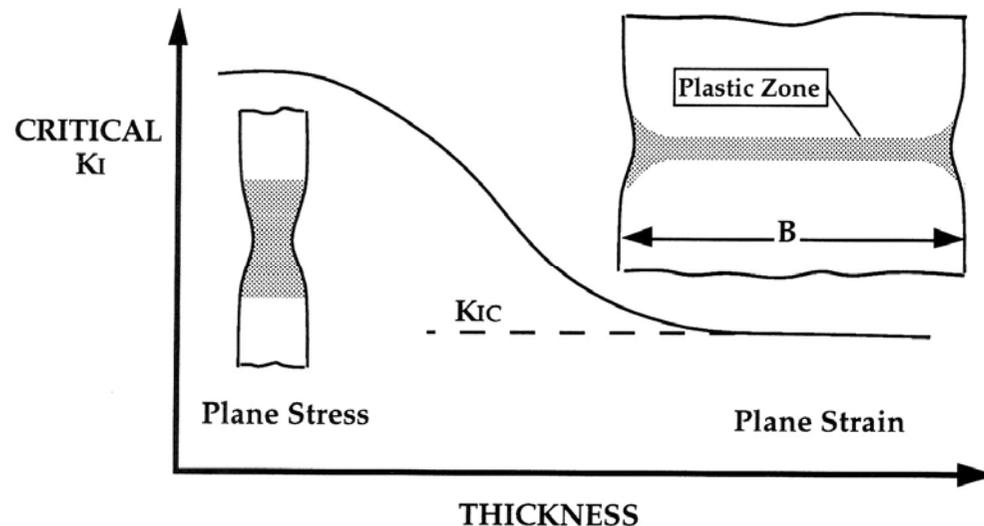
### **REQUISITOS (ASTM E 399):**

- Comportamiento elástico lineal hasta rotura.
- Tamaño despreciable de la zona plástica.
- Rotura frágil (sin propagación estable).

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO $K_{IC}$ PROBETA

- ❑ Se deben garantizar condiciones de deformación plana:
- ❑ La dimensión mínima de las probetas sean un cierto número de veces superior al tamaño de la zona plástica:



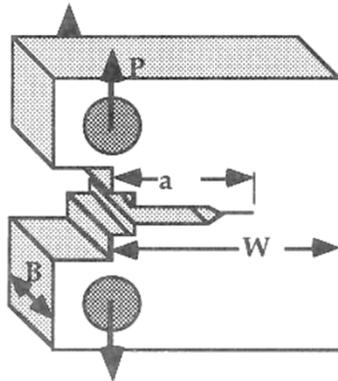
$$B, a, (W - a) \geq 2.5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$$

$K_{IC}$ : Tenacidad a Fractura en DP

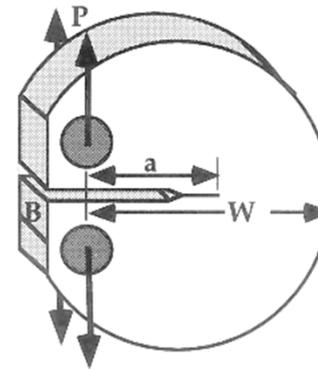
## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO $K_{IC}$

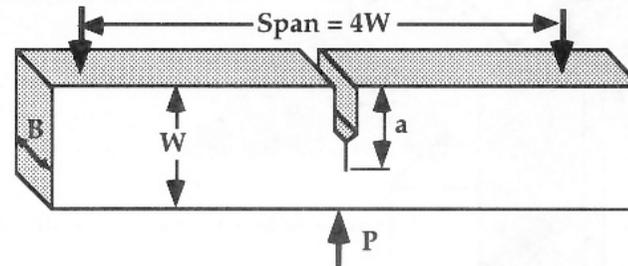
PROBETA (W, B,  $a_0$ )  $\rightarrow$   $B, a, (W - a) \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2$



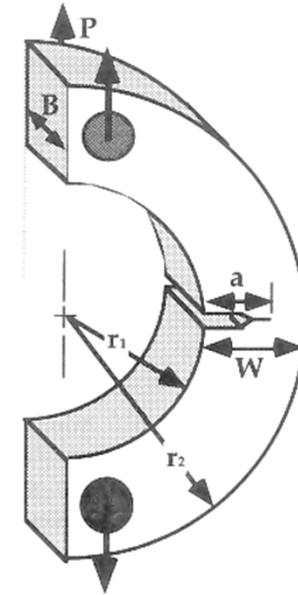
(a) Compact specimen.



(b) Disk shaped compact specimen.



(c) Single edge notched bend (SENB) specimen.



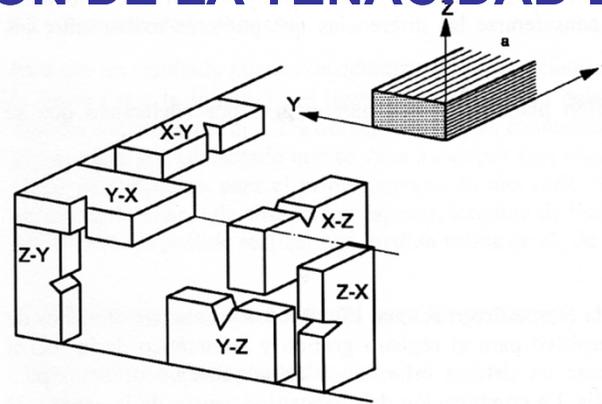
(d) Arc shaped specimen

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

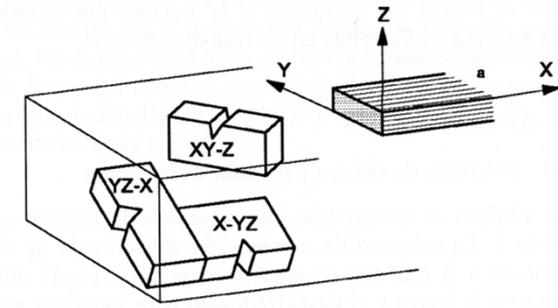
### ENSAYO $K_{Ic}$

#### PROBETA

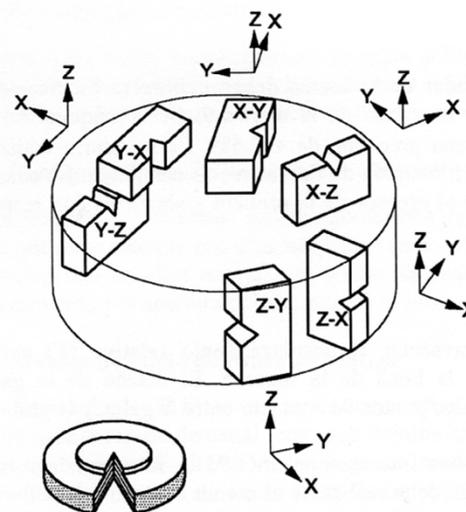
(Identificación del  
plano de fisura)



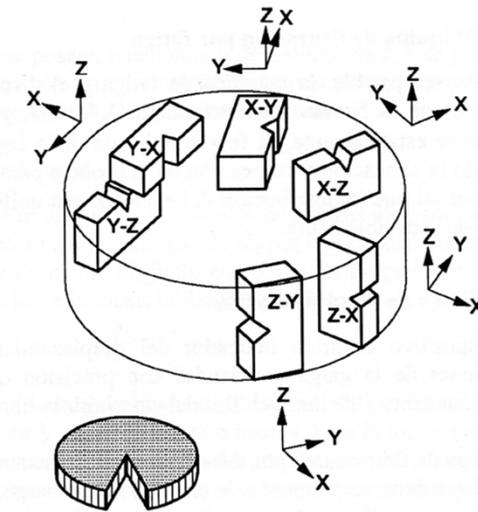
a) Identificación básica



b) Identificación no básica



c) Flujo de grano radial, dirección de trabajo axial



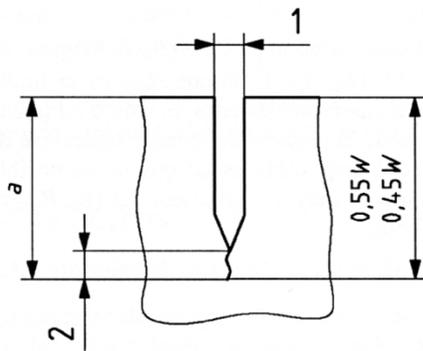
d) Flujo de grano axial, dirección de trabajo radial

<sup>a</sup> Dirección de flujo de grano

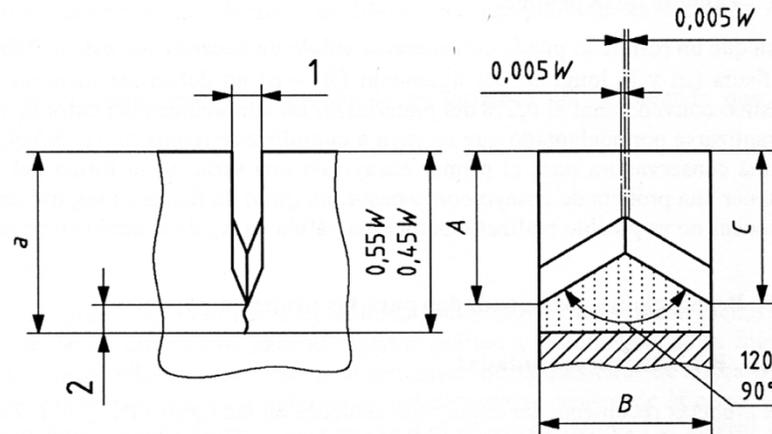
## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO $K_{IC}$ PROBETA (Prefisuración por fatiga)

- Entalla mecanizada
- Afino entalla: electroerosión



a) Muesca de canal recto



b) Muesca de diente angular<sup>c</sup>

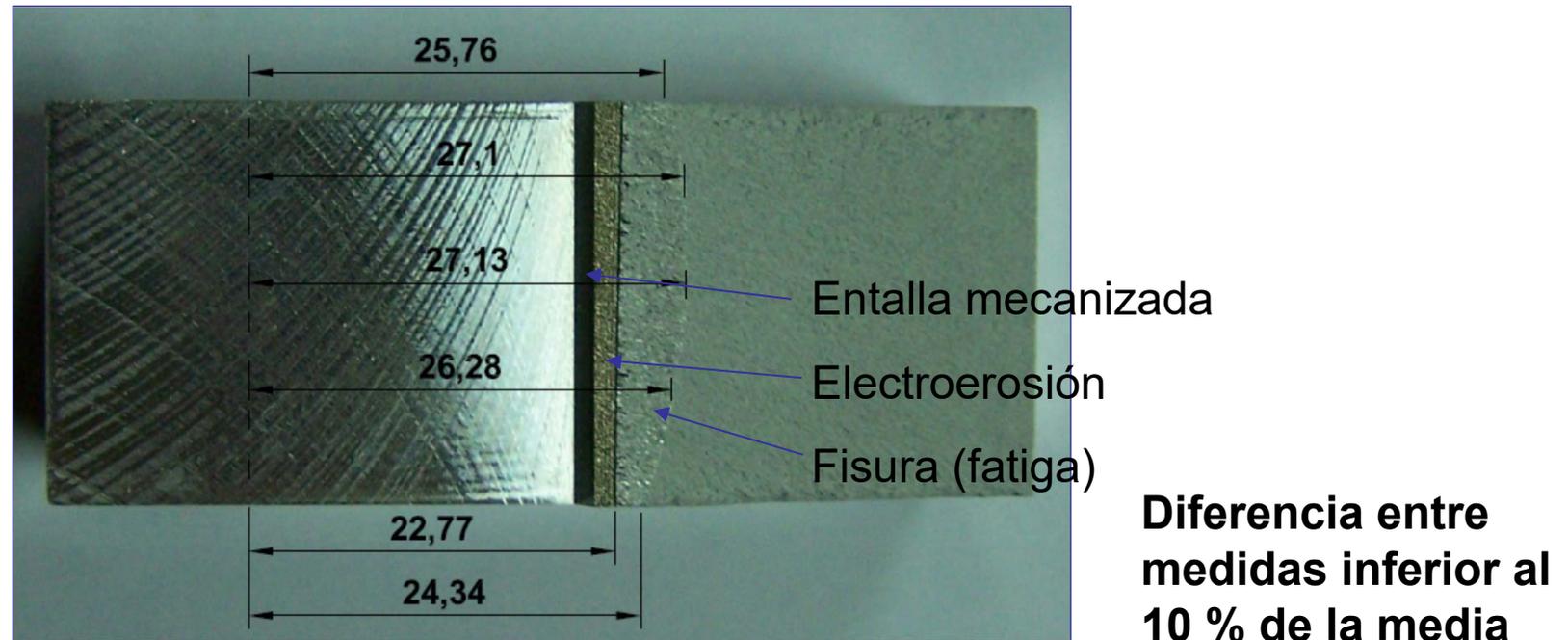
- Control F/P
- $R < 0.1$
- $K_I < 80\% K_Q$
- Etapa final (2.5 % a):  $K_I < 60\% K_Q$



## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO $K_{Ic}$ PROBETA (Medida de la fisura)

- ❑ Medida de la fisura: métodos ópticos, flexibilidad...
- ❑  $0.45 < a/W < 0.55$
- ❑ Medida fisura inicial: tintado térmico, 200 °C (media varias medidas)



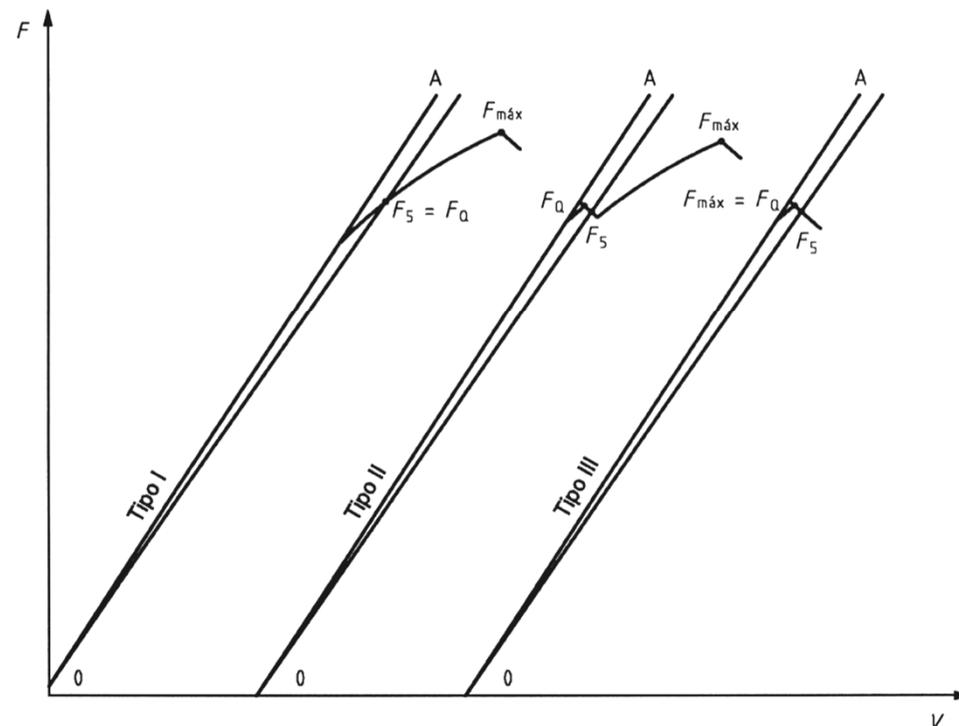
## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO $K_{Ic}$ ENSAYO (ASTM E399 y UNE-EN ISO 1273)

- ❑ Se registra Fuerza – Desplazamiento y se define  $F_Q$



Registros típicos



## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO $K_{IC}$ ENSAYO

- ❑ CÁLCULO DE  $F_Q$
- ❑ OBTENCIÓN DE  $K_Q$



$$K_Q = \frac{F_Q}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

- ❑  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  depende de la geometría de la probeta

| GEOMETRY                               | $f(a/W)^*$   |
|--|--|
| <p>Single Edge Notched Bend (SENB)</p> | $\frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2} \left[1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2\right\}\right]}$ |
| <p>Compact Specimen</p>                | $\frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.60 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]$  |

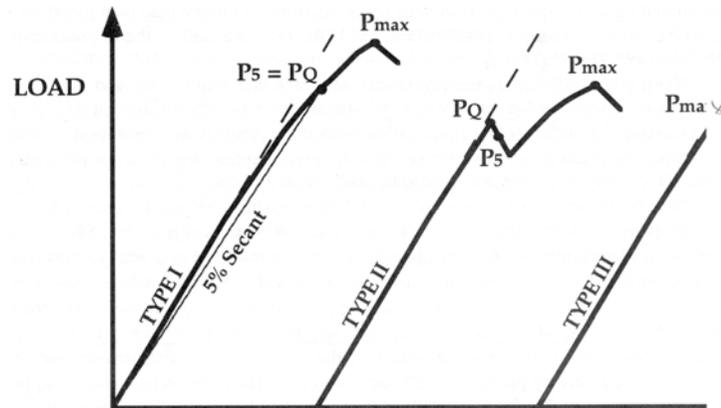
## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO $K_{IC}$ ENSAYO (RESULTADO)

- Se comprueba que  $F_{max} \leq 1.10 F_Q$
- Se determina  $K_Q$
- Se comprueba que:  $B, a, (W - a) \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2$
- Se verifica que  $0.45 < a/W < 0.55$
- El plano de fractura debe ser paralelo al plano de la muesca con una precisión de  $\pm 10^\circ$
- No deben existir fisuración múltiples
- Cumplidas todas estas condiciones  $\rightarrow$   $K_Q = K_{IC}$
- Si alguna condición no se cumple no es un ensayo  $K_{IC}$

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### ENSAYO $K_{IC}$ (RESUMEN)



### SECUENCIA:

- 1) Determinación de  $P_Q$ .
- 2) Obtención de  $K_Q$ .

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

- 3) Aplicación de condiciones de representatividad.

$$0.45 \leq \frac{a}{W} \leq 0.55 \quad \leftarrow \text{Fisura profunda para garantizar un elevado confinamiento (conservadurismo).}$$

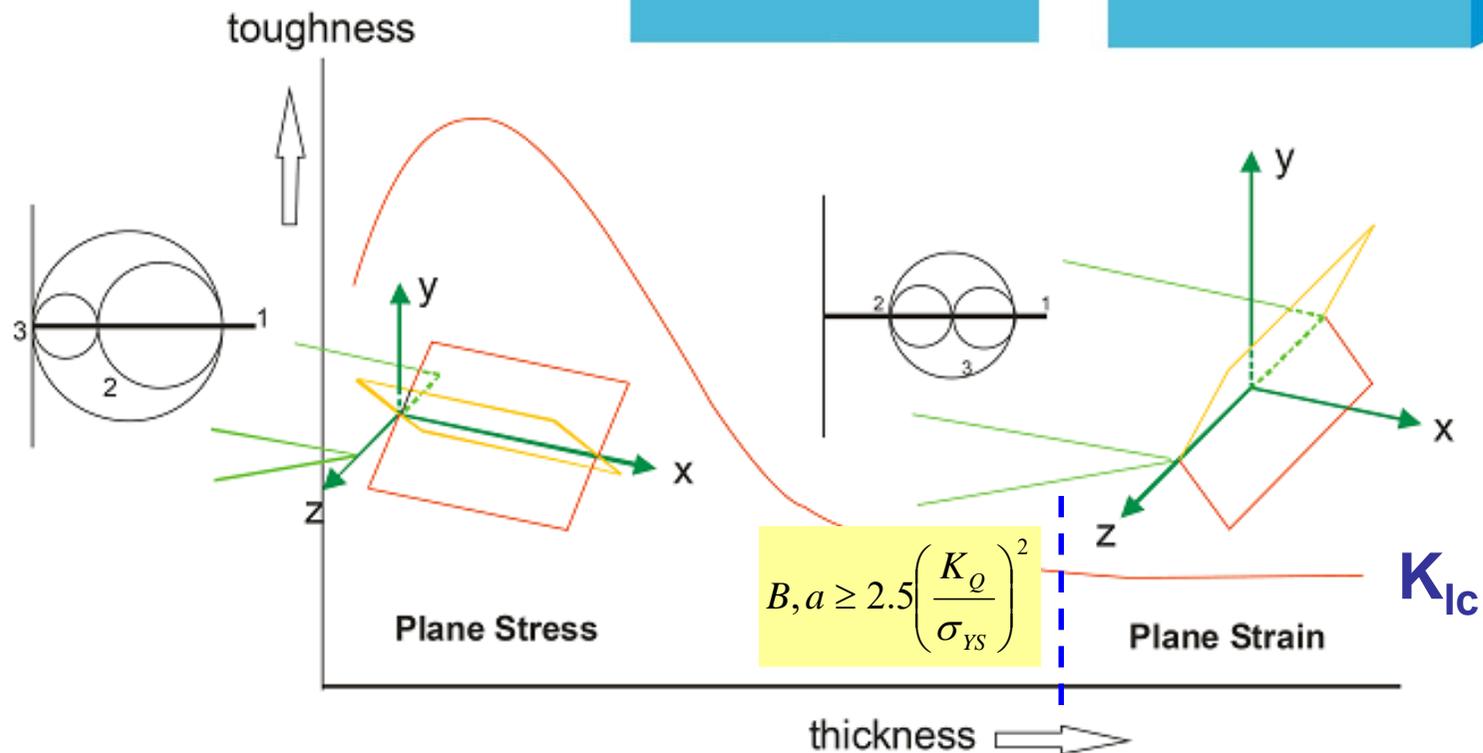
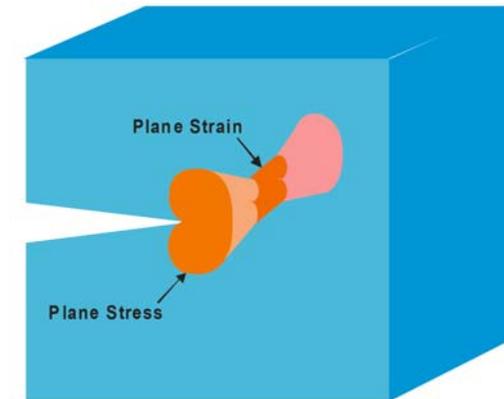
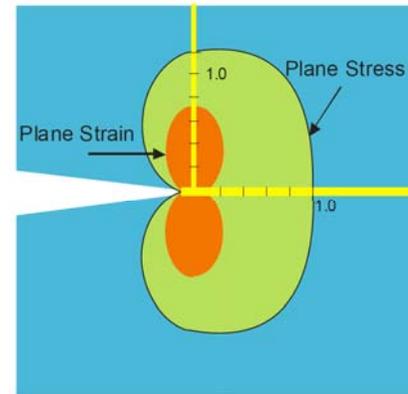
$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad \leftarrow \text{Condiciones de deformación plana (conservadurismo)}$$

$$P_{\max} \leq 1.10 P_Q \quad \leftarrow \text{Representatividad}$$

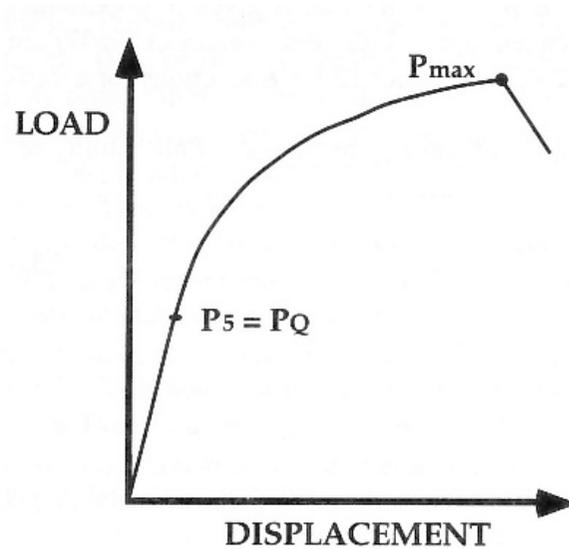
## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

### TP Vs. DP:

- Las condiciones de triaxialidad varían a lo largo del frente de fisura



## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL

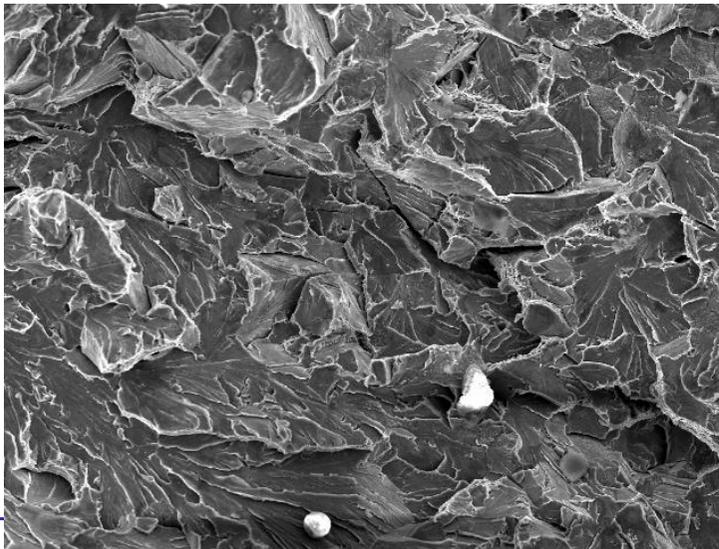
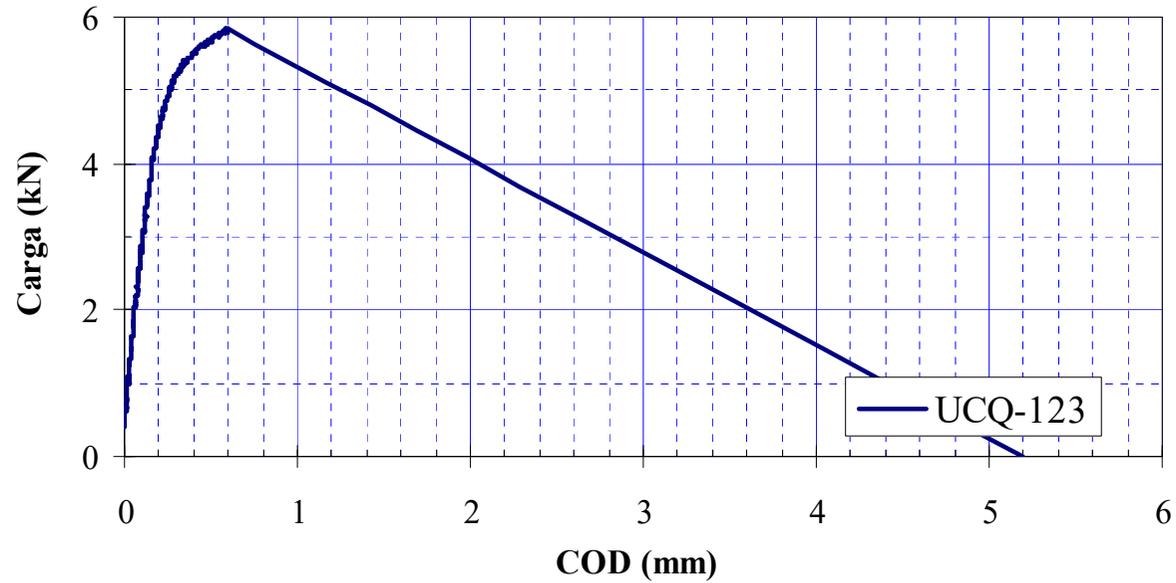


$$P_{\max} \leq 1.10P_Q$$

### REPRESENTATIVIDAD:

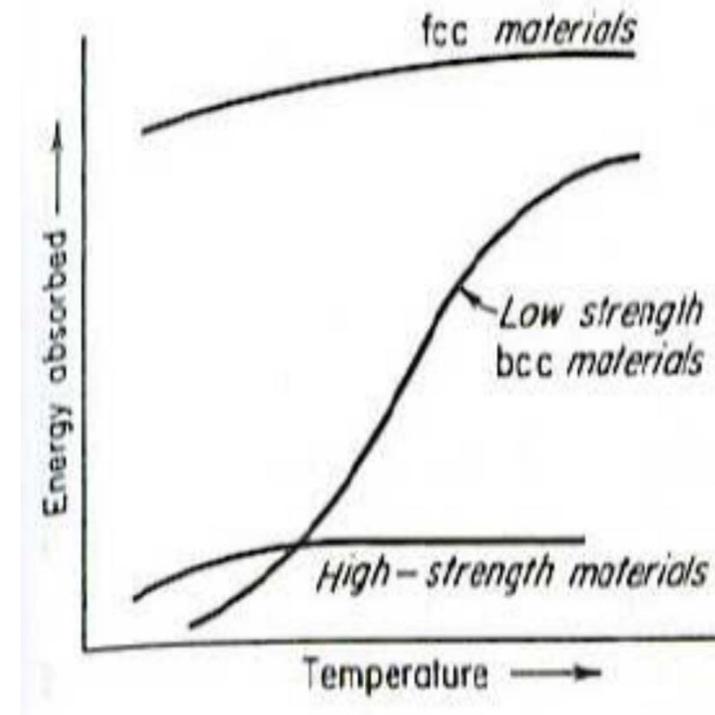
- Si no se cumple esta condición,  $P_Q$  difícilmente representará la rotura en este material.

## 6. CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD EN MFEL



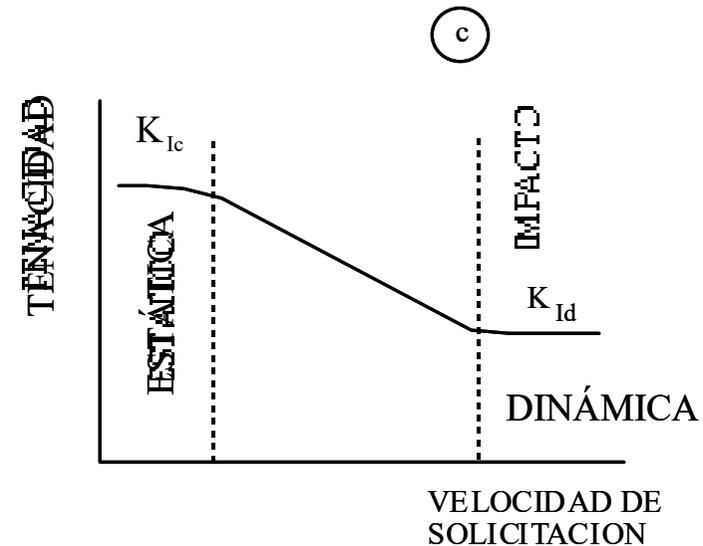
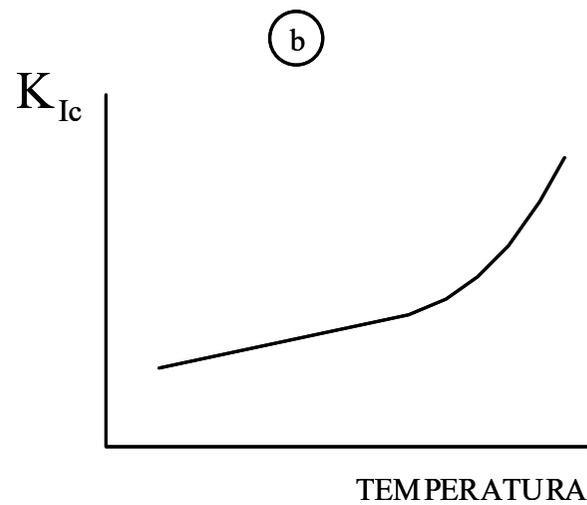
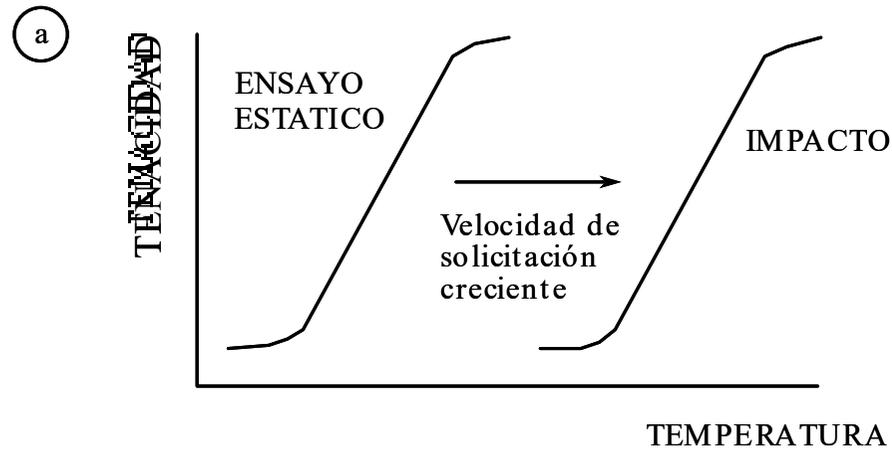
## 7. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TENACIDAD

- Temperatura.
- Velocidad de sollicitación.
- Orientación.
- Tamaño de grano.
- Irradiación neutrónica (aceros).
- Contenido de carbono (aceros).
- Otros...



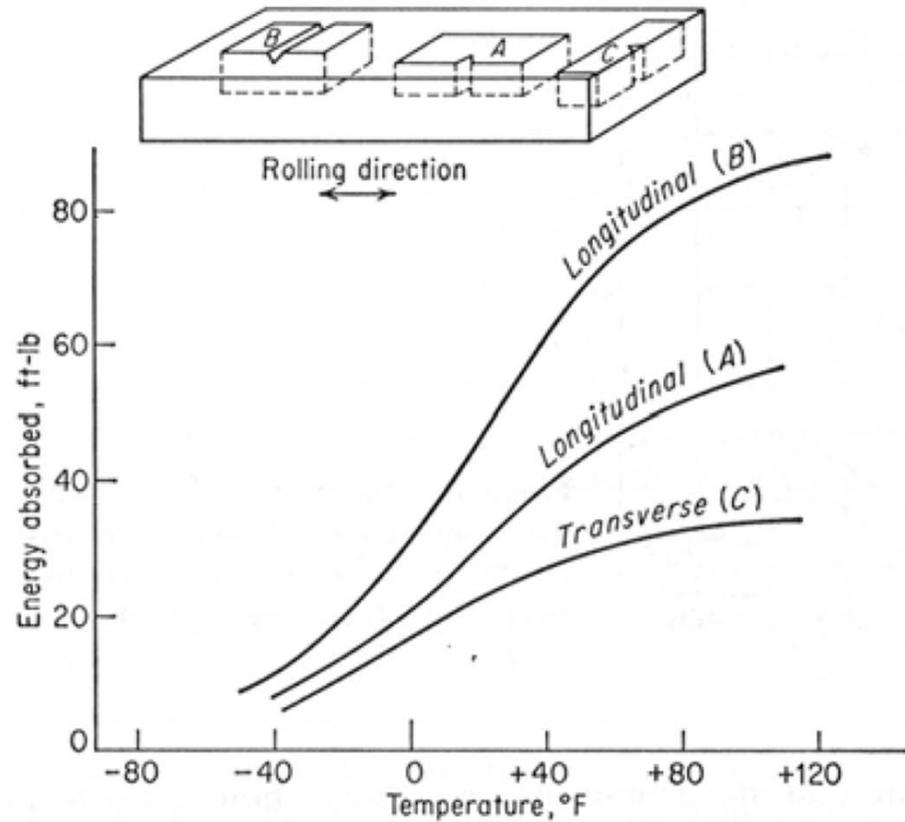
## 7. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TENACIDAD

- **Velocidad de sollicitación.**



## 7. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TENACIDAD

- **Orientación:**



➤ Rolled and forged products may have varying impact behaviour due to grain orientation.

➤ Note that the difference is not as large at lower temperatures.

## 7. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TENACIDAD

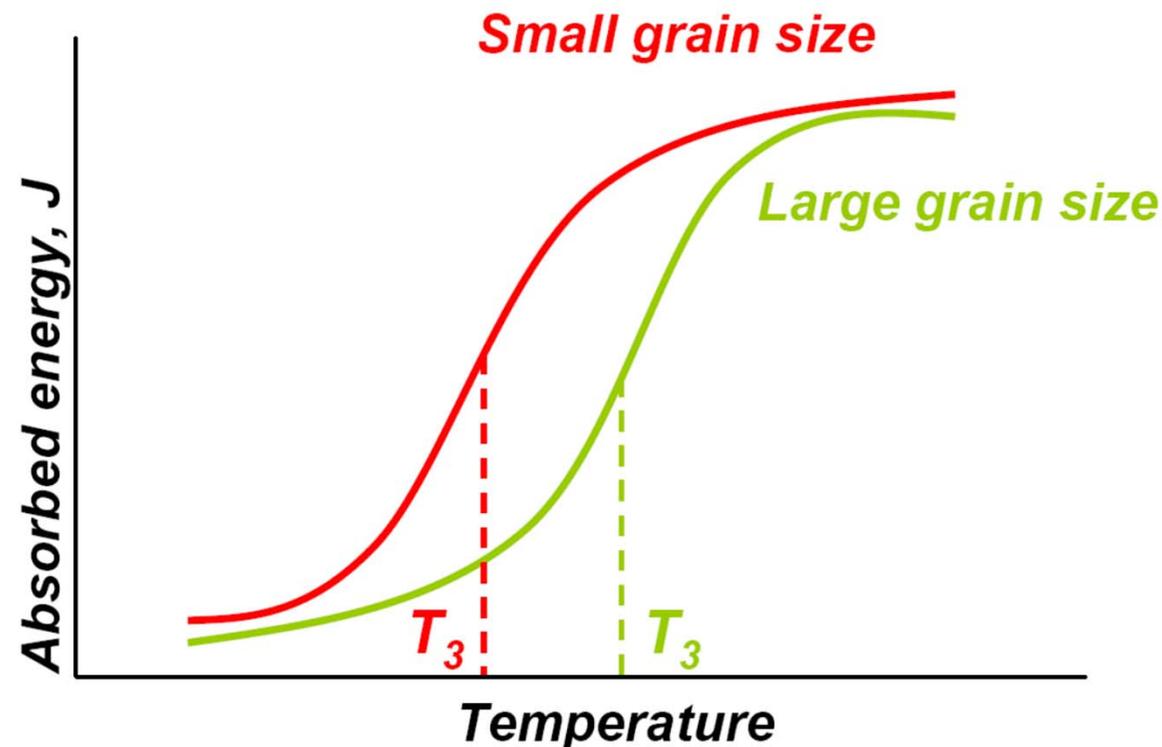
- Tamaño de grano:

- Grain size has a strong effect on transition temperature.

Grain size

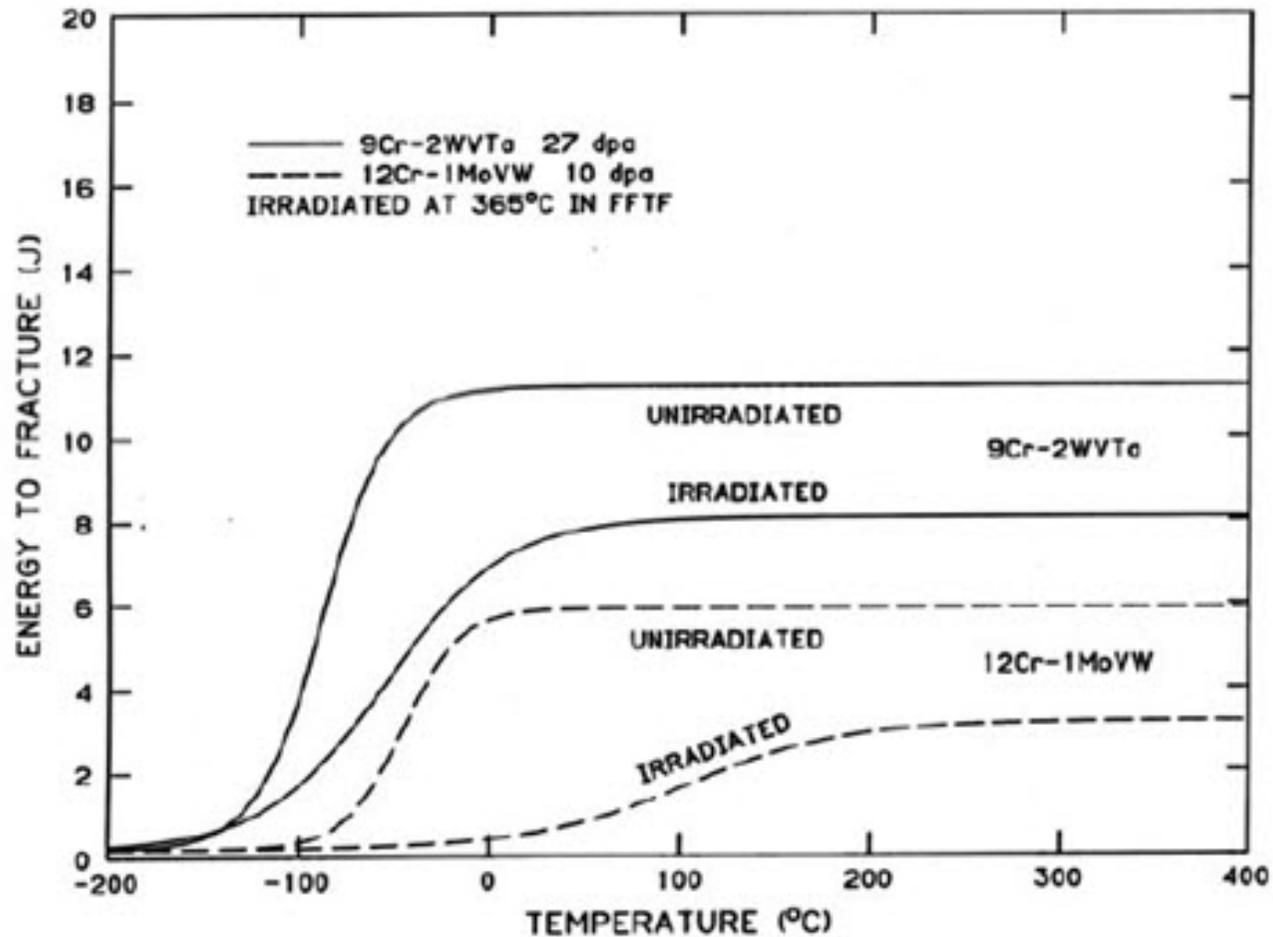


Transition temperature



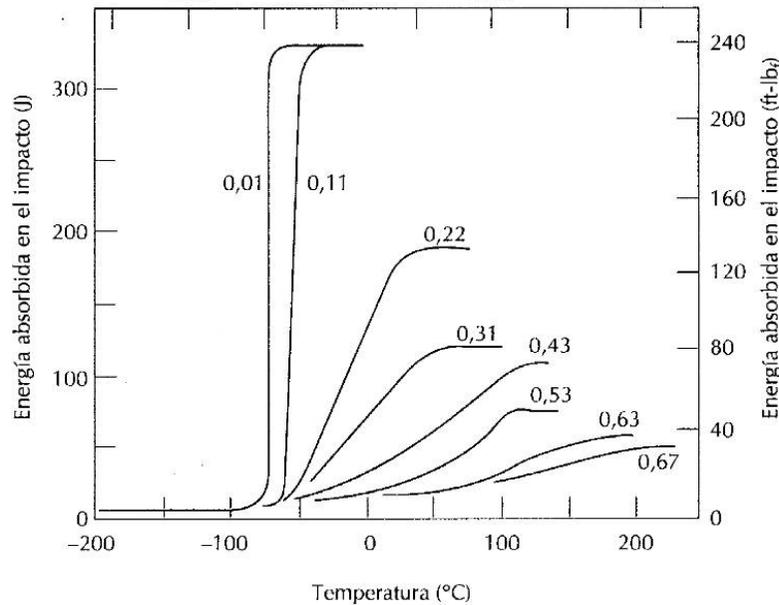
## 7. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TENACIDAD

- Irradiación:



## 7. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TENACIDAD

- **Contenido en carbono:**



➤ For steels: As  $\%C \uparrow \Rightarrow \sigma_y \uparrow, \sigma_{TS} \uparrow, H \uparrow, \%EI \downarrow, CVN \downarrow$  and  $T_T \uparrow$

- This can be countered by adding Manganese -  $Mn : C$  should be 3:1

➤ Phosphorous increases  $T_T$ ,  
Oxygen in steel increases  $T_T$ :

- semi-killed (add Si) and

- fully-killed (add Si + Al) to remove oxygen

Remember also: as grain size  $\downarrow$  toughness ..... and  $T_T \downarrow$ .  
*Niobium and vanadium* added to keep grain size small.

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

**MFEL:** Estado tensional alrededor de defecto

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos(\theta/2) \begin{Bmatrix} 1 - \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2) \\ \sin(\theta/2) \cos(\theta/2) \\ 1 + \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2) \end{Bmatrix}$$

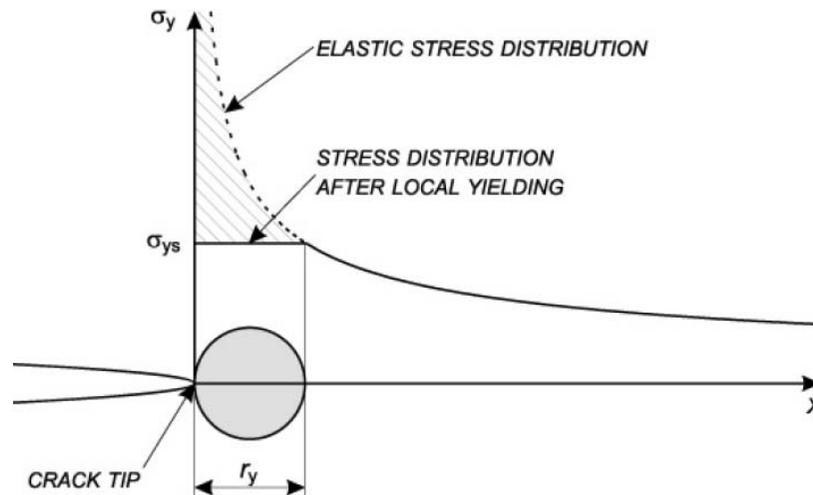
$$\sigma_{ij} = \frac{k}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{m/2} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad \Rightarrow \quad \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij} = \frac{k}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \Rightarrow \infty$$

- Los materiales estructurales plastifican cuando el estado tensional supera un cierto límite (Criterio de plastificación:  $\sigma_{eq}(\sigma_{ij}) = \sigma_y$ ).
- En tal caso, la solución elástica no es aplicable en todos los puntos del material.

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

### PRIMERA ESTIMACIÓN:

• Eje X ( $\theta=0$ ): 
$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} = \sigma_Y \Rightarrow r_Y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2$$



### LIMITACIONES:

- Describe la ZP como un círculo (en principio, cada dirección es diferente).
- No tiene en cuenta la redistribución tensional y, por lo tanto, no es una solución en equilibrio.
- Considera un material elástico-plástico perfecto.
- Subestima el tamaño de la ZP.
- No tiene en consideración la posible influencia de la triaxialidad (TP vs. DP).

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

### APROXIMACIÓN DE IRWIN:

- Intento de tener en consideración la redistribución de tensiones.
- Sigue siendo una solución simplista:
  - Geometría circular de la ZP (análisis en  $\theta=0$ ).
  - Material elástico-plástico perfecto en condiciones de TP (nota: solución conveniente; también podría haber trabajado en DP).
- Concepto de **fisura equivalente**: la plasticidad implica una menor rigidez del componente lo cual puede describirse aproximadamente, imponiendo la existencia de una fisura ligeramente mayor que la fisura real en la estructura (a).

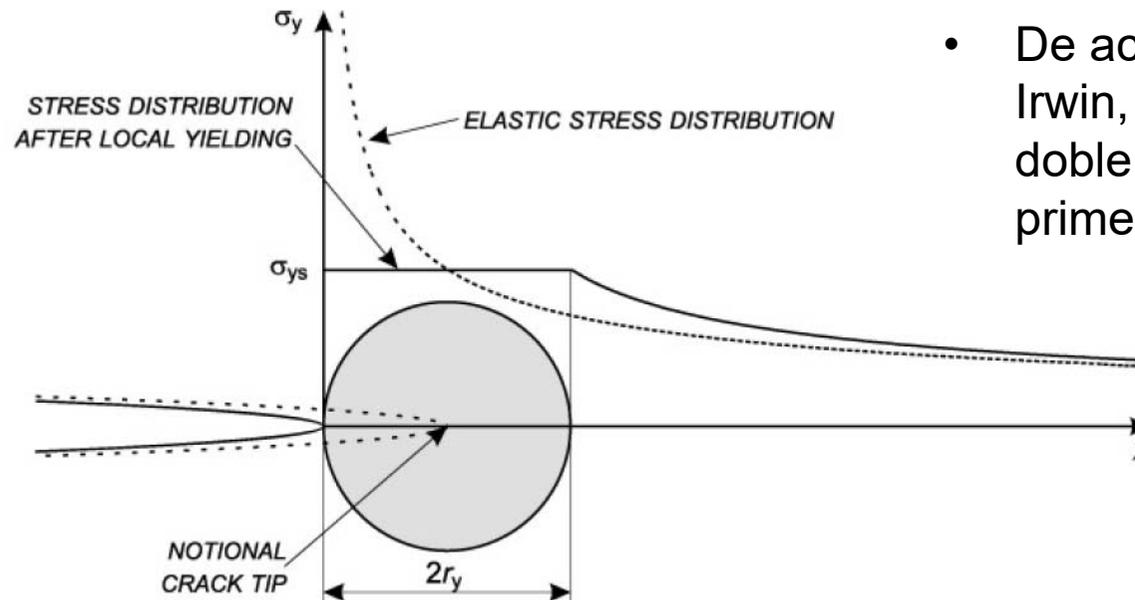
$$a_{ef} = a + \Delta a$$

A determinar imponiendo condiciones de equilibrio local en el frente de fisura

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

APROXIMACIÓN DE IRWIN:  $\Delta a = r_Y$

TAMAÑO DE LA ZP:  $r_P \approx 2 r_Y$



- De acuerdo con el modelo de Irwin, el tamaño de la ZP es el doble que el obtenido en primera aproximación

$$r_P = 2r_Y = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2$$

- El principal efecto de la plasticidad es que las tensiones se relajan en la ZP a costa de incrementarse fuera de ella.
- El FIT se expresa como:  $K_I = \sigma \sqrt{\pi(a + \Delta a)} = \sigma \sqrt{\pi(a + r_Y)}$
- Este procedimiento sólo resulta aplicable si  $r_Y \ll a$ .

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

### APLICACIÓN DEL MÉTODO:

1) Obtener el FIT para la fisura real ( $a$ ).

2) Calcular  $r_Y$ : 
$$r_Y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2$$

3) Obtener la fisura efectiva: 
$$a_{ef} = a + \Delta a$$

4) Recalcular el FIT: 
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi(a + r_Y)}$$

5) Iterar

- El FIT así calculado representa el estado tensional fuera de la ZP así como el tamaño de ésta; parece pues razonable que el FIT sea un parámetro válido de fractura incluso en SSY.

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

### DIFICULTAD:

- En el caso que nos ocupa no es preciso iterar:

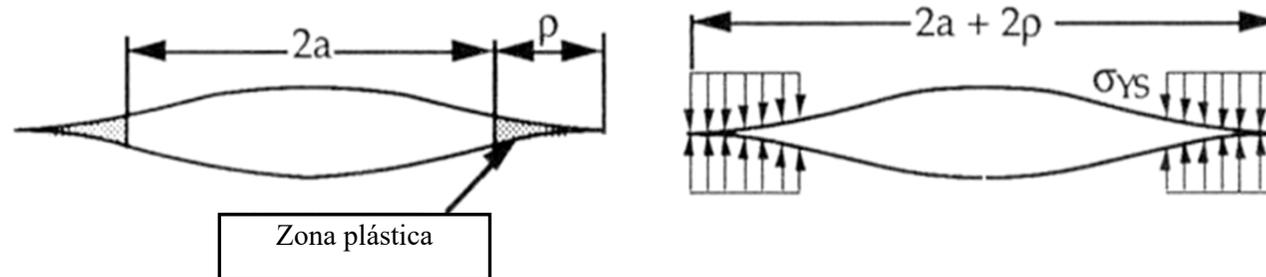
$$K_{I,ef} = \sigma \sqrt{\pi \left[ a + \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_{I,ef}}{\sigma_Y} \right)^2 \right]} \Rightarrow K_{I,ef} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^2}}$$

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

Zona plástica en el frente de la fisura  $\approx$  fisura teórica más larga

Dugdale:

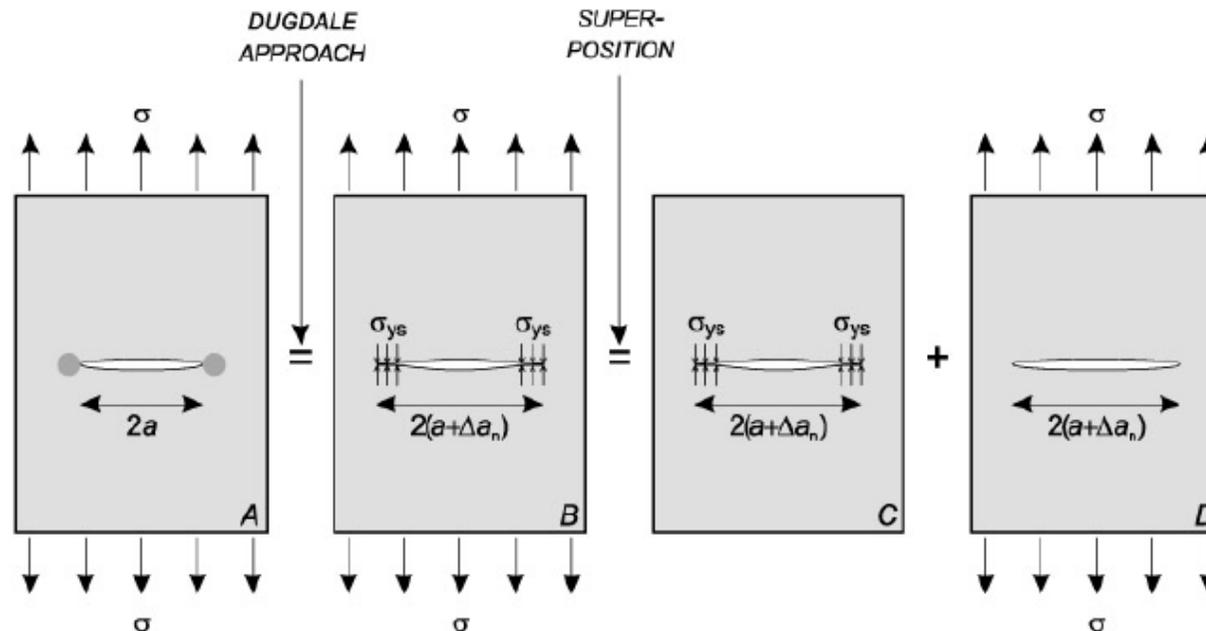
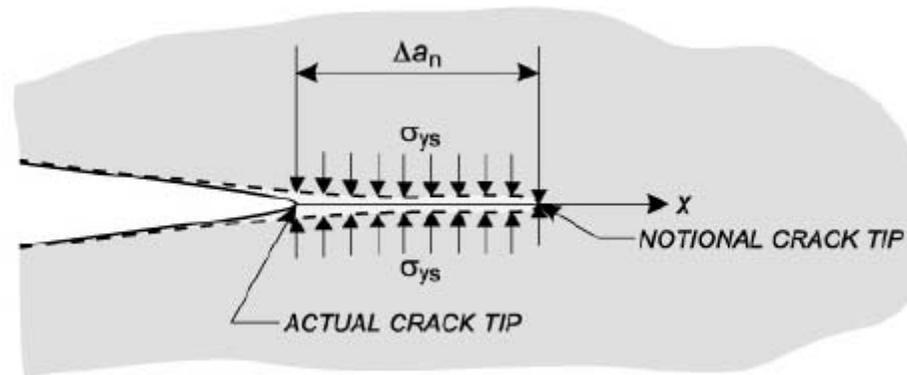
Fisura de  $2a$  se asimila como  $2a + 2\rho$



Los extremos de la fisura que plastifican,  $\rho$ , están sometidos a una tensión de cierre igual al límite elástico,  $\sigma_{ys}$

La solución al problema elastoplástico puede descomponerse en 2 soluciones elásticas.

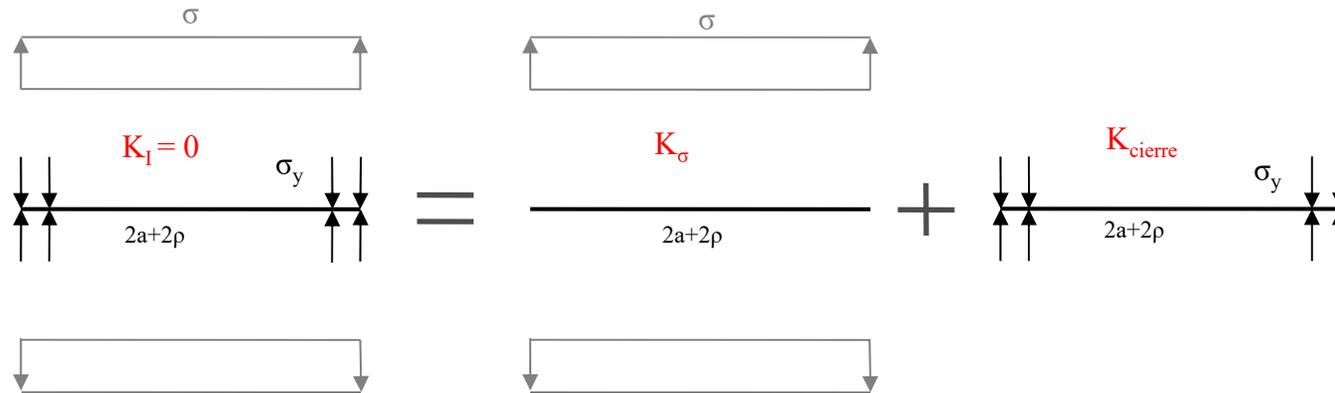
## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)



## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

Fisura bajo  $\sigma$  uniforme

Fisura bajo  $\sigma$  de cierre



$$K_{cierre} = -2\sigma_y \sqrt{\frac{a+\rho}{\pi}} \cos^{-1}\left(\frac{a}{a+\rho}\right)$$

$$K_\sigma = \sigma [\pi(a+\rho)]^{1/2}$$

$$K_I = K_\sigma + K_{cierre} = 0$$



$$\rho = \frac{\pi^2 \sigma^2 a}{8\sigma_y^2} = \frac{\pi}{8} \left( \frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2$$

Recordando que Irwin:

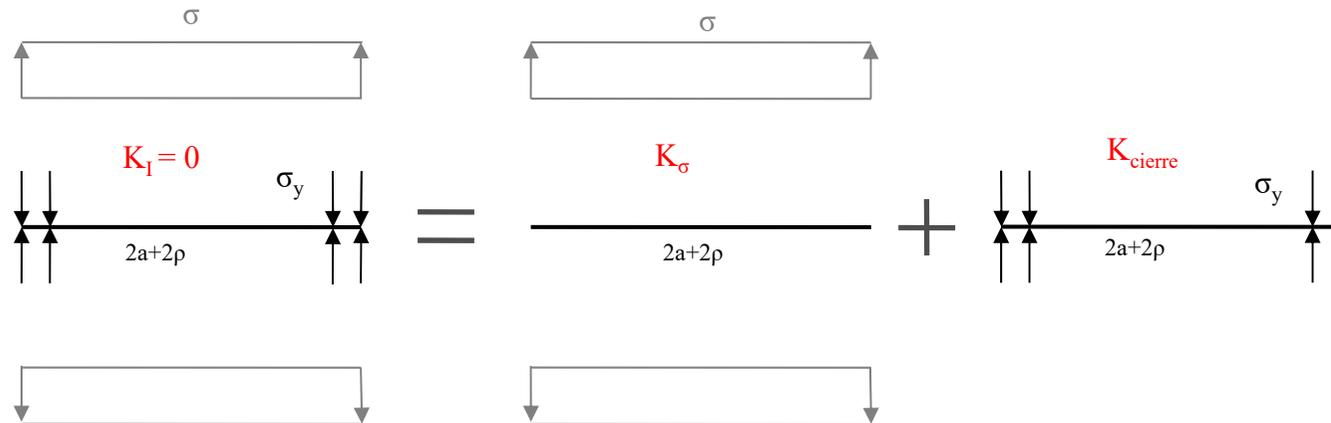
$$r_p = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_y}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

### Dugdale y Barenblatt: PPIO DE SUPERPOSICIÓN

Fisura bajo  $\sigma$  uniforme

Fisura bajo  $\sigma$  de cierre



Desaparece la singularidad en el frente

Se obtiene un  $K_{\text{eff}}$  para una longitud de fisura  
 $a_{\text{eff}} = a + \rho$  (Burdekin y Stone)

$$K_{\text{eff}} = \sigma_y \sqrt{\pi a} \left[ \frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left( \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_y} \right) \right]^{1/2}$$

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

Finalmente se obtiene el factor de intensidad de tensiones efectivo  $K_{eff}$  considerando una longitud de fisura  $a_{eff} = a + \rho$

$$K_{eff} = \sigma \sqrt{\pi \cdot a \cdot \sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_y}\right)}$$

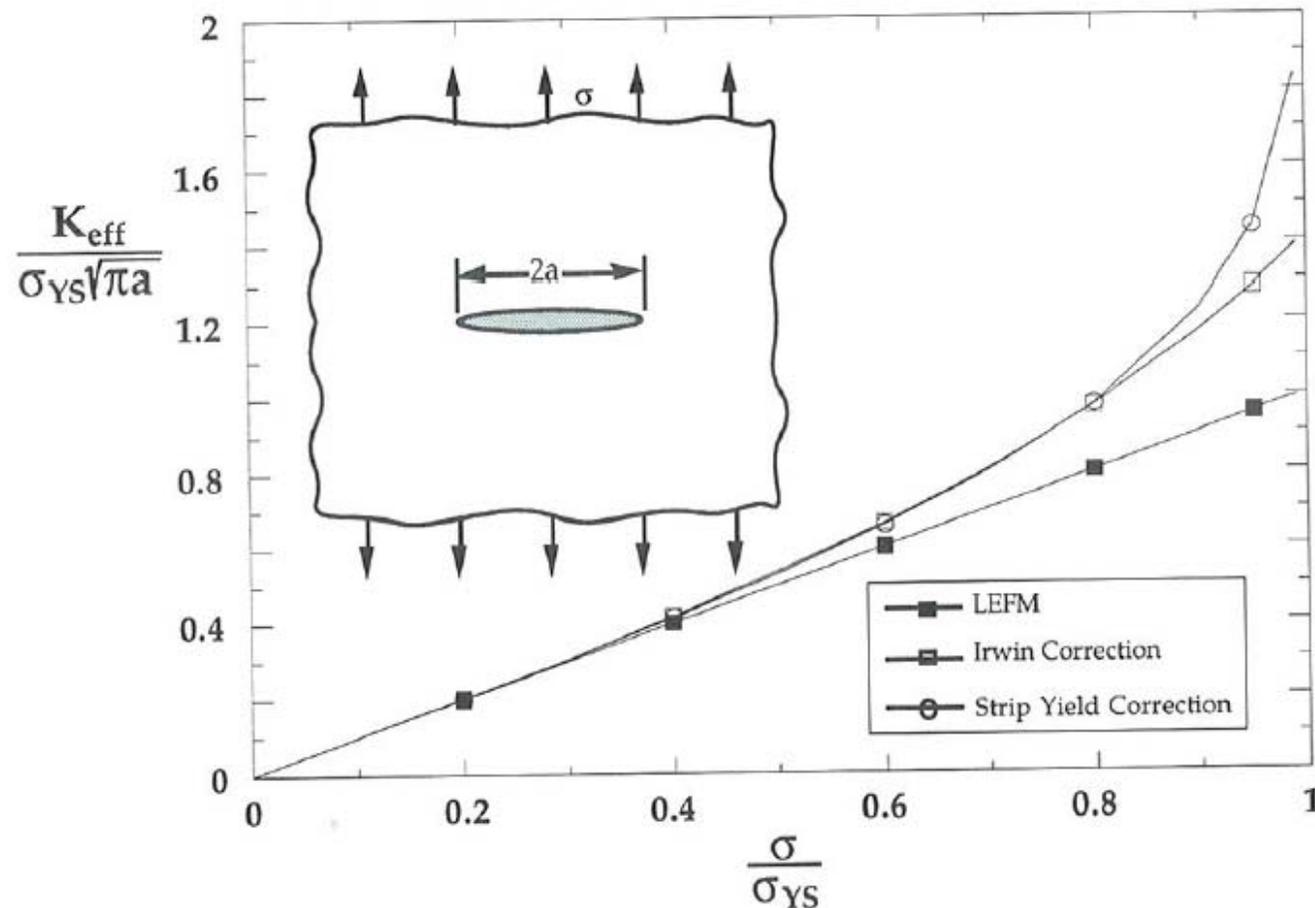
Esta ecuación tiende a sobreestimar  $K_{eff}$

Buderkin y Stone: modelo de estimación de  $K_{eff}$  más realista

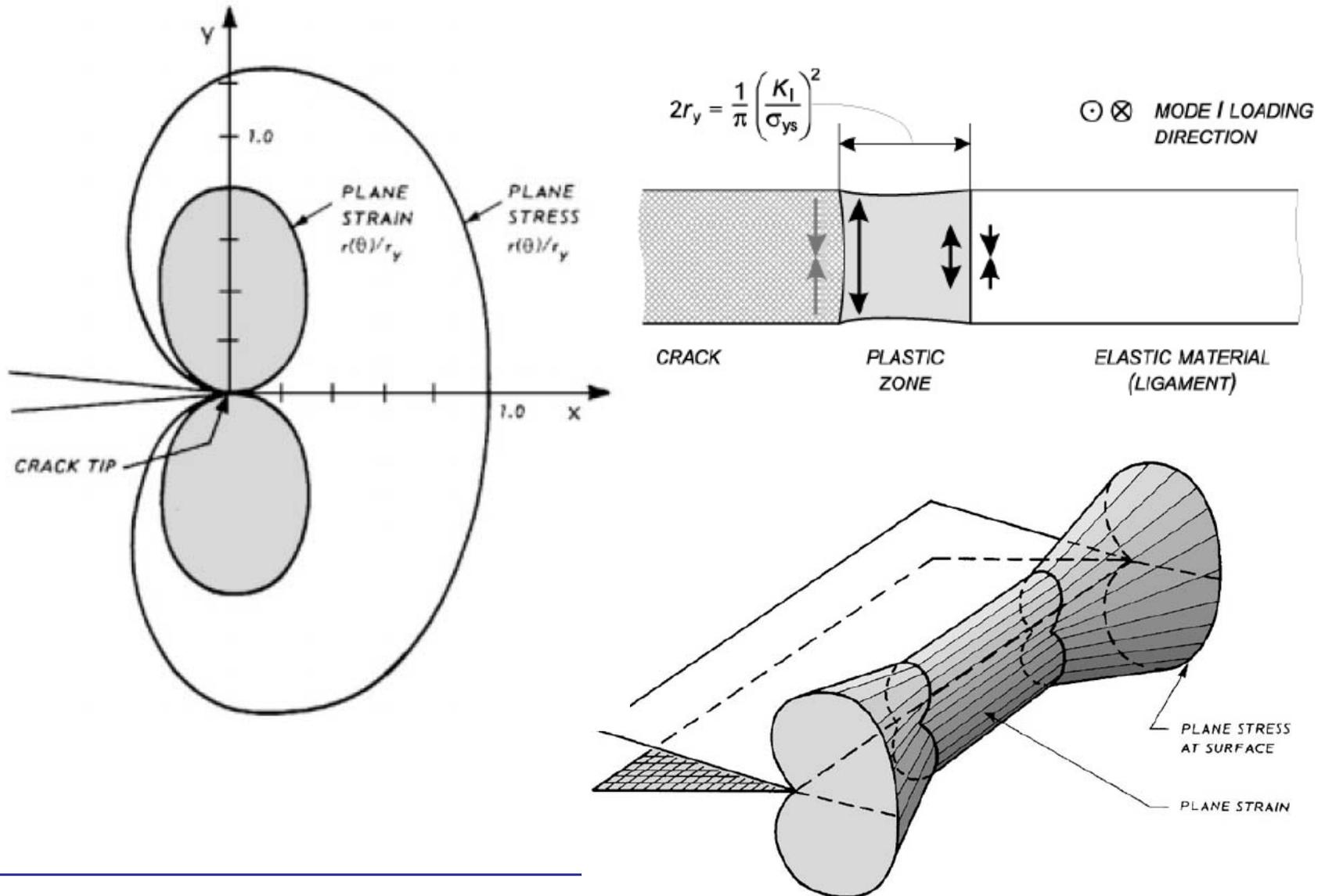
$$K_{eff} = \sigma_y \sqrt{\pi a} \left[ \frac{8}{\pi^2} \ln \sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_y}\right) \right]^{1/2}$$

## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

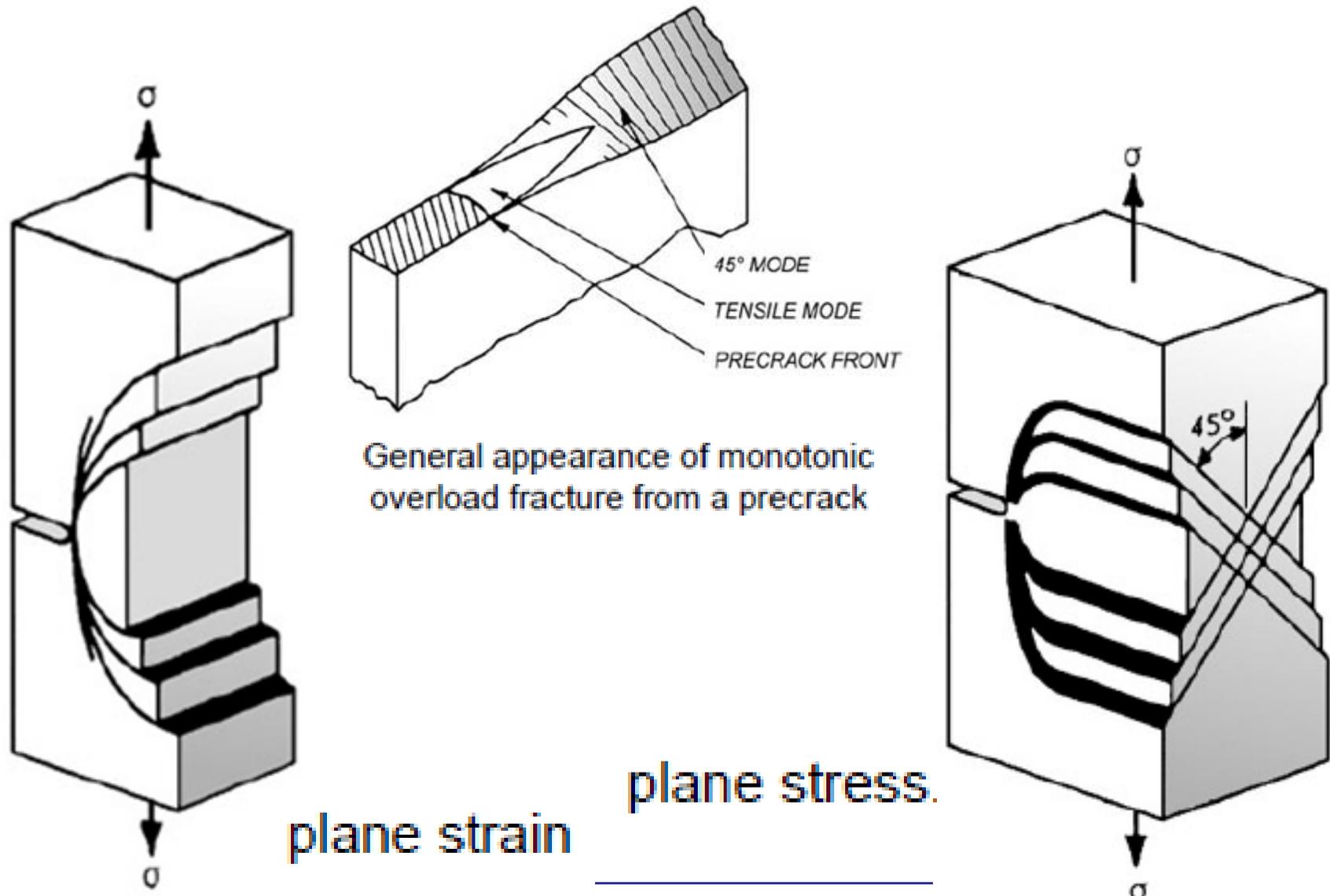
$$K_{eff} = \sigma \sqrt{\pi a \sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{YS}}\right)} \quad K_{eff} = \sigma_{YS} \sqrt{\pi a} \left[ \frac{8}{\pi^2} \ln \sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_{YS}}\right) \right]^{1/2}$$



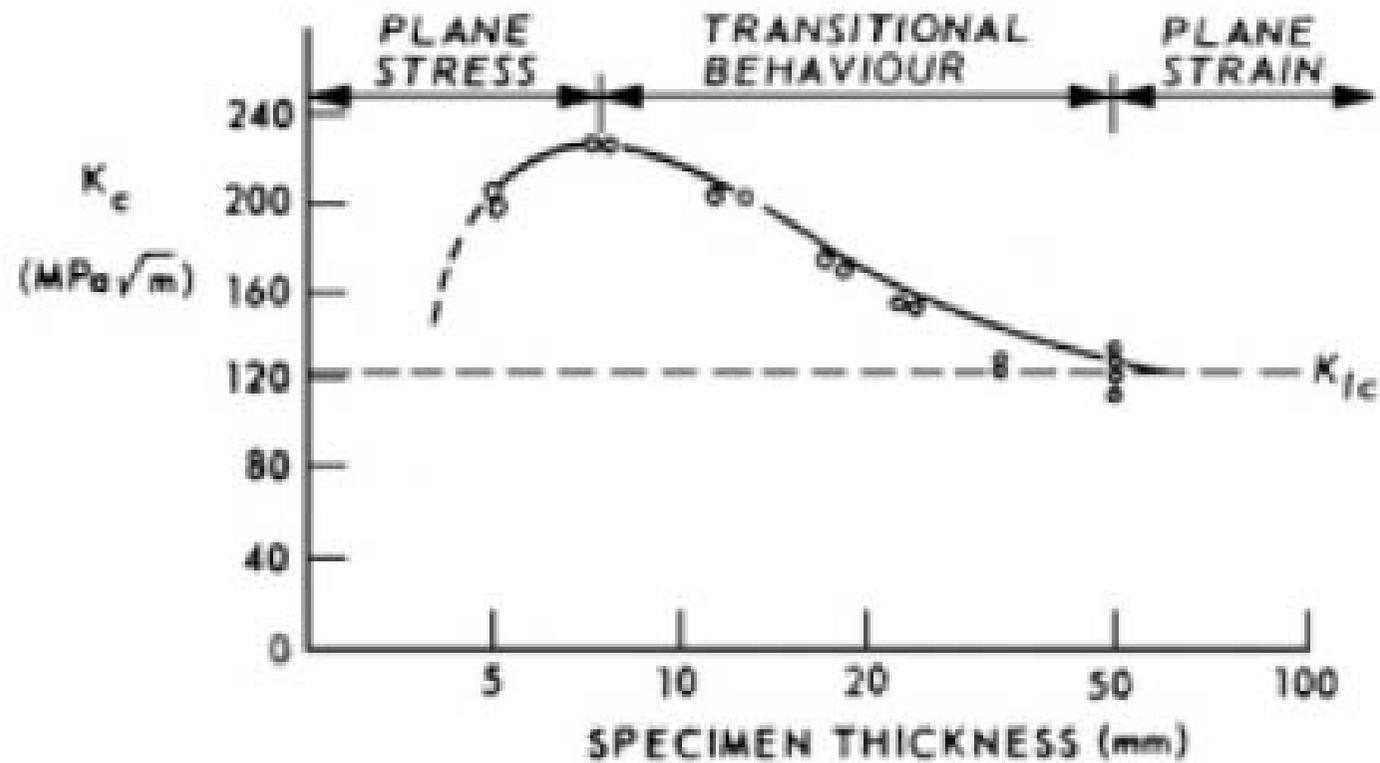
## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)



## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

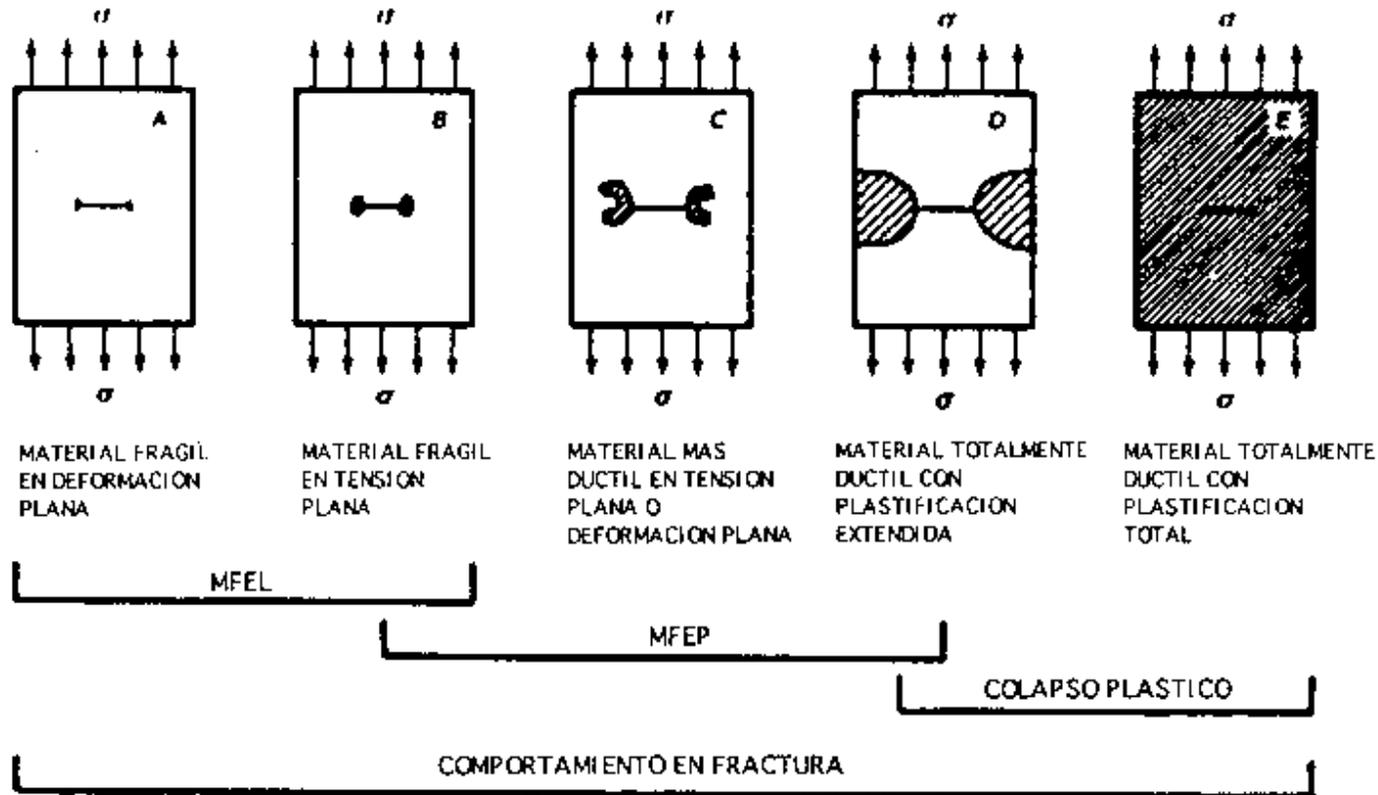


## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)



## 8. LA PLASTICIDAD EN LA FRACTURA (MFEP)

### DE LA MFEL A LA PLASTICIDAD GENERALIZADA:



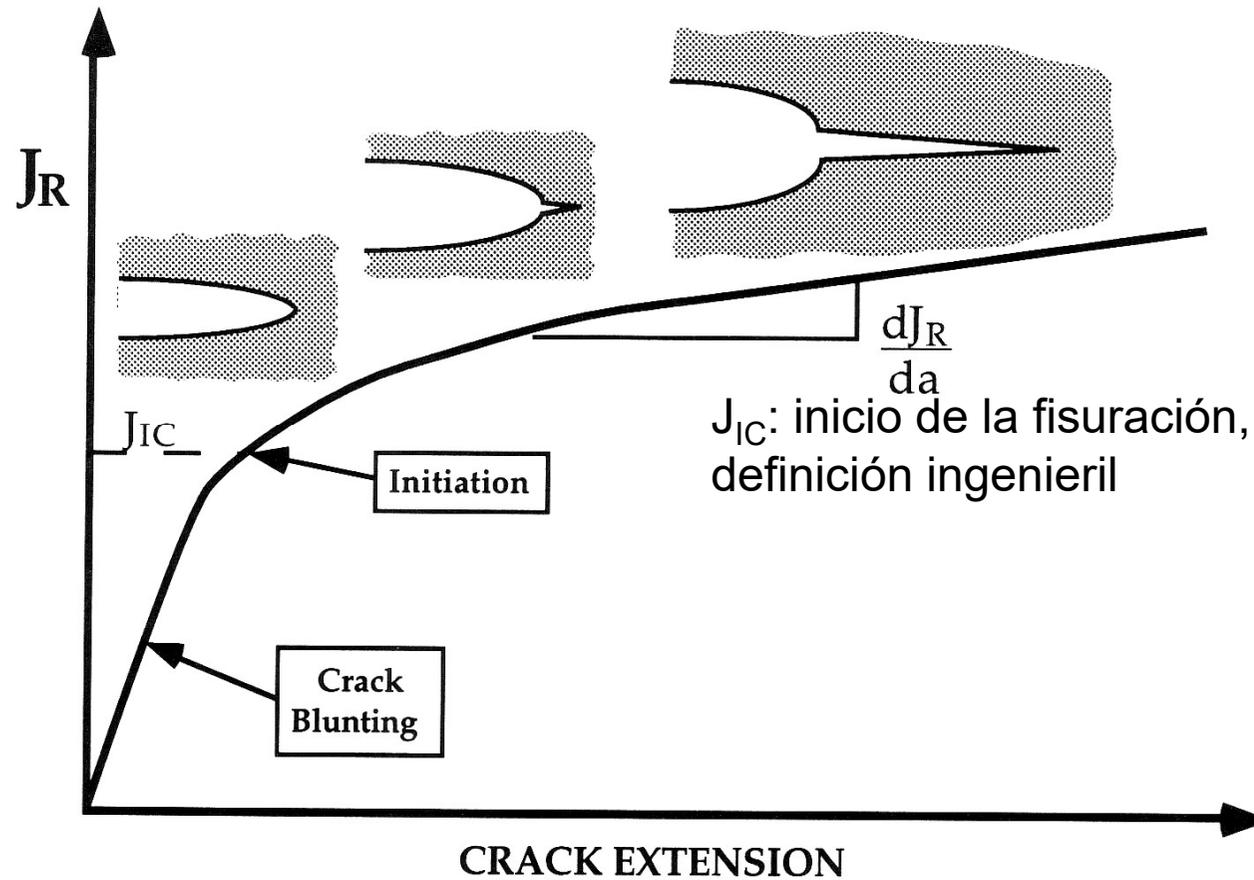
Evaluación global mediante **Diagramas de Fallo**

Lección 6: Caracterización en fractura

## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{IC}$

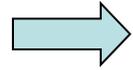
#### Curva $J-\Delta a$



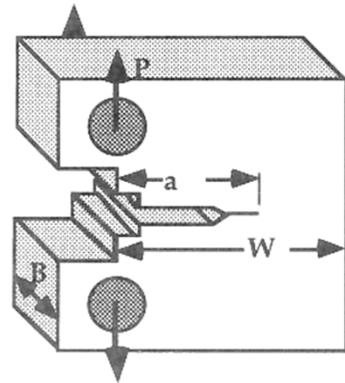
## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{Ic}$

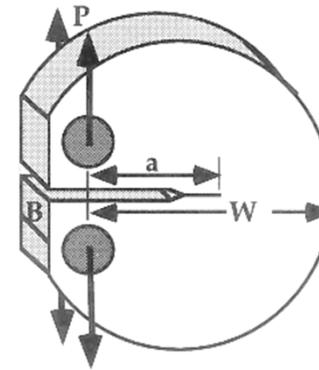
PROBETAS



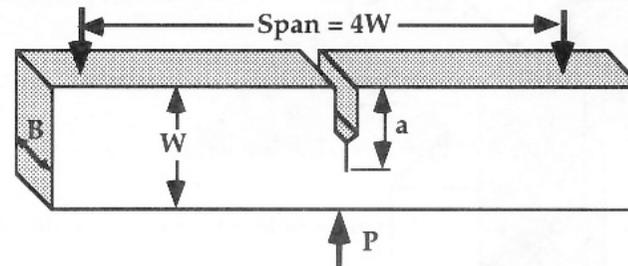
$$B, b_0 > 25 \frac{J_Q}{\sigma_y}$$



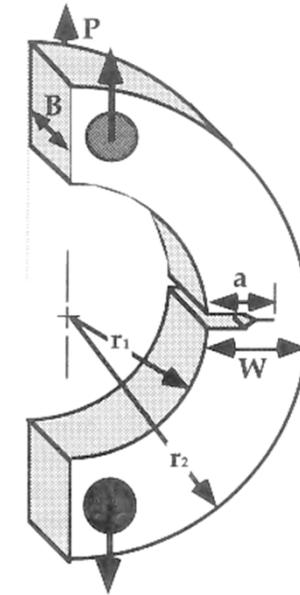
(a) Compact specimen.



(b) Disk shaped compact specimen.



(c) Single edge notched bend (SENB) specimen.



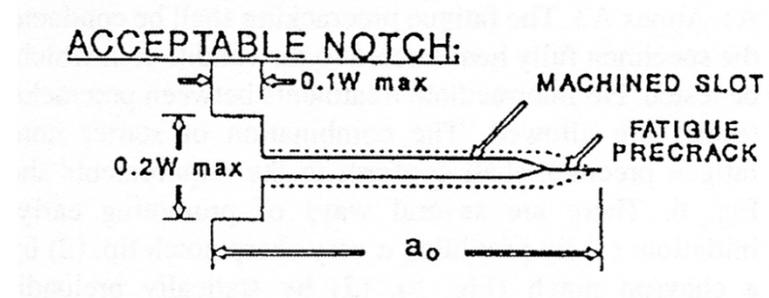
(d) Arc shaped specimen

## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{IC}$

#### PROBETAS (preparación)

- Prefisuración previa por fatiga
- Longitud inicial limitada  $a$  :  $0.45 < a/W < 0.7$
- La longitud de la prefisura ( $a_{pf}$ ) por fatiga debe cumplir:
  - $a_{pf} > 5 \% a_0$
  - $a_{pf} < 1.3 \text{ mm}$
- La carga de fatiga durante la prefisuración limitada a  $P_f$
- $P_f$  será función de la geometría:
  - SEB  $\rightarrow P_f = \frac{0.5 \cdot B \cdot b_0^2 \cdot \sigma_y}{S}$ ; donde  $b_0 = (w - a_0)$
  - CT  $\rightarrow P_f = \frac{0.4 \cdot B \cdot b_0^2 \cdot \sigma_y}{(2W + a_0)}$

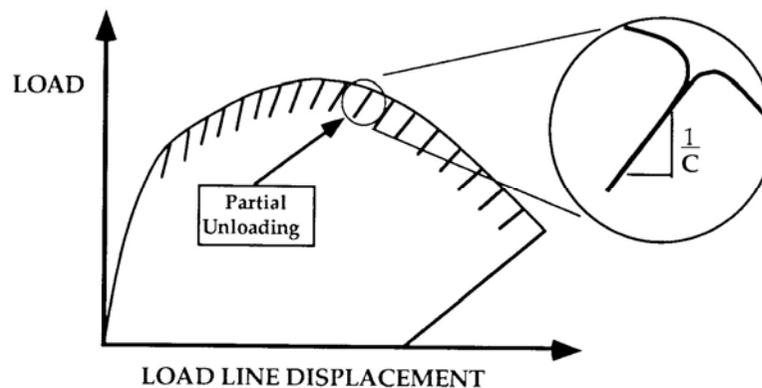


## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{IC}$ (PROBETA CT)

#### ❑ Métodos:

- Multiprobeta: para cada punto de la curva  $J-\Delta a$  se necesita una probeta (muy caro)
- Probeta única con descargas parciales: con una sola probeta se obtiene la curva completa. Cada punto se obtiene de una descarga (recomendado)

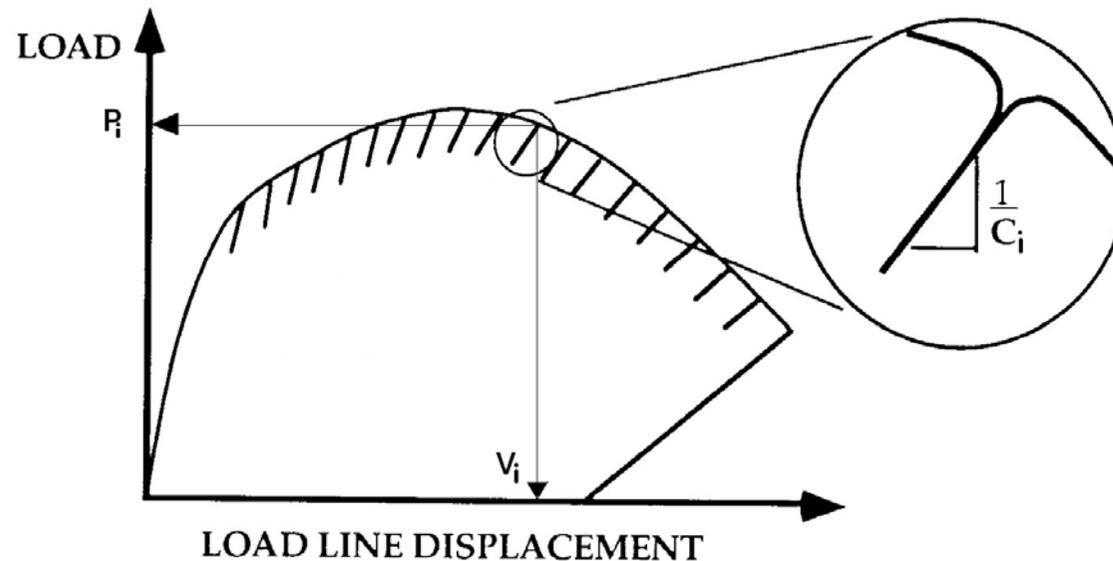


## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{Ic}$

### ENSAYO POR EL MÉTODO DE DESCARGAS MÚLTIPLES

- Para cada descarga se determina:  $P_i$ ,  $V_i$  y  $R_i = 1/C_i$
- Mayor pendiente implica mayor flexibilidad
- Mayor flexibilidad  $\rightarrow$  fisura mayor
- En cada descarga se calcula  $J$



## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{IC}$

#### DETERMINACIÓN DE $J$ [ $Nm^{-1} = Jm^{-2}$ ]

□  $J = J_{el} + J_{pl}$  (componentes elástica y plástica de la  $J$ )

□  $J_{el} = \frac{K_i^2(1 - \nu^2)}{E}$

□  $K_i = \frac{P_i}{\sqrt{BB_N W}} f\left(\frac{a_i}{W}\right)$

□  $f(a/W)$  depende de  
la geometría

$B_N$ : espesor neto  
(ranuras laterales)

| GEOMETRY                               | $f(a/W)^*$  |
|--|---|
| <p>Single Edge Notched Bend (SENB)</p> | $\frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} [1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\}]$ |
| <p>Compact Specimen</p>                | $\frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[ 0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.60 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$                               |

## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{IC}$

#### DETERMINACIÓN DE $J$ [ $FL^{-1}$ ]

□  $J = J_{el} + J_{pl}$

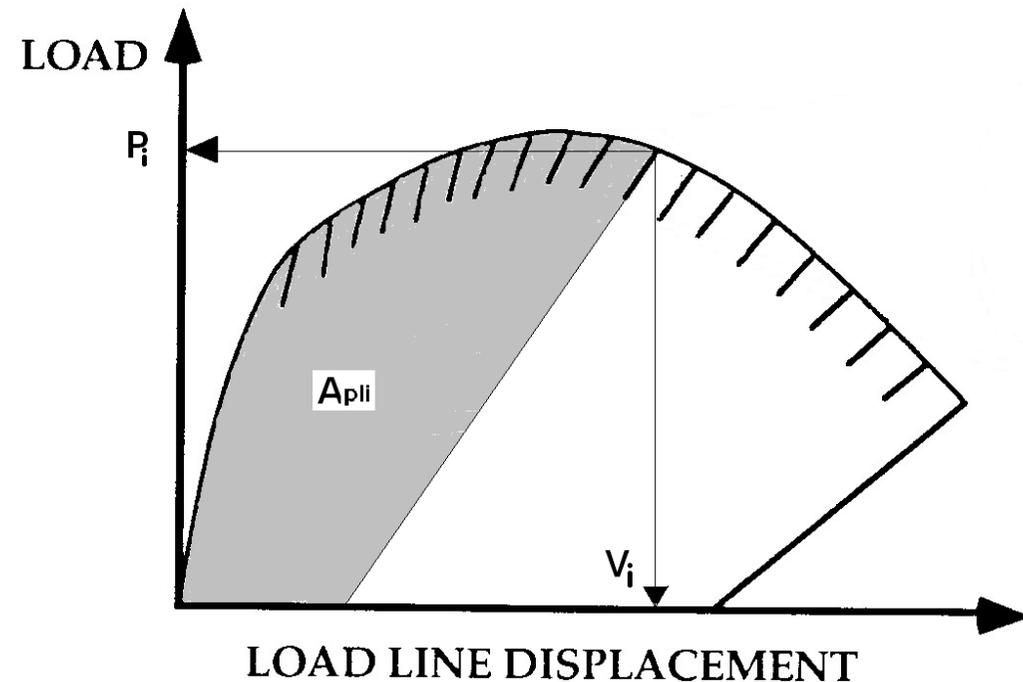
□  $J_{pli} = \frac{\eta A_{pli}}{B_N b_0}$

□  $A_{pli}$ : área plastica

correspondiente a cada  
descarga (i)

□  $\eta = f(\text{tipo de probeta})$

CT  $\rightarrow \eta = 2 + 0.522 \cdot b_0/W$



## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{IC}$

#### DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE FISURA, $a$

□  $1/C_i = f(a_i) \rightarrow$  cálculo de la fisura para cada descarga

□ Empleando una técnica de flexibilidad elástica para una CT:

$$a_i/W = [1.000196 - 4.06319 \cdot u + 11.242 \cdot u^2 - 106.043 \cdot u^3 + 464.335 \cdot u^4 - 650.677 \cdot u^5]$$

□ Donde:  $u = \frac{1}{\sqrt{B_e \cdot E \cdot C_{C(i)} + 1}}$

➤  $B_e = B - (B - B_N)^2/B$

➤  $C_{C(i)}$ : flexibilidad elástica medida sobre la secuencia  $i$  de descarga y recarga corregida por rotación

## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{IC}$ DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE FISURA, $a$

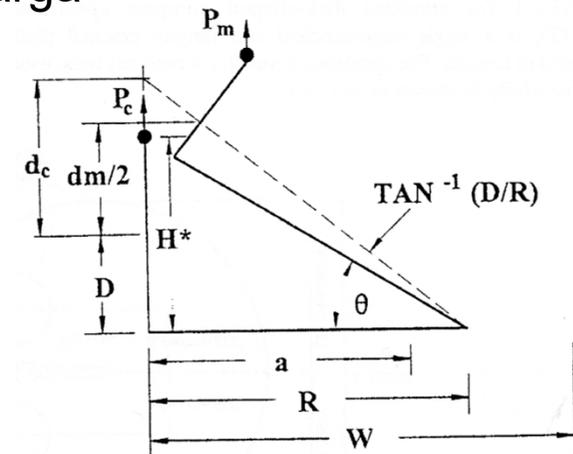
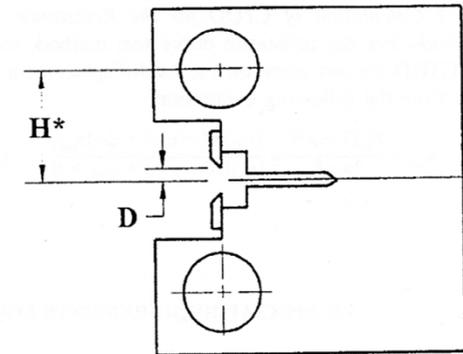
- ❑ **Flexibilidad corregida** por rotación:

$$C_{C(i)} = \frac{C_i}{\left[ \frac{H^*}{R} \operatorname{sen} \theta_i - \cos \theta_i \right] \left[ \frac{D}{R} \operatorname{sen} \theta_i - \cos \theta_i \right]}$$

- $C_i$ : flexibilidad medida en la descarga
- $H^*$ : semidistancia entre centros de agujeros de carga
- $R$ : radio de rotación de la fisura.  $R = (W + a)/2$
- $D$ : semidistancia entre apoyos del COD
- $\Theta$ : ángulo de rotación:

$$\theta = \operatorname{sen}^{-1} \left[ \frac{\left( \frac{d_m + D}{2} \right)}{\sqrt{D^2 + R^2}} \right] - \tan^{-1} \left( \frac{D}{R} \right)$$

- $d_m$ : desplazamiento total en la línea de carga



## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA

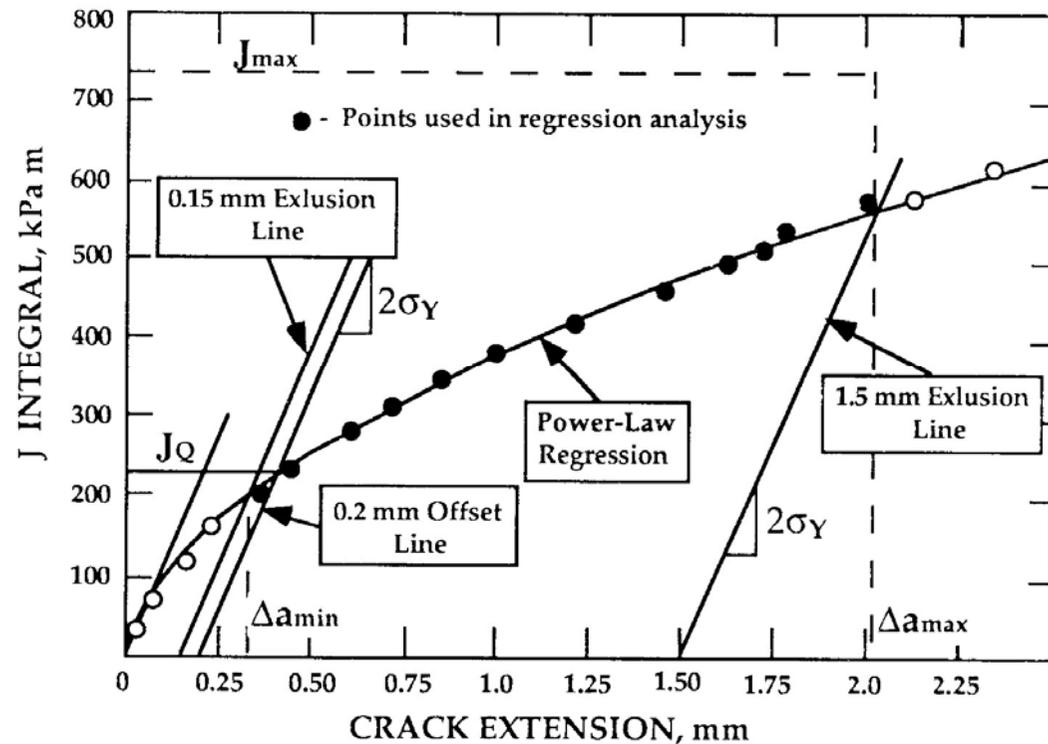
### ENSAYO $J_{IC}$ DETERMINACIÓN DE $J_{IC}$

- ❑ Zona valida: paralela por  $\Delta a = 0.15$  y  $1.5$ , con pendiente  $J/\Delta a = 2\sigma_y$
- ❑ Ajuste en zona válida de tipo:  $J = C_1(\Delta a)^{C_2}$
- ❑  $J_Q \rightarrow$  intersección del ajuste con paralela ( $2\sigma_y$ ) por  $0.2$  mm

$$J_{IC} = J_Q$$

↓

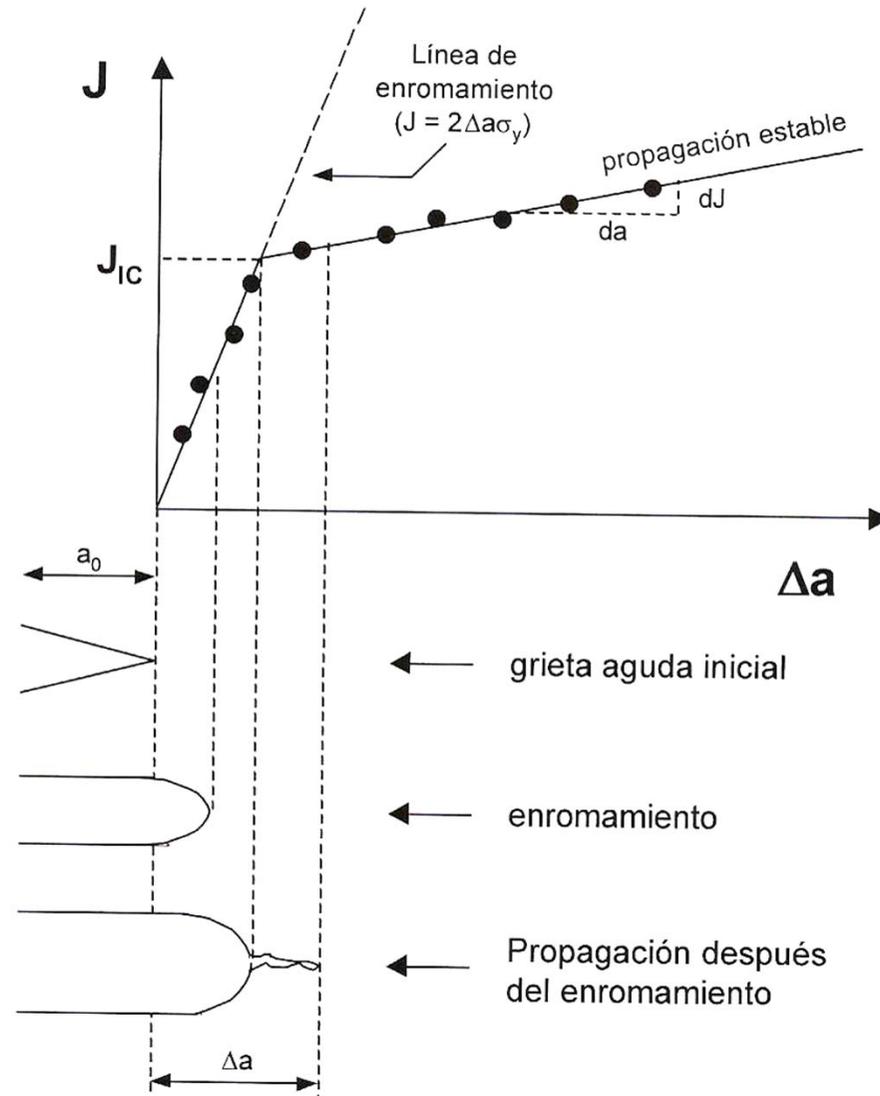
$$B, b_0 > 25 \frac{J_Q}{\sigma_y}$$



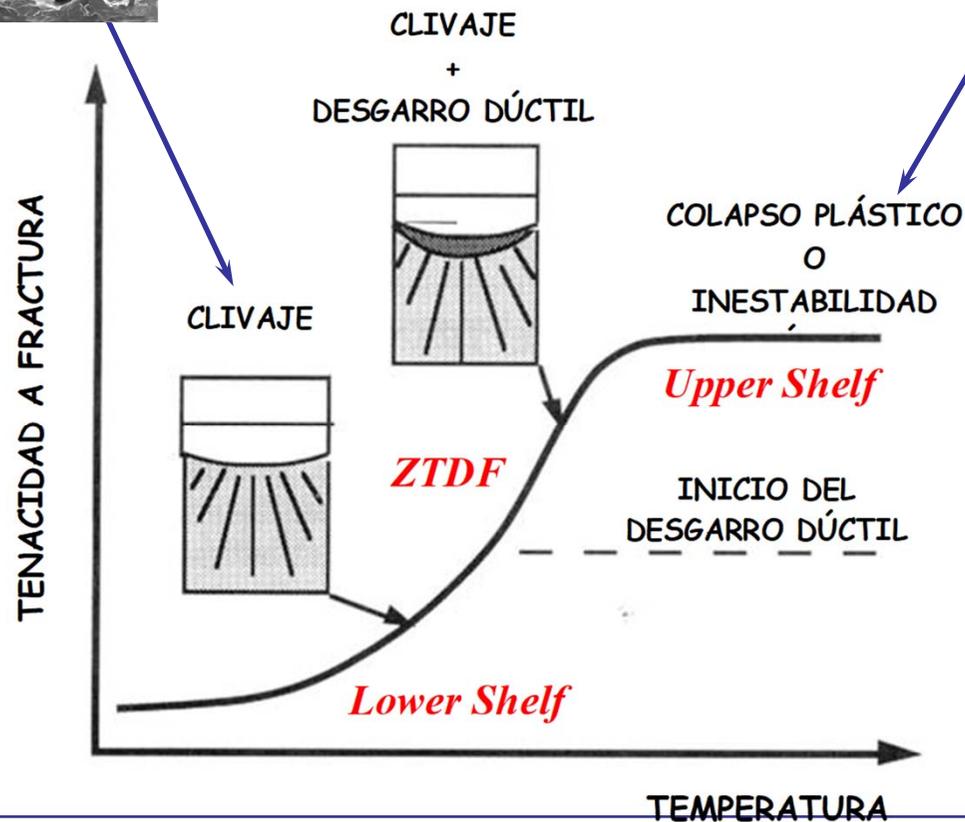
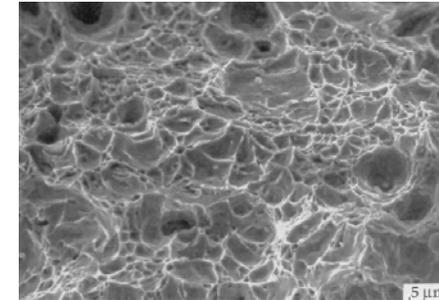
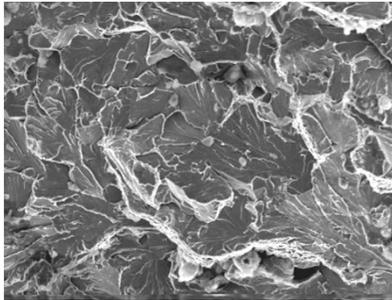
## 9. CARACTERIZACIÓN EN FRACTURA ELÁSTO-PLÁSTICA

### ENSAYO $J_{IC}$

### SIGNIFICADO FÍSICO DE LA CURVA J-R

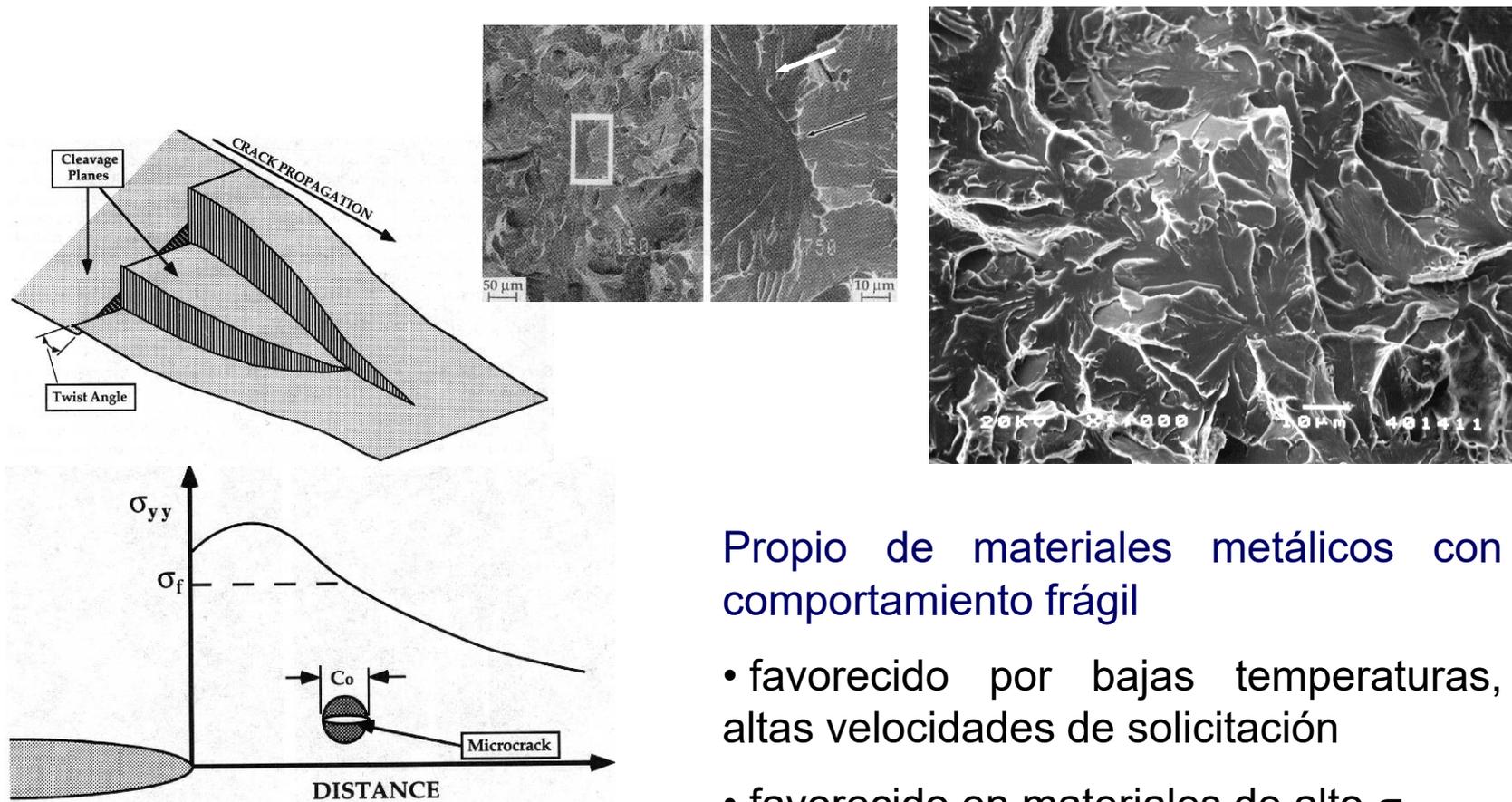


## 10. MICROMECHANISMOS DE FRACTURA



## 10. MICROMECHANISMOS DE FRACTURA

- **FRACTURA FRÁGIL: CLIVAJES**

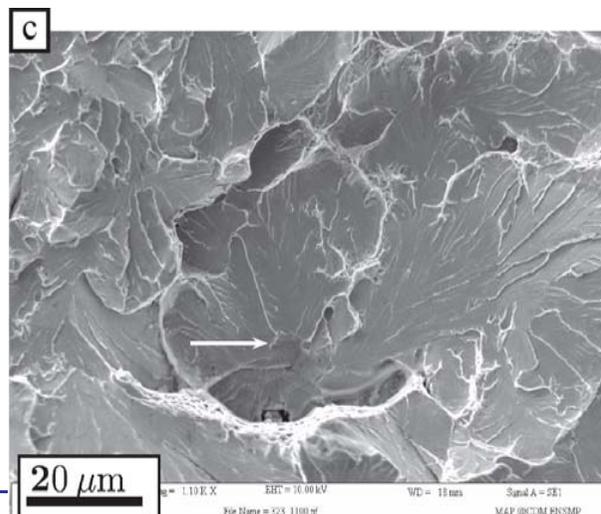
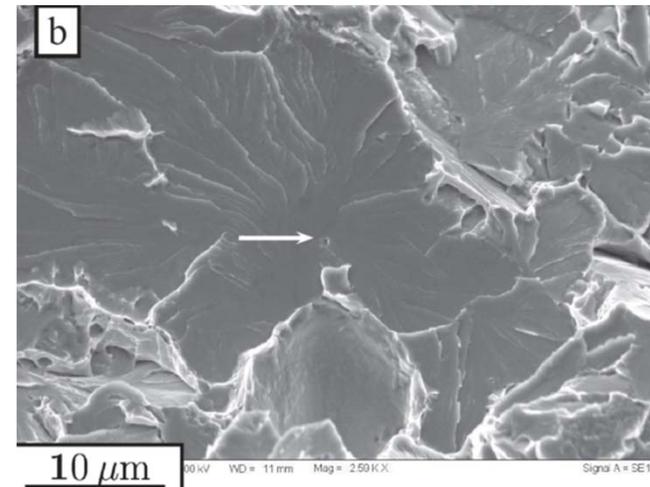
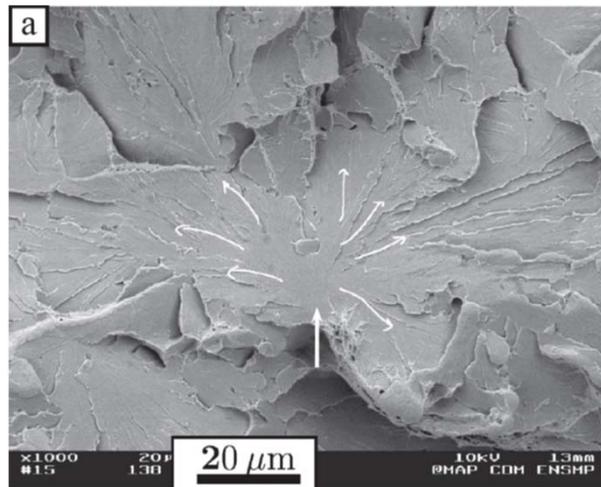


Propio de materiales metálicos con comportamiento frágil

- favorecido por bajas temperaturas, altas velocidades de sollicitación
- favorecido en materiales de alto  $\sigma_y$

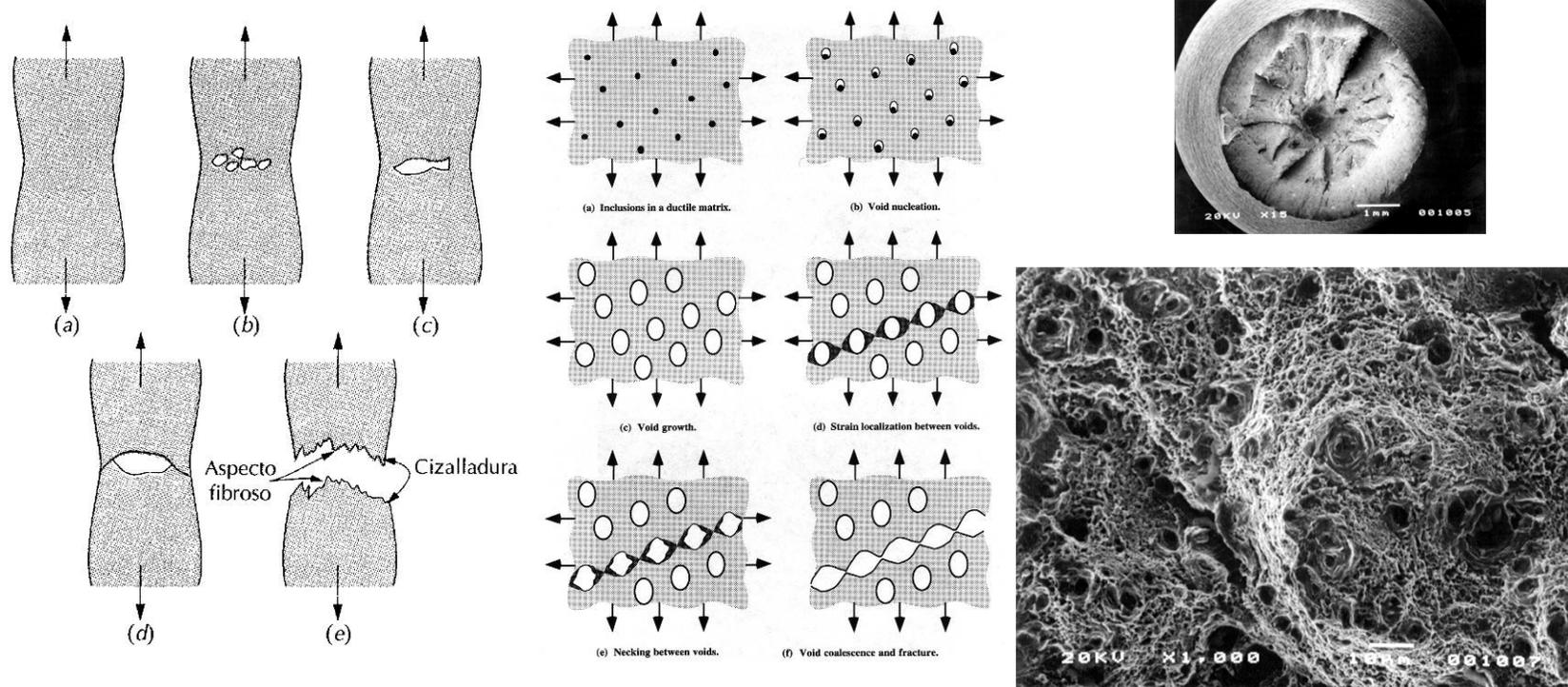
## 10. MICROMECHANISMOS DE FRACTURA

- **FRACTURA FRÁGIL: CLIVAJES**



## 10. MICROMECHANISMOS DE FRACTURA

- **FRACTURA DÚCTIL: FORMACIÓN, CRECIMIENTO Y COALESCENCIA DE MICROHUECOS**

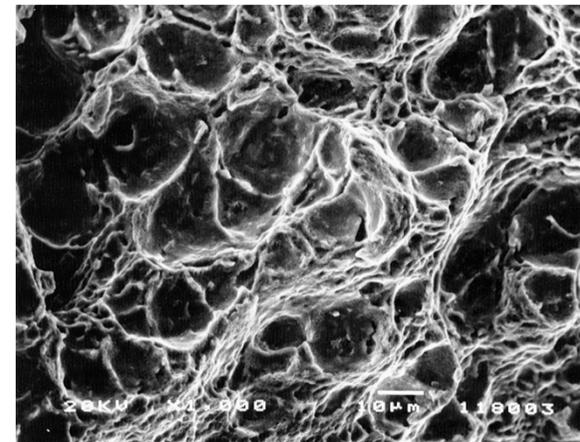
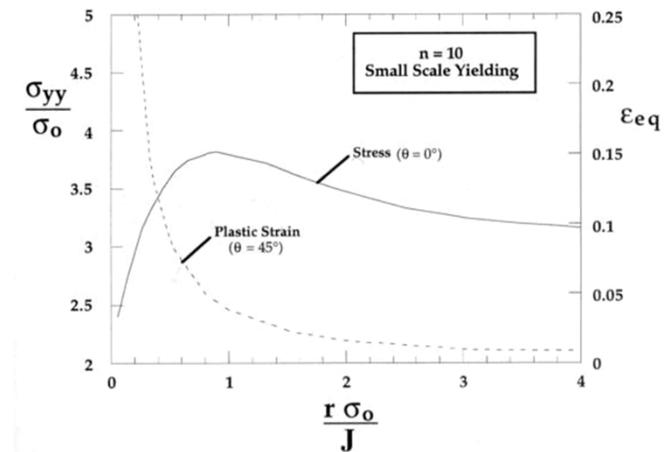
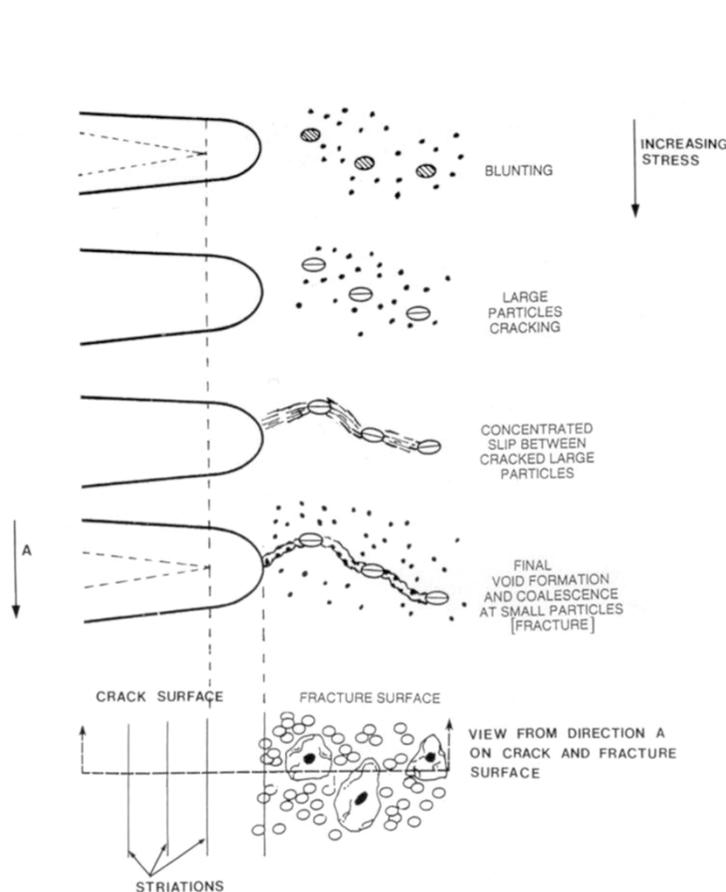


Materiales metálicos con comportamiento plástico

- favorecido por  $T \uparrow$ ,  $\sigma_Y \downarrow$ ,  $\dot{\sigma} \downarrow$

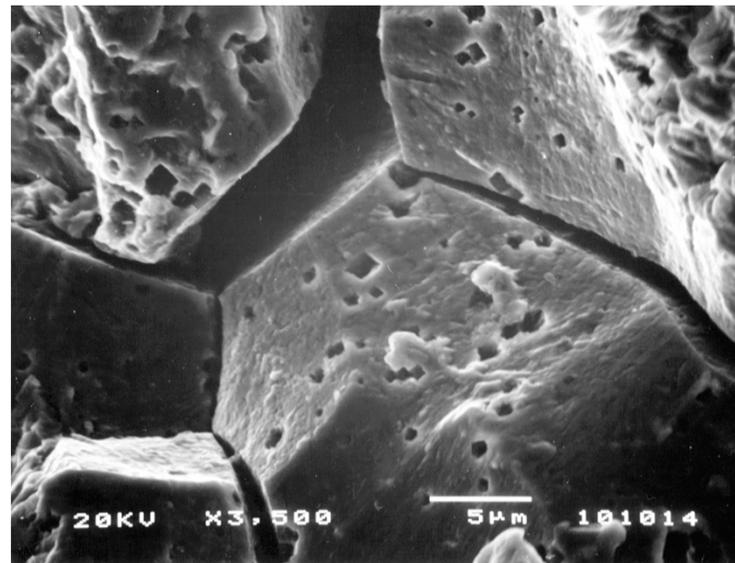
## 10. MICROMECHANISMOS DE FRACTURA

- **FRACTURA DÚCTIL: FORMACIÓN, CRECIMIENTO Y COALESCENCIA DE MICROHUECOS**



## 10. MICROMECHANISMOS DE FRACTURA

- **FRACTURA INTERGRANULAR**



- Efecto del ambiente o de segregaciones en borde de grano

## 11. LOS DIAGRAMAS DE FALLO



-Es necesaria una relación entre  $K_r = K_I/K_{IC}$  y  $L_r = P/P_L$  que separe situaciones admisibles de no admisibles.

-Igualando el  $K_{eff}$  de Dugdale a la tenacidad a fractura  $K_{IC}$

$$\frac{K_{IC}}{K_I} = \frac{\sigma_y}{\sigma} \left[ \frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left( \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_y} \right) \right]^{1/2} \Rightarrow K_r = L_r \left[ \frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left( \frac{\pi}{2} L_r \right) \right]^{-1/2} \Rightarrow \text{INTERACCIÓN}$$

## 11. LOS DIAGRAMAS DE FALLO

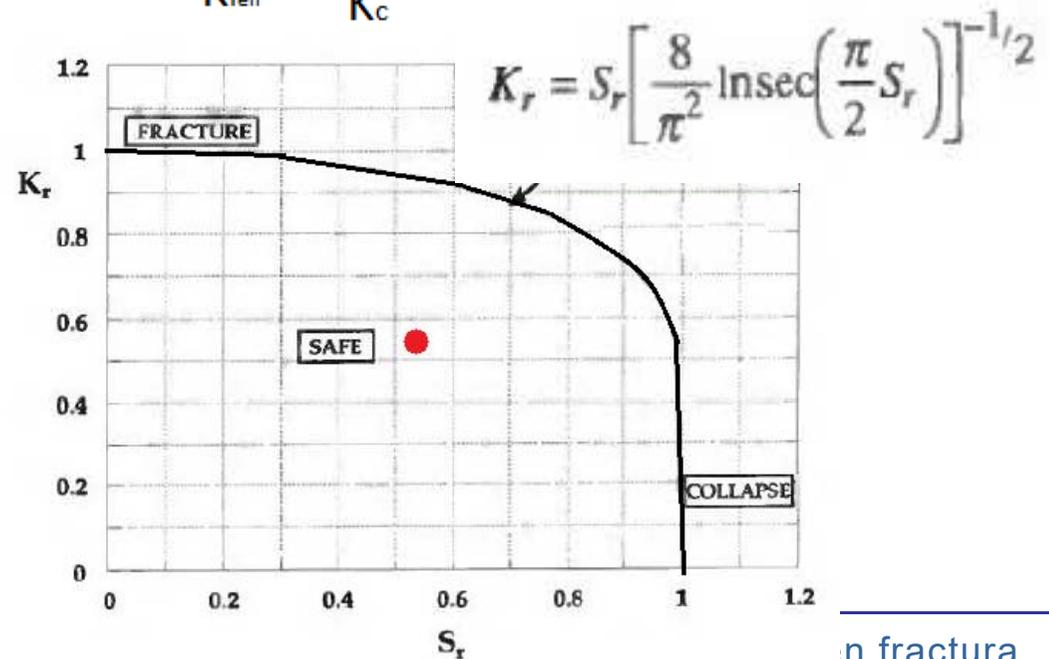
Condición Crítica

$$K_{r\text{-line}} = \frac{K_I}{K_{\text{eff}}}$$

Condición de Seguridad

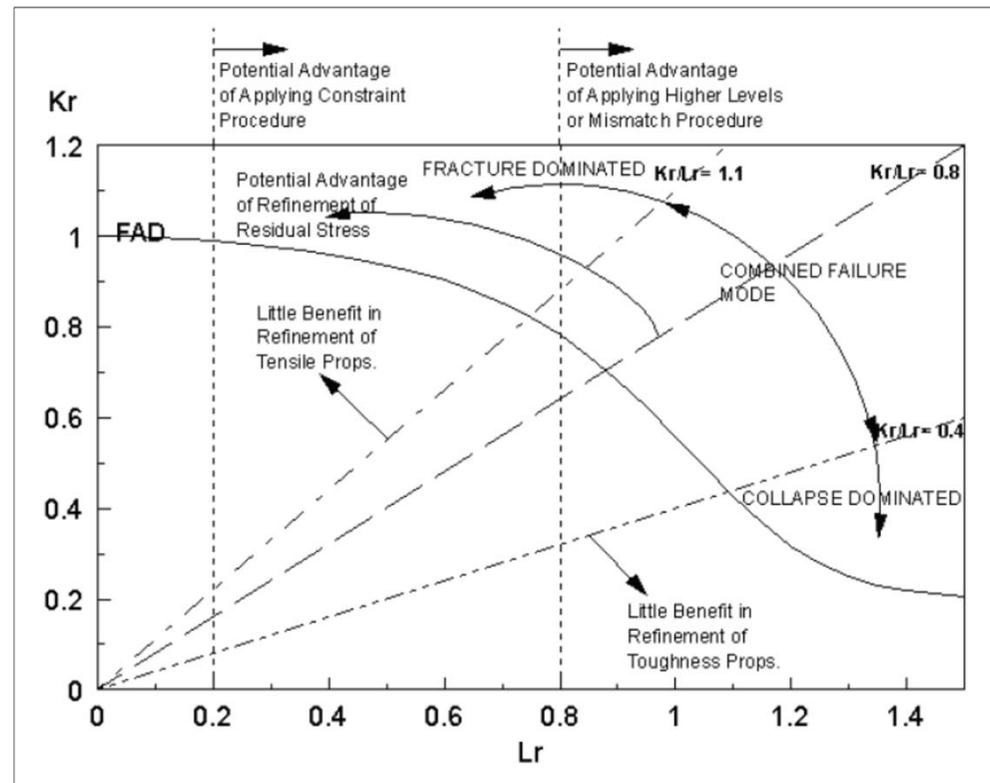
$$K_{\text{Ieff}} < K_c^{\text{Mat}}$$

$$K_{r\text{-line}} = \frac{K_I}{K_{\text{Ieff}}} > \frac{K_I}{K_c^{\text{Mat}}} = K_{r\text{(structure)}}$$



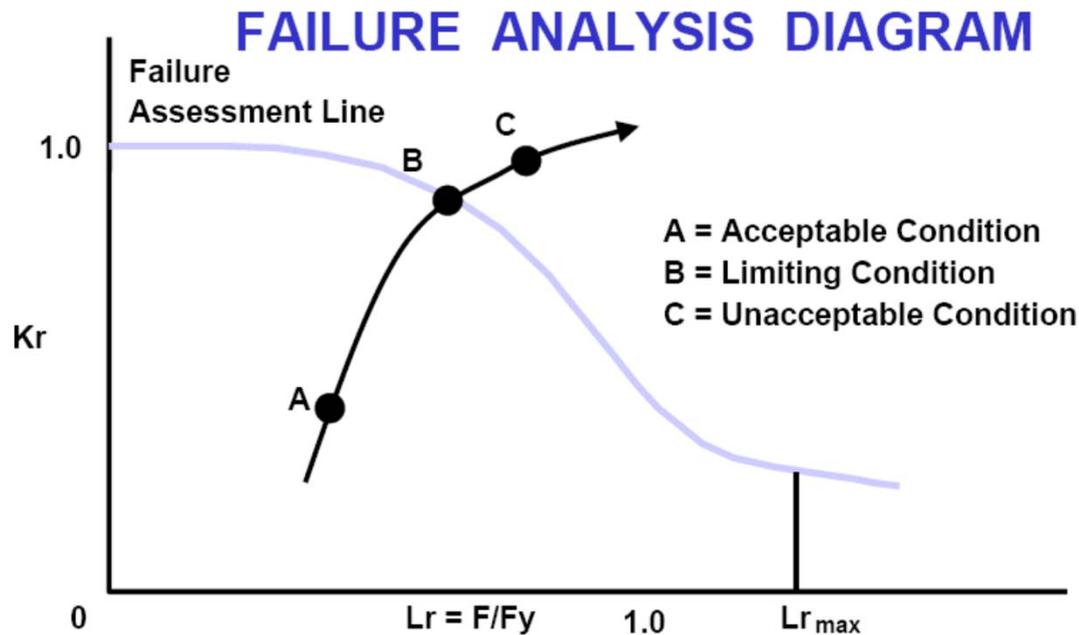
## 11. LOS DIAGRAMAS DE FALLO

### Refinamiento de los análisis



## 11. LOS DIAGRAMAS DE FALLO

Los FAD permiten evaluar simultáneamente la fractura y el colapso plástico. Las coordenadas del punto de evaluación nos indica qué tipo de fallo es (fractura vs. colapso).



$$\text{Fractura: } \frac{K_I}{K_{IC}} = 1$$

$$\text{Colapso \cdot plástico: } \frac{P}{P_L} = 1$$

(sin escalón cedencia)

$$K_r = \frac{K_I}{K_c}$$

$$L_r = \frac{P}{P_L}$$