

# TEMA 5. LA FRACTURA DE LOS MATERIALES

---

## 5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

5.1.1. Fractura dúctil

5.1.2. Fractura frágil

## 5.2. PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA

5.2.1. Concentración de tensiones

5.2.2. Tenacidad de fractura

5.2.3. El diseño basado en la mecánica de fractura

## 5.3. ENSAYO DE FRACTURA POR IMPACTO

5.3.1. Ensayo del péndulo Charpy

5.3.2. Transición dúctil-frágil

## 5.4. FALLO POR FATIGA

5.4.1. Tensiones cíclicas

5.4.2. Ensayo de fatiga: la curva S-N

5.4.3. Factores que afectan a la vida a fatiga

## 5.5. FALLO POR TERMOFLUENCIA

5.5.1. Fluencia en caliente

5.5.2. Ensayo de termofluencia

## 5.6. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES EN FUNCIÓN DE SU TENACIDAD

# 5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

**FRACTURA SIMPLE:** Es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión estática aplicada (constante o que cambia lentamente con el tiempo) y a temperaturas relativamente bajas (en comparación con la temperatura de fusión del material)

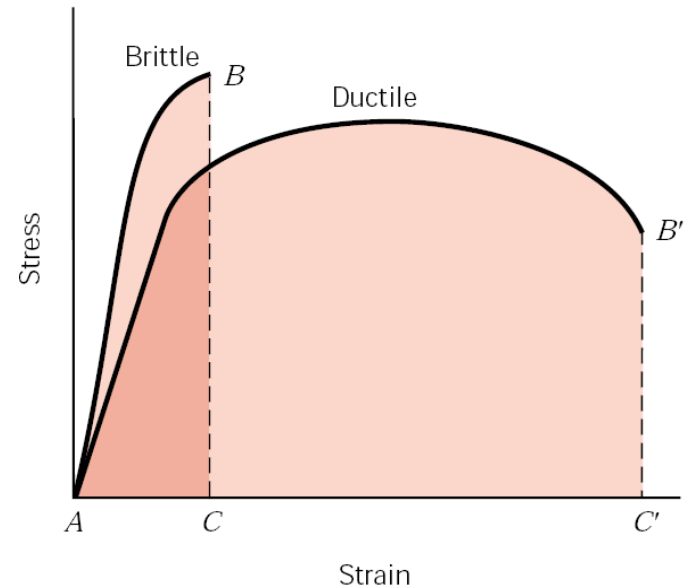
TENSIONES {  
Tracción  
Compresión  
Cizalladura  
Torsión

Según la capacidad el material de experimentar deformación plástica

**Dúctil** {  
↑ Deformación plástica  
↑ Energía absorbida

**Frágil** {  
↓ Deformación plástica  
↓ Energía absorbida

A }  
R } DUCTILIDAD = función {  
T  
dε / dt  
estado de tensiones



Representación esquemática de los ensayos de tracción de materiales frágiles y dúctiles, ensayados hasta fractura

## 5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

---

- Etapas de la fractura  $\Rightarrow$
- ① Formación de la fisura
  - ② Propagación de la fisura

El modo de fractura depende del mecanismo de propagación de la grieta

➤ **Fractura dúctil**  $\Rightarrow$  grieta “estable”

- Gran deformación plástica en la vecindad de la grieta
- La grieta se propaga lentamente
- La grieta se opone a su extensión
- Deformación plástica en las superficies de fractura

➤ **Fractura frágil**  $\Rightarrow$  grieta “inestable”

- Baja deformación plástica en la vecindad de la grieta
- La grieta se propaga rápidamente
- Una vez iniciada la grieta continúa espontáneamente sin  $\uparrow$  de  $\sigma$

## 5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

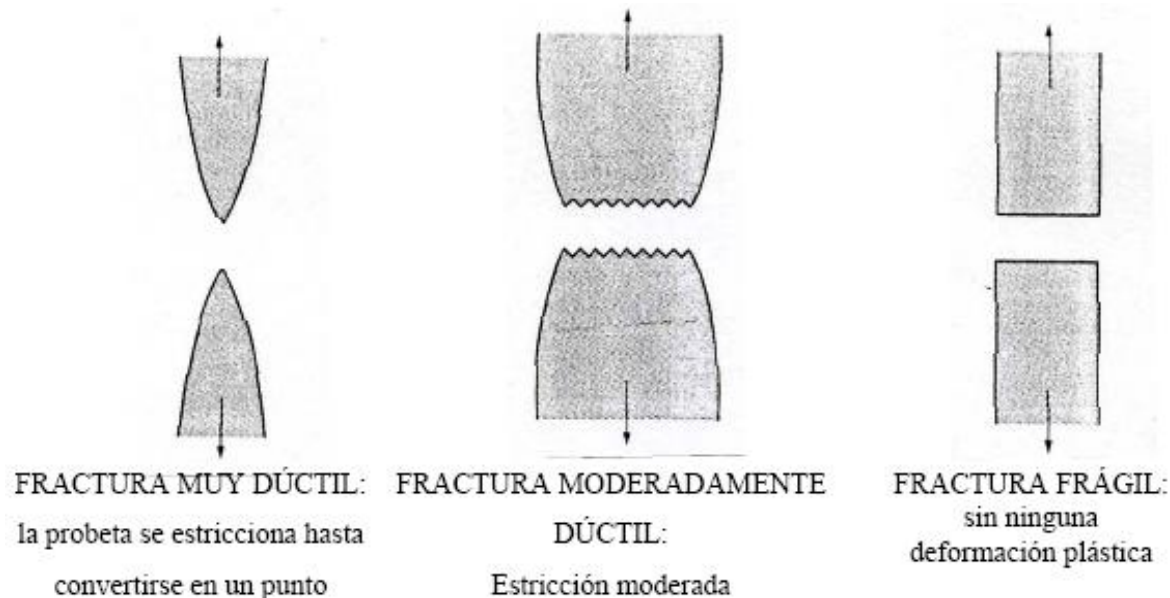
Se prefiere un fractura dúctil por:

1) F. frágil → Súbita y catastrófica, sin síntoma, por propagación rápida y espontánea de la grieta.

F. dúctil → Def. plástica es síntoma de fractura, se pueden tomar medidas

2) Para inducir una f. dúctil se necesita + energía de deformación, ya que los mat. dúctiles son + tenaces

En gral: Metales → dúctiles; Cerámicos → frágiles; Polímeros → ambos



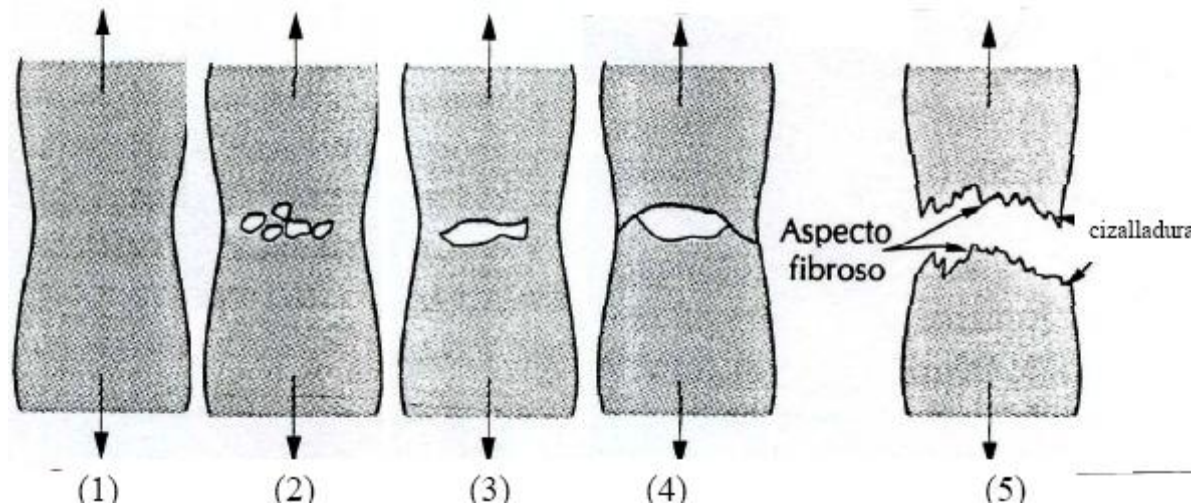
# 5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

## 5.1.1. Fractura dúctil

El tipo de fractura más común en mat. dúctiles es la precedida de estricción moderada

La fractura se da en etapas:

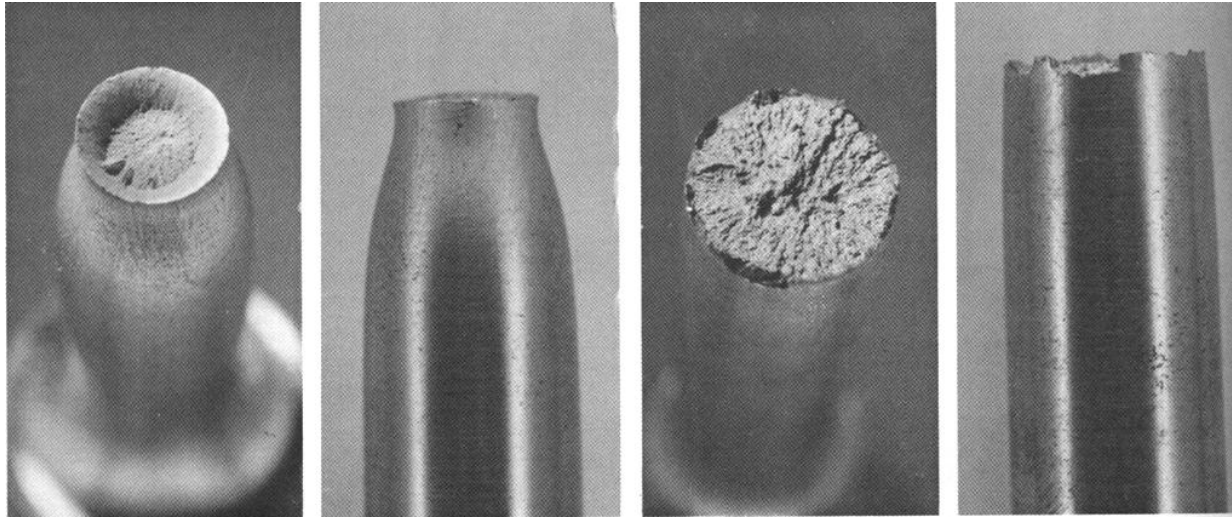
- ① Estricción
- ② Formación de pequeñas cavidades en el interior de la sección
- ③ A medida que  $\uparrow \epsilon$ , el tamaño de las microcavidades  $\uparrow$ , se juntan y coalescen para formar una grieta elíptica, perpendicular a la F aplicada
- ④ PROPAGACIÓN DE LA GRIETA por coalescencia de microcavidades
- ⑤ FRACTURA FINAL POR CIZALLADURA por propagación de una grieta alrededor del perímetro externo de la estricción formando  $\approx 45^\circ$  con el eje de tracción  $\Rightarrow$  fractura copa-cono (región interna fibrosa e irregular  $\rightarrow$  def. plástica)





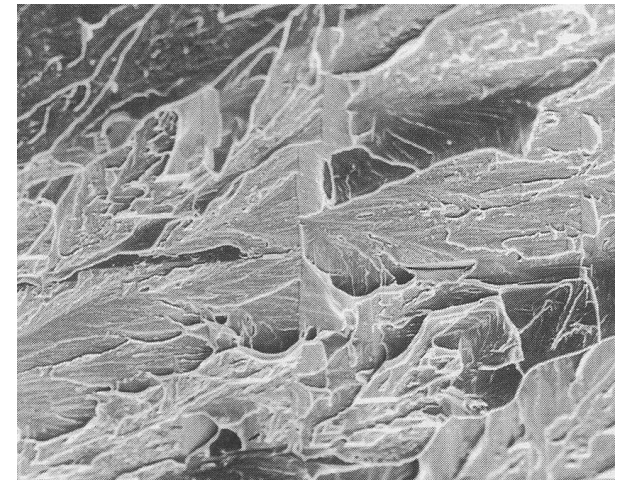
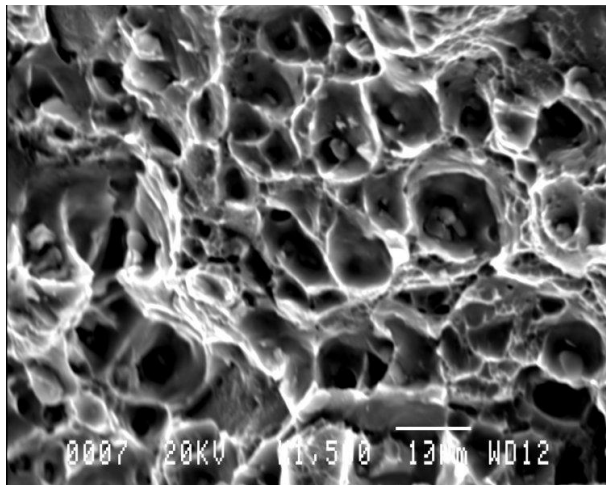
# 5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

## 5.1.1. Fractura dúctil



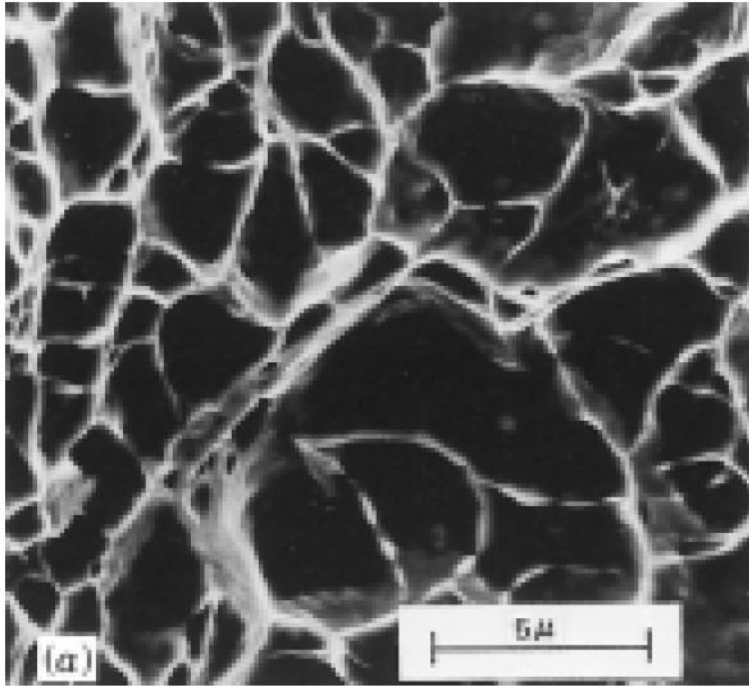
Fractura dúctil copa-cono en el aluminio

Fractura frágil en un acero bajo en carbono

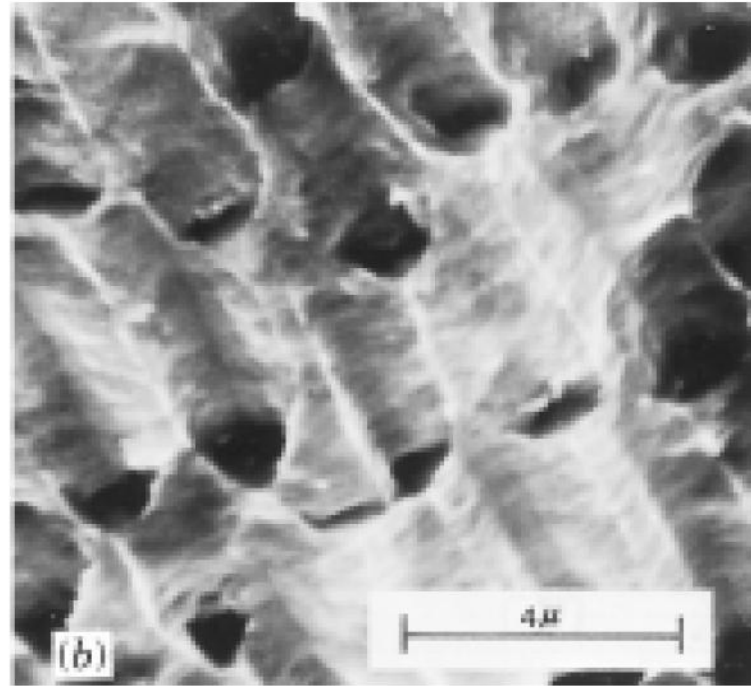


# 5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

## 5.1.1. Fractura dúctil



Huecos de deformación característicos de una fractura dúctil bajo una carga axial



Huecos de deformación característicos de una fractura dúctil bajo una carga de cizalladura

# 5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

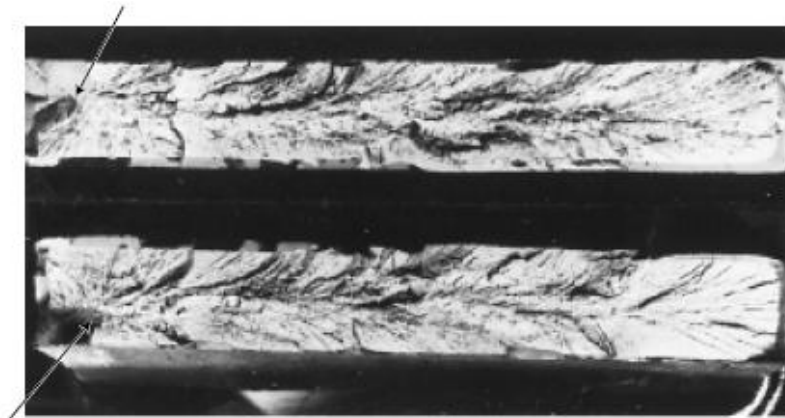
## 5.1.2. Fractura frágil

Sin deformación plástica y propagación rápida de la grieta.

Mvto de la grieta perpendicular a la dirección de  $F \Rightarrow$  superficie de fractura plana

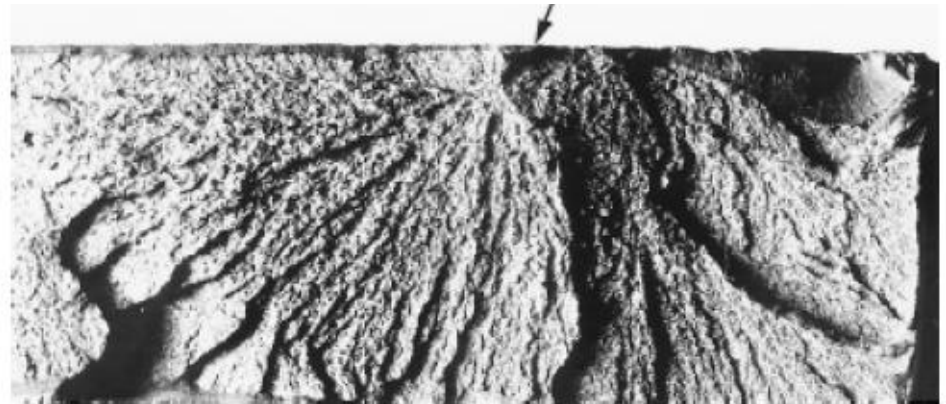
Detalles característicos:

- Marcas en forma de V (en acero) que apuntan hacia el lugar de inicio
- Líneas y crestas desde el origen en forma de abanico



(a)

Marcas en V



(b)

Líneas en abanico



# 5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

## • *Barcos Liberty (1941-45)*



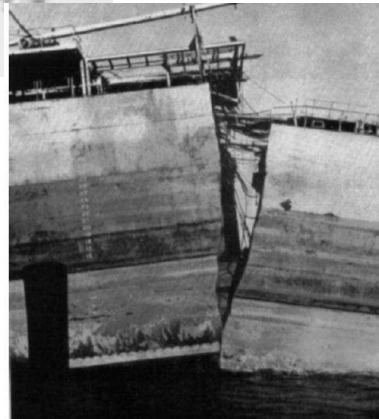
Rotura del petrolero Schenectady

Construidos: ~2700

Barcos con roturas: 400

Roturas graves : 90

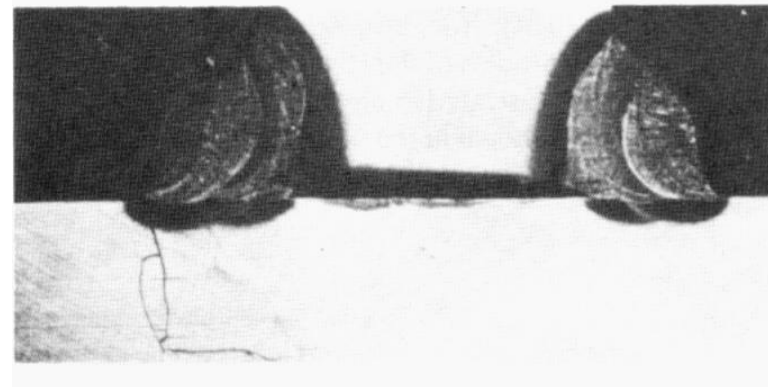
Fallo total: 20 (10 de ellos partidos en dos)



## • *Plataforma "Alexander Kielland" (1980)*

Fallo en cordón de soldadura de filete a 6 mm que unía una brida destinada al montaje de un sonar, con uno de los elementos estructurales principales de la plataforma ⇒ 167 muertos

[http://www.youtube.com/watch?v=7QVn3NUW\\_aQ](http://www.youtube.com/watch?v=7QVn3NUW_aQ)



## 5.2. PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

---

**Mecánica de fractura** es la cuantificación de la relación entre propiedades, niveles de tensión, presencia de defectos y mecanismos de propagación de grietas

### **5.2.1. Concentración de tensiones**

La resistencia a la fractura depende de las Fcohesiva entre átomos.

- R cohesiva teórica de un sólido elástico frágil  $\Rightarrow \approx E/10$
- R fractura experimental  $\Rightarrow$  entre 10-1000 veces inferior

A.A. Griffith  $\Rightarrow$  esta diferencia está asociada a la presencia de grietas microscópicas en la superficie y en el interior de una pieza de material

Defectos  $\Rightarrow \downarrow$  R a la fractura  $\Rightarrow$  porque la  $\sigma$  aplicada  $\uparrow$  en la punta de la grieta.

- ♦ El grado en que la  $\sigma$  es concentrada depende de la orientación y la geometría de la grieta
- ♦ La magnitud de la  $\sigma$  localizada disminuye con el aumento a la distancia a la punta de la grieta. En posiciones alejadas la  $\sigma = \sigma_0$
- ♦ Debido a la capacidad de amplificar la tensión aplicada ( $\sigma_0$ ) que tienen los **defectos** en sus alrededores  $\Rightarrow$  **concentradores de tensión**

## 5.2. PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

### 5.2.1. Concentración de tensiones

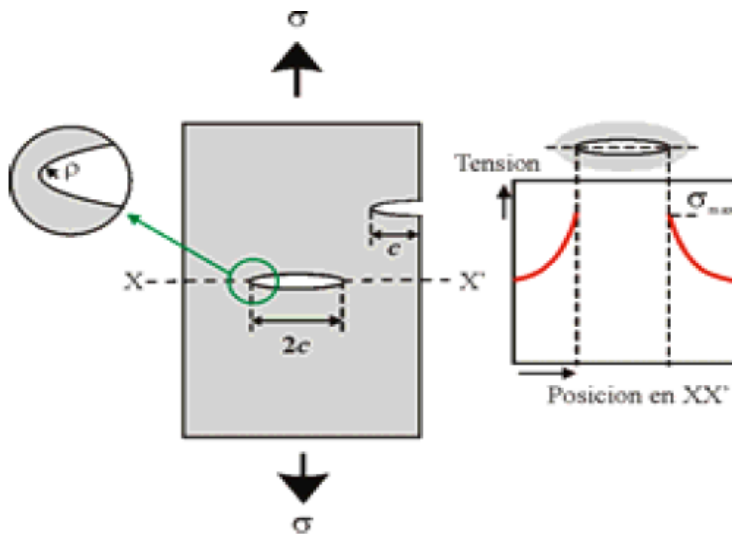
Si la grieta es elíptica y está orientada perpendicular a la  $\sigma$  aplicada, la  $\sigma_{\text{máx}}$  en el extremo de la grieta viene dada por:

$$\sigma_m = 2\sigma \left( \frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

$\sigma \Rightarrow$  Tensión nominal aplicada (Pa)

$\rho_t \Rightarrow$  Radio de curvatura en la punta de la grieta (m)

$a \Rightarrow$  Longitud de la grieta superficial o  $1/2$  longitud de la grieta interna (m)



- Geometría de grietas superficiales e internas.
- Perfil esquemático de la tensión a lo largo de la línea X-X'

Si  $a \uparrow$  y  $\rho_t \downarrow \Rightarrow (a/\rho_t) \uparrow \uparrow \Rightarrow \sigma_m \gg \sigma$

$\sigma_m/\sigma_o \Rightarrow$  Factor de concentración de tensiones ( $K_t$ )

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_o} = 2 \left( \frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

$K_t \Rightarrow$  medida del grado con que una  $\sigma$  externa es amplificada en el extremo de una grieta pequeña

# 5.2. PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

## 5.2.1. Concentración de tensiones

$K_t$  (material frágil)  $>$   $K_t$  (material dúctil)

En un material dúctil:

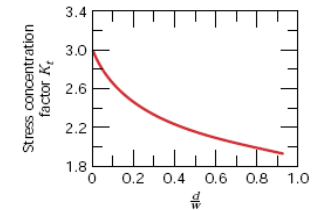
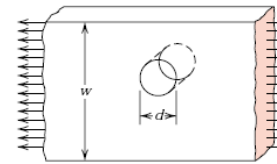
$\epsilon$  plástica si  $\sigma > \sigma_y \Rightarrow$  distribución más uniforme de la  $\sigma$  en el concentrador  $\Rightarrow K_t$  máx menor que el teórico

Griffit propuso que en todos los materiales frágiles existe una población de pequeños defectos y fisuras.

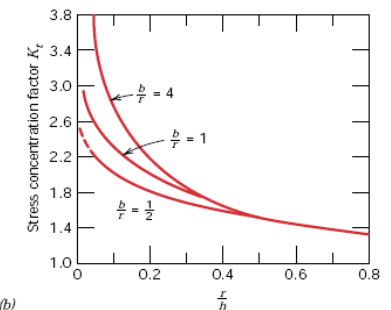
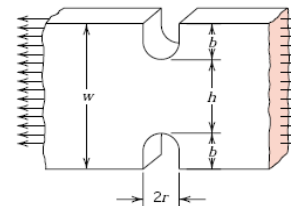
Al aplicar un esfuerzo de tracción  $\Rightarrow$  rotura cuando la  $R$  cohesiva teórica sea superada en la punta de uno de los defectos  $\Rightarrow$  formación de una grieta que propaga rápidamente.

Si no existieran defectos:

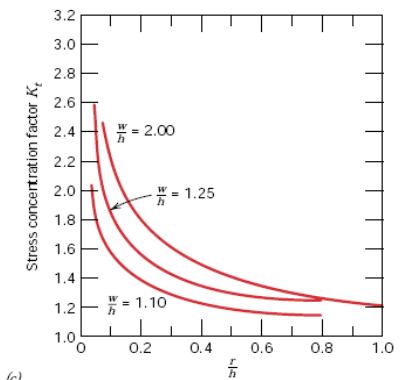
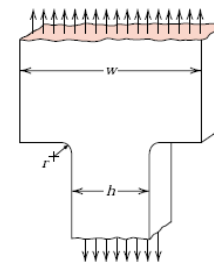
$R_{fractura} = R_{cohesiva}$



(a)



(b)



(c)

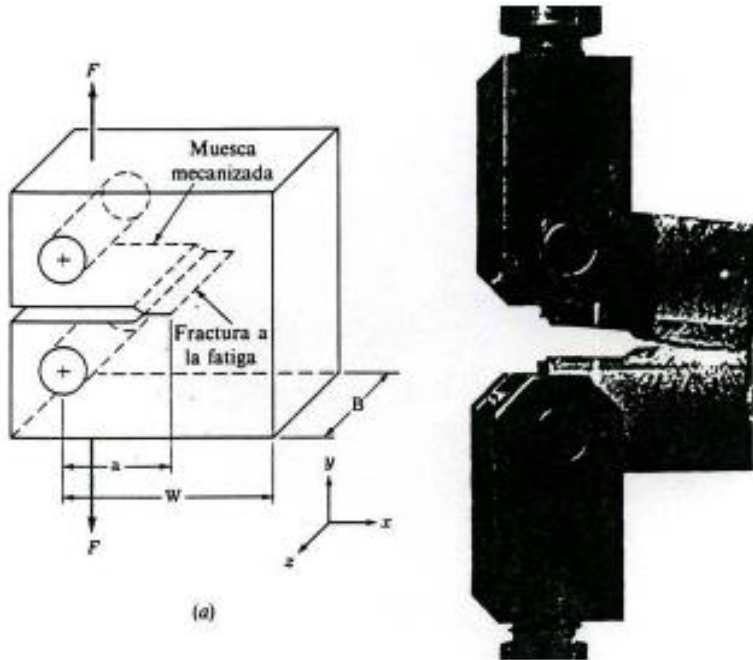
Curvas teóricas de los factores de concentración de tensiones para tres geometrías sencillas

## 5.2. PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

### 5.2.2. Tenacidad de Fractura

La fractura ocurre cuando la tensión aplicada exceda un valor crítico  $\sigma_c$

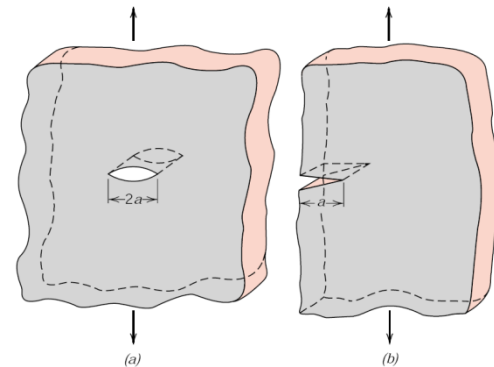
Se define un valor crítico del factor de intensidad de tensiones  $\Rightarrow$  La **Tenacidad de fractura,  $K_c$** , es una medida de la R del material a la fractura frágil cuando existe una grieta



$$K_c = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Donde:

$Y \Rightarrow$  Parámetro adimensional;  $f$  (geometría de la pieza)



Ensayo de tenacidad de fractura para probetas compactas en condiciones de deformación planas.

a) morfología de la probeta; b) ensayo

$Y = 1 \Rightarrow$  placa de anchura infinita

$Y = 1,1 \Rightarrow$  placa de anchura semiinfinita que contiene una grieta en el borde



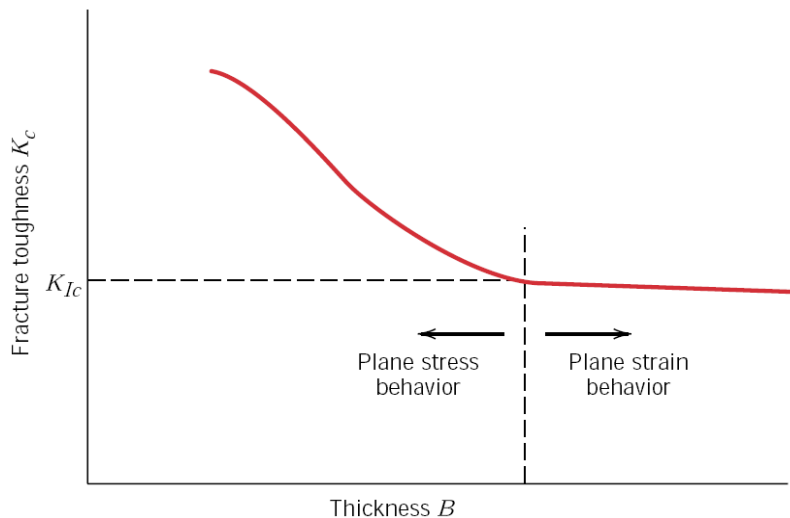
## 5.2. PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

### 5.2.2. Tenacidad de Fractura

Para probetas delgadas  $K_c$  depende del espesor de la probeta,  $B$ .

Si  $B \uparrow \Rightarrow K_c \downarrow$

$K_c$  se hace independiente de  $B$  cuando existen condiciones de deformaciones planas  $\Rightarrow K_{Ic}$



Representación esquemática de la influencia del espesor de la placa sobre la tenacidad de fractura

Esto se cumple cuando:

$$B \geq 2.5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2$$

Tenacidad de fractura en deformaciones planas ( $K_{Ic}$ ) viene dada por:

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

$K_{Ic}$  es único para un material determinado

Se usa siempre  $K_{Ic}$  porque  $K_{Ic} < K_c$

En materiales frágiles  $\Rightarrow K_{Ic} \downarrow \downarrow \Rightarrow$  Rotura catastrófica

En materiales dúctiles  $\Rightarrow K_{Ic} \uparrow$

## 5.2. PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

### 5.2.2. Tenacidad de Fractura

Material	Límite elástico		$K_{Ic}$
	MPa		$MPa\sqrt{m}$
<b>Metales</b>			
Aleación de aluminio <sup>a</sup> (2024-T351)	325		36
Aleación de aluminio <sup>a</sup> (7075-T651)	505		29
Acero aleado <sup>a</sup> (4340 revenido @ 260°C)	1640		50,0
Acero aleado <sup>a</sup> (4340 revenido @ 425°C)	1420		87,4
Aleación de titanio <sup>a</sup> (Ti-6Al-4V)	910		44-66
<b>Cerámicas</b>			
Óxido de aluminio	-		3,0-5,3
Vidrio común	-		0,7-0,8
Hormigón	-		0,2-1,4
<b>Polímeros</b>			
Poli (metacrilato de metilo)(PMMA)	-		1,0
Poliestireno (PS)	-		0,8-1,1

$K_{Ic}$  mat. dúctiles  $\gg$   $K_{Ic}$  mat. frágiles

$K_{Ic}$  depende fundamentalmente de la  $T$ , velocidad de deformación y microestructura.

$K_{Ic} \uparrow$  si:  $T \uparrow$

Vel. de deformación  $\downarrow$

Tamaño de grano  $\downarrow$

% A  $\uparrow$

<http://www.youtube.com/watch?v= BZnn5OYcBc>

## 5.2. PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

---

### 5.2.3. Diseño basado en la mecánica de fractura

Hay que considerar 3 variables:  $K_{Ic}$ ,  $\sigma$ ,  $a$

Hay que determinar cuales están determinadas por la aplicación y cuales por el diseño

El material  $\Rightarrow K_{Ic}$

Limitaciones técnicas de detección de defectos (END)  $\Rightarrow a$

Si  $K_{Ic}$  y  $a$  están especificadas por razones de diseño en una aplicación específica, entonces se tendrá que calcular la *tensión de diseño (o crítica)*,  $\sigma_c$  que es la tensión máxima que podrá soportar el material sin romperse.

$$\sigma_c \leq \left( \frac{K_{Ic}}{Y \sqrt{\pi a}} \right)$$

Si el nivel de tensión ( $\sigma$ ) y la  $K_{Ic}$  son prefijadas por la situación de diseño, entonces se calculará el *tamaño de grieta máximo* que se puede permitir.

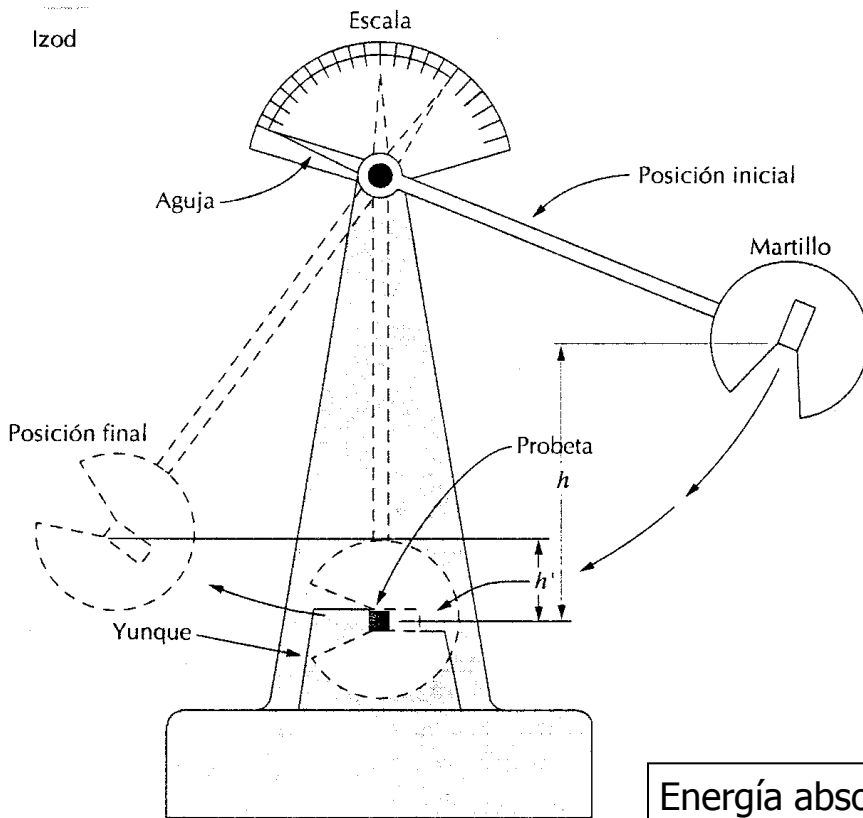
$$a_c \leq \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{Ic}}{Y \sigma} \right)^2$$

## 5.3. ENSAYOS DE FRACTURA POR IMPACTO

### 5.3.1. Ensayo de péndulo Charpy

Ensayos de tracción no válido para predecir el comportamiento a la fractura.

Los **ensayos por impacto** son las condiciones más severas con respecto a la fractura:



- ① Deformación a T relativamente bajas
- ② Velocidad de deformación  $\uparrow\uparrow$
- ③ Estado triaxial de tensiones (entalla)

Los Charpy e Izod miden la energía de impacto o Tenacidad a la entalla

**Probeta:** Barra de sección cuadrada con una entalla en forma de V

**Ensayo:** Golpe con un martillo en forma de péndulo

- { altura inicial del martillo ( $h$ )
- { altura final después del golpe ( $h'$ )

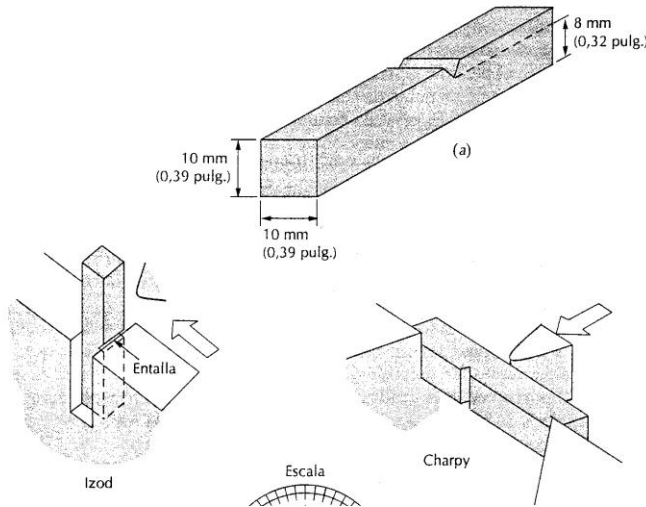
Energía absorbida en el impacto = Pérdida de energía potencial ( $h-h'$ )

<http://www.youtube.com/watch?v=tpGhqQvftAo>

## 5.3. ENSAYOS DE FRACTURA POR IMPACTO

### 5.3.1. Ensayo de péndulo Charpy

Diferencia entre Charpy e Izod ⇨ Colocación de la probeta.



Los resultados están influidos por:

- ① Tamaño y forma de probeta
- ② Configuración y forma de la entalla

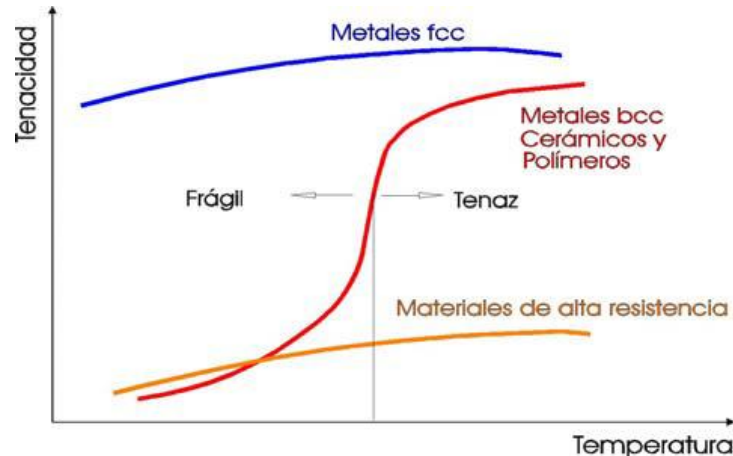
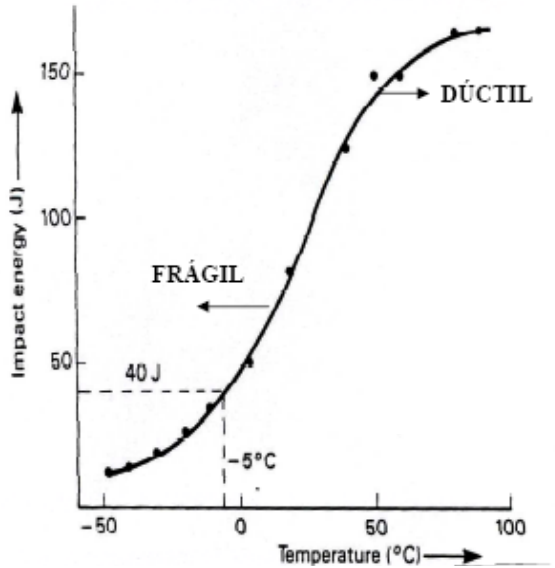
Las propiedades de fractura de los materiales vienen determinadas por su  $K_{IC}$  y los resultados de *ensayos de impacto*

- ❖ La Tenacidad de fractura  $K_{IC}$ 
  - ♦ Ensayo cuantitativo
  - ♦ Mide una propiedad específica
  - ♦ Parámetro de diseño
- ❖ Ensayos de impacto
  - ♦ Cualitativo, comparativo
  - ♦ Poca utilidad para el diseño
  - ♦ Baratos y sencillos
  - ♦ Determinación de la transición dúctil-frágil



## 5.3. ENSAYOS DE FRACTURA POR IMPACTO

### 5.3.2. Transición Dúctil-Frágil



Con el ensayo de impacto se determina si:

- ① Existe transición dúctil-frágil al disminuir T
- ② Intervalo de T en el que ocurre

Al  $\uparrow T \Rightarrow$  energía absorbida  $\uparrow \Rightarrow$  Fractura Dúctil

Al  $\downarrow T \Rightarrow$  energía absorbida  $\downarrow \Rightarrow$  Fractura Frágil

#### Transición dúctil-frágil:

- T a la que la energía tiene un determinado valor
- T correspondiente a un determinado aspecto de la superficie de fractura (50% fibrosa, por ejemplo)
- $E_t (T_t) = \frac{1}{2} (E_{\text{dúctil}} - E_{\text{frágil}})$

**Los componentes fabricados con materiales que presentan transición dúctil-frágil sólo pueden ser utilizados por encima de la T de transición**

Est. FCC  $\Rightarrow$  no tiene  $T_{D-F}$

Est. BCC y HC  $\Rightarrow$  sí tienen  $T_{D-F}$

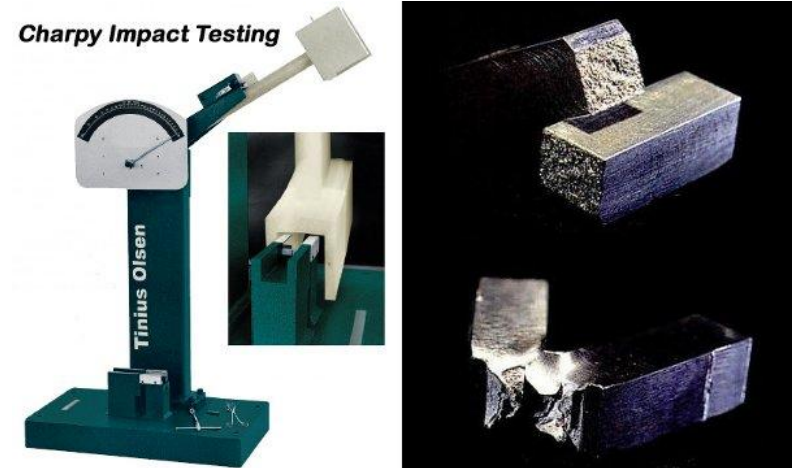
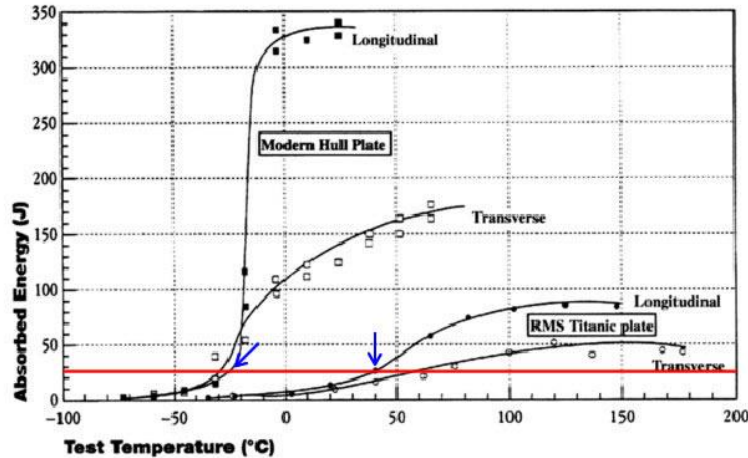
$T_{D-F} \Rightarrow$  Sensible a la composición y a la microestructura

# 5.3. ENSAYOS DE FRACTURA POR IMPACTO

## 5.3.2. Transición Dúctil-Frágil

### Hundimiento del Titanic

<http://www.youtube.com/watch?v=-YA-GO9C65c>



## 5.4. FALLO POR FATIGA

FATIGA  $\Rightarrow$  Forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y fluctuantes.

### Características:

- La rotura puede ocurrir a un nivel de tensiones mucho menor que la resistencia a la tracción o el límite elástico correspondiente a una carga estática.
- Ocurre después de un periodo largo de tensiones repetidas o de deformaciones cíclicas.
- Es la primera causa de rotura de materiales  $\Rightarrow$  90% de rotura en estructuras metálicas
- Rotura súbita, sin previo aviso
- La fractura ocurre por iniciación y propagación de fisuras sin deformación plástica asociada.
- La superficie de fractura normalmente es perpendicular a la tensión aplicada



### **Aviones Havilland Comet**

- 2 accidentes graves en enero y abril de 1954

<http://www.youtube.com/watch?v=BZnn5OYcBc>



4-28-1988 After 89,090 flight cycles on a 737-200, metal fatigue lets the top go in flight.

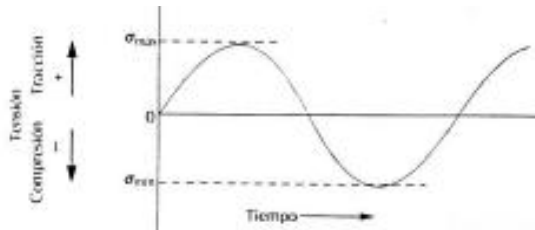
28 de abril de 1988  $\Rightarrow$  vuelo 243 entre Hilo y Honolulu (Hawaii) de la aerolínea Aloha Airlines, realizado por un Boeing 737-200

<http://www.youtube.com/watch?v=8NWW77HnGTc>

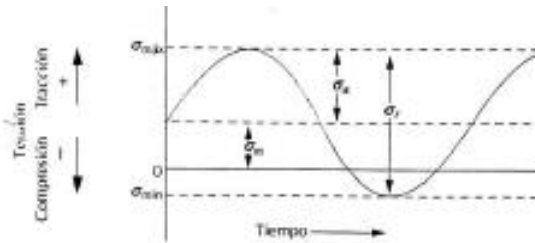
## 5.4. FALLO POR FATIGA

### 5.4.1. Tensiones cíclicas

#### ① CICLO SIMÉTRICO DE CARGA INVERTIDA



#### ② CICLO DE CARGA REPETIDA



#### ③ CICLO DE TENSIONES AL AZAR



La  $\sigma$  puede ser axial (tracción-compresión), flexión o torsional. Existen 3 posibles modos de tensión fluctuante frente al tiempo:

#### ① Ciclo simétrico de carga invertida:

Dependencia regular y sinusoidal del tiempo.

Amplitud simétrica alrededor de un nivel de  $\sigma=0$ , alternando desde un valor  $\sigma_{\text{máx}}$  de tracción hasta un valor  $\sigma_{\text{mín}}$  de compresión de igual magnitud

$$|\sigma_{\text{máx}}| = |\sigma_{\text{mín}}| \text{ y } t_{\text{tracción}} = t_{\text{compresión}}$$

#### ② Ciclo de carga repetida:

$\sigma_{\text{máx}}$  y  $\sigma_{\text{mín}}$  asimétricas con respecto al nivel cero de carga

$$|\sigma_{\text{máx}}| \neq |\sigma_{\text{mín}}| \text{ y } t_{\text{tracción}} = t_{\text{compresión}}$$

#### ③ Ciclo de tensiones al azar:

La tensión puede variar al azar en amplitud y en carga

$$|\sigma_{\text{máx}}| \neq |\sigma_{\text{mín}}| \text{ y } t_{\text{tracción}} \neq t_{\text{compresión}}$$

## 5.4. FALLO POR FATIGA

### 5.4.1. Tensiones cíclicas

Parámetros utilizados para caracterizar el ciclo de fluctuación de cargas:

① **Tensión media ( $\sigma_m$ )**  $\Rightarrow$  Valor promedio de las tensiones máximas y mínimas en cada ciclo

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2}$$

② **Intervalo de tensiones ( $\sigma_r$ )**  $\Rightarrow$  Diferencia entre la tensión máxima y la mínima

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}$$

③ **Amplitud de la tensión ( $\sigma_a$ )**  $\Rightarrow$  Mitad del intervalo de tensiones

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2}$$

④ **Cociente de tensiones ( $R$ )**  $\Rightarrow$  Cociente entre las amplitudes.

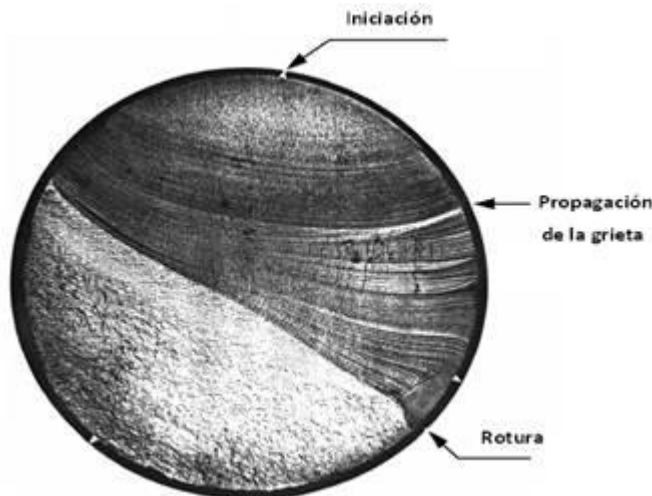
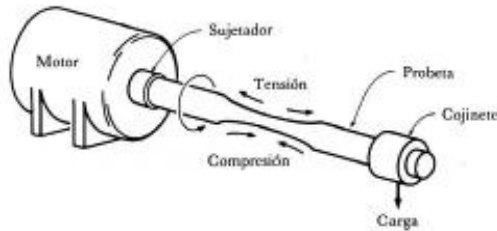
$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

Para un ciclo de carga invertida  $R=-1$



## 5.4. FALLO POR FATIGA

### 5.4.2. Ensayo de fatiga: la curva S-N



El equipo simula las condiciones de servicio (nivel de tensiones, frecuencia, distribución de tensiones, etc.)

- 1) Los ensayos comienzan aplicando tensiones cíclicas de amplitud máxima a una probeta ( $\sigma_{\text{máx}} \sim 2/3 \sigma_{\text{TS}}$ )  $\Rightarrow$  Se registra el nº de ciclos a rotura.
- 2) Esto se repite con otras probetas aplicando  $\sigma_{\text{máx}}$  decrecientes
- 3) Los resultados se registran en un diagrama de tensión (S) frente al log del nº de ciclos a rotura (N) para cada probeta

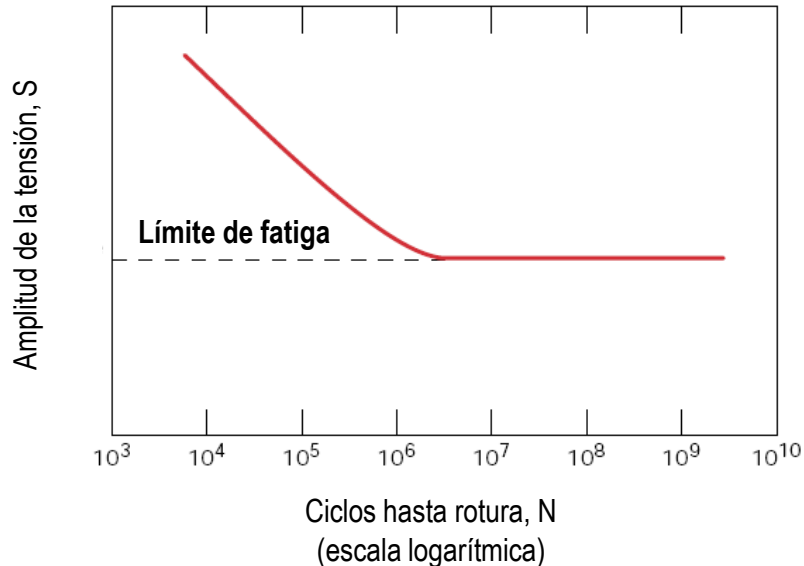
Normalmente  $S = \sigma_a$   
Cuanto mayor es  $\sigma_a$  (S)  $\Rightarrow$  menor es N

## 5.4. FALLO POR FATIGA

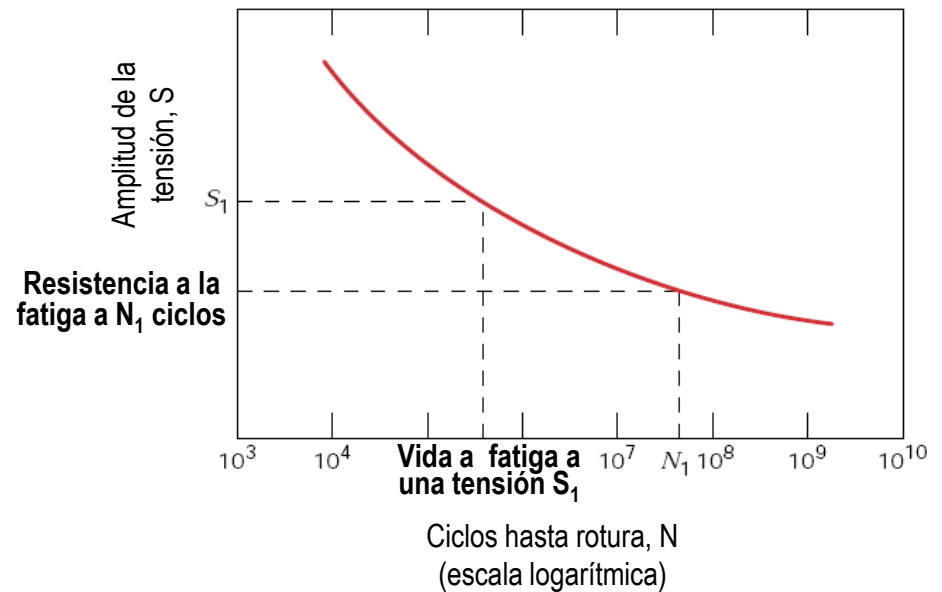
### 5.4.2. Ensayo de fatiga: la curva S-N

Existen dos tipos de curvas S-N en función de si el material presenta o no **límite de fatiga**:

Con **límite de fatiga**  
Aleaciones férreas y de Ti



Sin **límite de fatiga**  
Aleaciones de Al, Cu, Mg,...



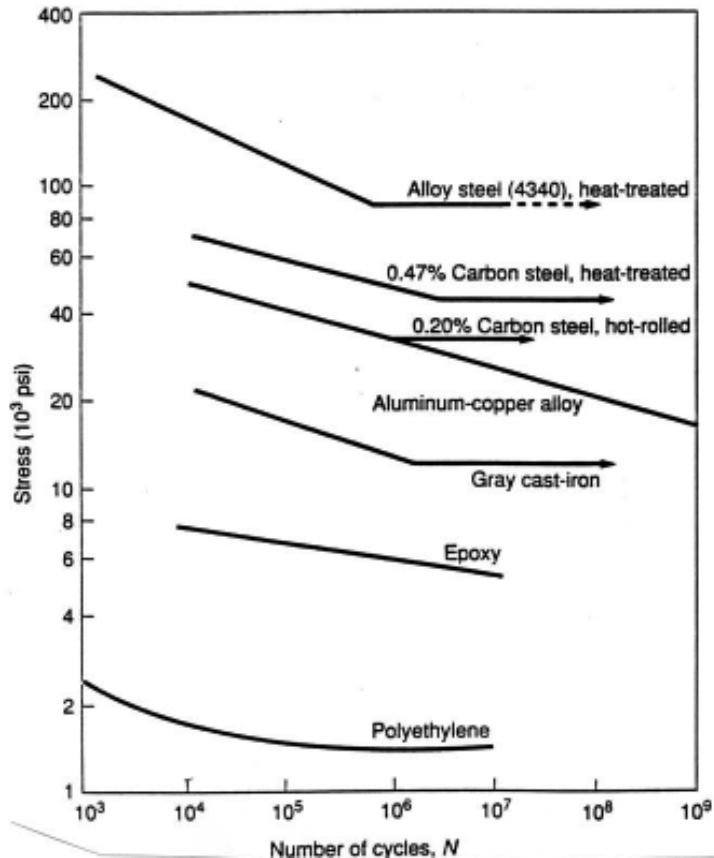
El límite de fatiga es un valor de tensión por debajo del cual no ocurre rotura por fatiga.

S continúa ↓ cuando N↑

## 5.4. FALLO POR FATIGA

### 5.4.2. Ensayo de fatiga: la curva S-N

Se define el **límite de fatiga** como el mayor valor de tensión fluctuante que no produciría rotura.



❖ En materiales sin límite de fatiga se definen:

**Resistencia a la fatiga:** Nivel de  $\sigma$  que produce la rotura después de un determinado  $n^\circ$  de ciclos

**Vida a fatiga (Nf):**  $N^\circ$  de ciclos para producir la rotura a un nivel específico de tensiones

Existe variación de N para probetas ensayadas a tensiones iguales  $\Rightarrow$  incertidumbre cuando se usa en diseño la Nf o el límite de fatiga.

Consecuencia de la sensibilidad a la fabricación, variables metalúrgicas, alineamiento del equipo,  $\sigma_m$  y frecuencia de ensayo.

Existen dos dominios de comportamiento a fatiga:

♦ **Fatiga de bajo  $n^\circ$  de ciclos** ( $Nf < 10^4$ - $10^5$  ciclos):

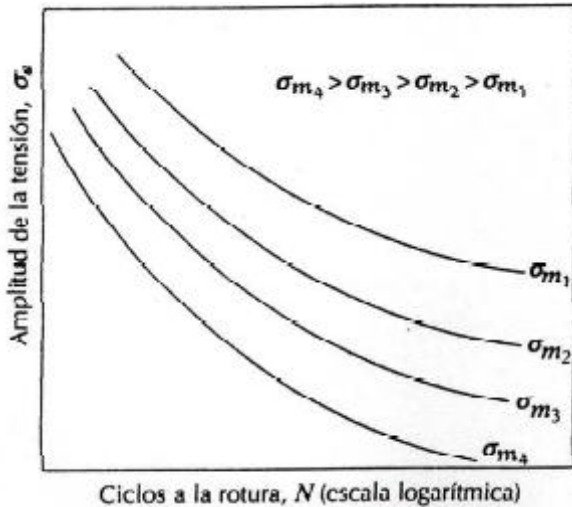
$$\sigma \uparrow, \epsilon_{\text{elástica}} + \epsilon_{\text{plástica}} \Rightarrow Nf \downarrow$$

♦ **Fatiga de alto  $n^\circ$  de ciclos** ( $Nf > 10^4$ - $10^5$  ciclos):

$$\sigma \downarrow, \text{sólo } \epsilon_{\text{elástica}} \Rightarrow Nf \uparrow$$

## 5.4. FALLO POR FATIGA

### 5.4.3. Factores que afectan a la vida a fatiga



#### 1) Tensión media

Las curvas S-N representa la dependencia de la vida a fatiga con la  $\sigma_a$  para un determinado valor de  $\sigma_m$ . La  $\sigma_m$  también afecta a la vida a fatiga

$$\text{Si } \sigma_m \uparrow \Rightarrow N_f \downarrow$$

#### 2) Efectos superficiales

La  $\sigma_{m\acute{a}x}$  se aplica en la superficie  $\Rightarrow$  La mayoría de las grietas se forman en la superficie (en cc de tensiones)

##### ♦ Factores de diseño:

Entallas o discontinuidades geométricas  $\Rightarrow$  cc. de tensiones  
Cuanto + aguda  $\Rightarrow \uparrow$  cc. de  $\sigma \Rightarrow \downarrow N_f$

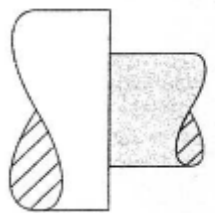
##### ♦ Tratamientos superficiales

Mecanizado  $\Rightarrow$  pequeñas rallas  $\Rightarrow \downarrow N_f$   
Pulido  $\Rightarrow \uparrow N_f$

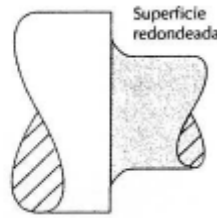
Granallado (esfuerzos residuales de compresión)  $\Rightarrow \uparrow N_f$

##### ♦ Endurecimiento superficial

$\uparrow$  dureza superf y  $\uparrow N_f$  en aceros aleados  $\Rightarrow$  carburación y nitruración



DISEÑO POBRE  
(canto vivo)



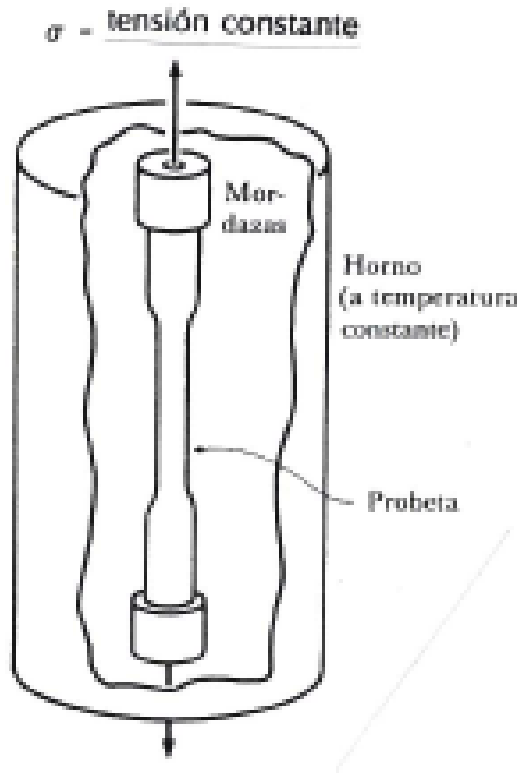
DISEÑO CORRECTO  
(unión suave)

#### 3) Influencia del medio

Fatiga térmica: A  $\uparrow T$  por  $\sigma$  térmicas fluctuantes  $\Rightarrow$  Asociada a restricciones a la dilatación y/o compresión por variación de  $T$

## 5.5. FALLO POR TERMOFLUENCIA

### 5.5.1. Fluencia en caliente



Esquema de un ensayo de termofluencia. La probeta se coloca en un horno y se aplica un tensión constante

A veces los materiales en servicio están sometidos a  $T \uparrow$  y  $\sigma$  mecánicas estáticas

**Fluencia en caliente** o **Termofluencia**  $\Rightarrow$  Deformación permanente y dependiente del tiempo cuando los materiales son sometidos a una tensión constante.

- ♦ Limita el t en servicio
- ♦ Se produce en todos los materiales. Metales:  $T > 0.4 T_m$

El ensayo consiste en aplicar una **carga cte** a una **T cte** y medir  $\epsilon$  en función del t.

En metales: tracción uniaxial usando probetas  $\sim$  tracción

En materiales frágiles: probetas de compresión  $\Rightarrow$  cilindros o paralelepípedos con  $l/d=2-4$ .

En la mayoría de los materiales la fluencia es independiente de la dirección de aplicación de la carga.

## 5.5. FALLO POR TERMOFLUENCIA

### 5.5.2. Ensayo de termofluencia

Se representa gráficamente deformación frente a  $t$ .

Al aplicar la carga  $\Rightarrow$  deformación instantánea  
ppalmente elástica.

La curva tiene 3 regiones:

① *Fluencia primaria o transitoria*

Velocidad de fluencia decreciente (pte  $\downarrow$  con el  $t$ )  
 $\Rightarrow$  endurecimiento por deformación

② *Fluencia secundaria o estacionaria*

Velocidad cte  $\Rightarrow$  gráfica lineal

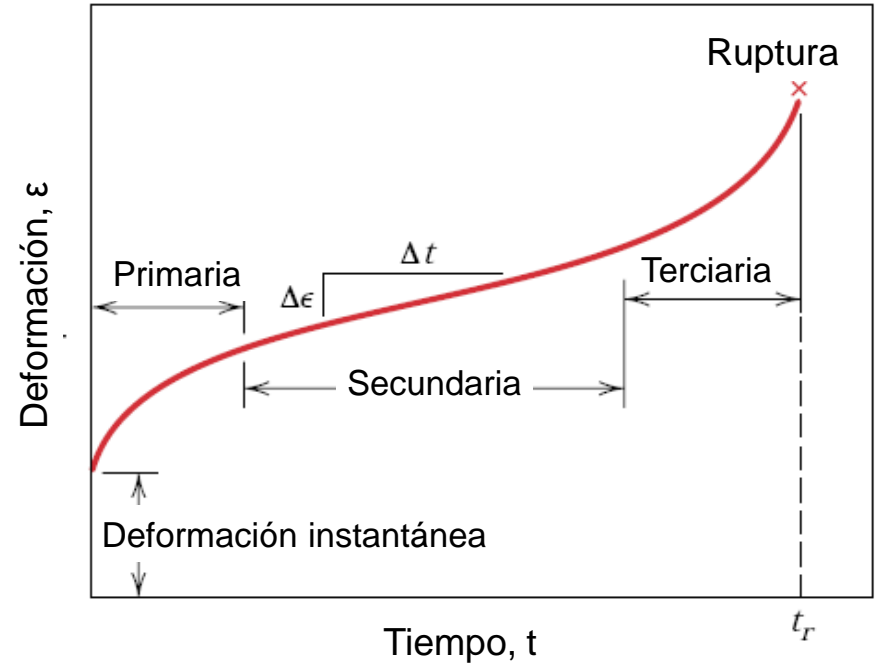
Balance entre endurecimiento por deformación y restauración

③ *Fluencia terciaria*

Velocidad de fluencia  $\uparrow$  y rotura final (ruptura)

$\Rightarrow$  Cambios microestructurales y/o metalúrgicos  
(separación de bordes de grano, fisuras internas, huecos)

En el caso de fuerzas de tracción  $\Rightarrow$  estricción y  $\uparrow$   
vel. de deformación.



Curva típica de termofluencia que muestra la deformación producida en función del tiempo para una tensión y temperatura constante



## 5.5. FALLO POR TERMOFLUENCIA

### 5.5.2. Ensayo de termofluencia

➤ **Velocidad mínima de fluencia o estacionaria** ( $\dot{\epsilon}_s$ )  $\Rightarrow$  Pte de la fluencia secundaria

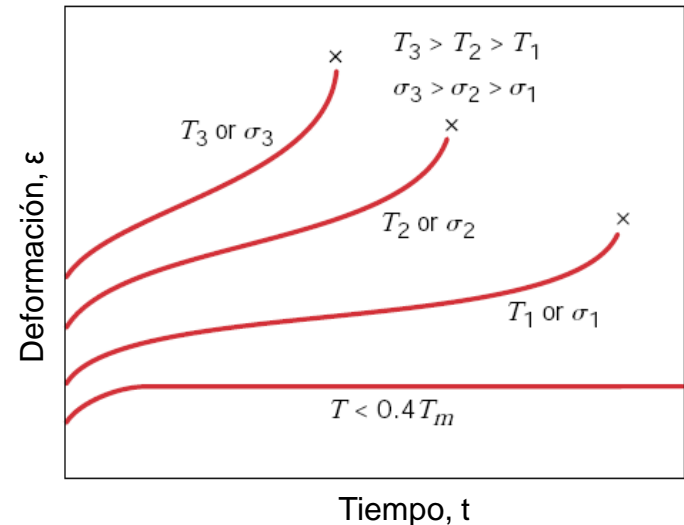
$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$$

Parámetro de diseño aplicaciones de larga vida

➤ **Tiempo de ruptura (tr):** tiempo necesario para que se produzca la rotura en un ensayo de termofluencia

Último pto de la curva  $\dot{\epsilon}_s$ -t

Parámetro de diseño para aplicaciones de vida corta



Influencia de la tensión y la temperatura sobre el comportamiento a fluencia

La T y la  $\sigma$  influyen en el comportamiento a fluencia

A  $T < 0.4 T_m$ , después de  $\epsilon_0 \Rightarrow$  la  $\epsilon$  es independiente del t

Al  $\uparrow$  T o  $\sigma$ :

- 1)  $\epsilon$  instantánea  $\uparrow$
- 2) Velocidad de fluencia estacionaria  $\uparrow$
- 3) Tiempo de ruptura  $\downarrow$

## 5.5. FALLO POR TERMOFLUENCIA

### 5.5.2. Ensayo de termofluencia

Los resultados de ruptura por fluencia se representan en **log  $\sigma$**  frente a **log  $t$**  de ruptura.

Existe una relación lineal para cada T

La velocidad de fluencia estacionaria se relaciona con la T y la  $\sigma \Rightarrow$  dependencia de la  $\dot{\epsilon}_s$  con la  $\sigma$ :

$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n$$

donde:  $K_1$  y  $n$  son ctes que dependen del material

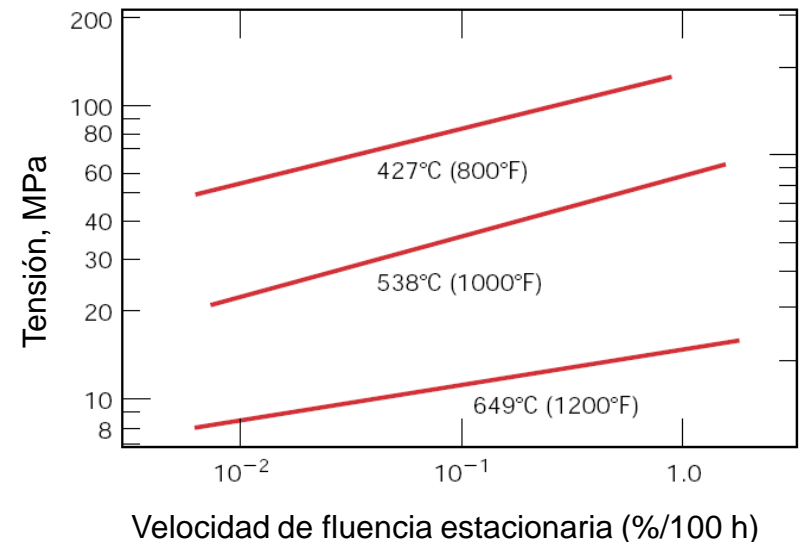
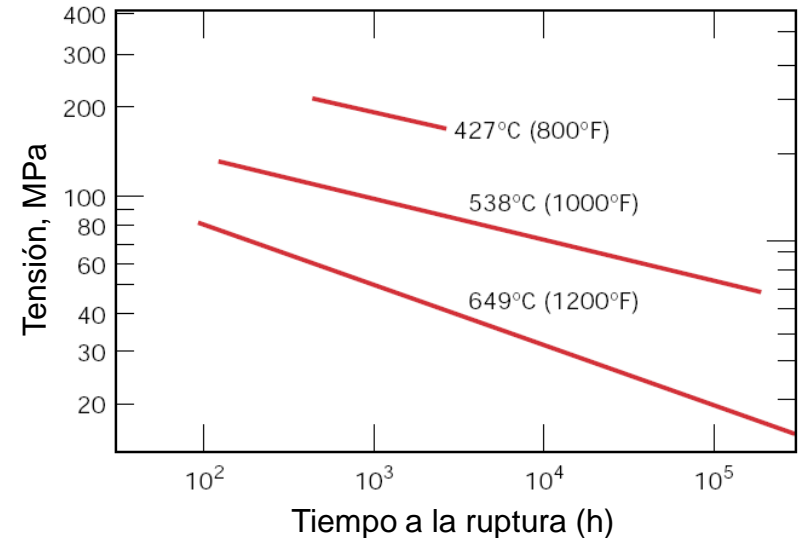
$n$  es la pte para cada T

Si se incluye la influencia de la T

$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

donde:  $K_2$  y  $Q_c$  son ctes

$Q_c \Rightarrow$  energía de activación para la fluencia



## 5.5. FALLO POR TERMOFLUENCIA

### 5.5.2. Ensayo de termofluencia

#### Métodos de extrapolación de resultados:

Se hacen ensayos a:

T más altas

t más cortos

$\sigma \sim$

⇒ PARÁMETRO DE LARSON MILLER:

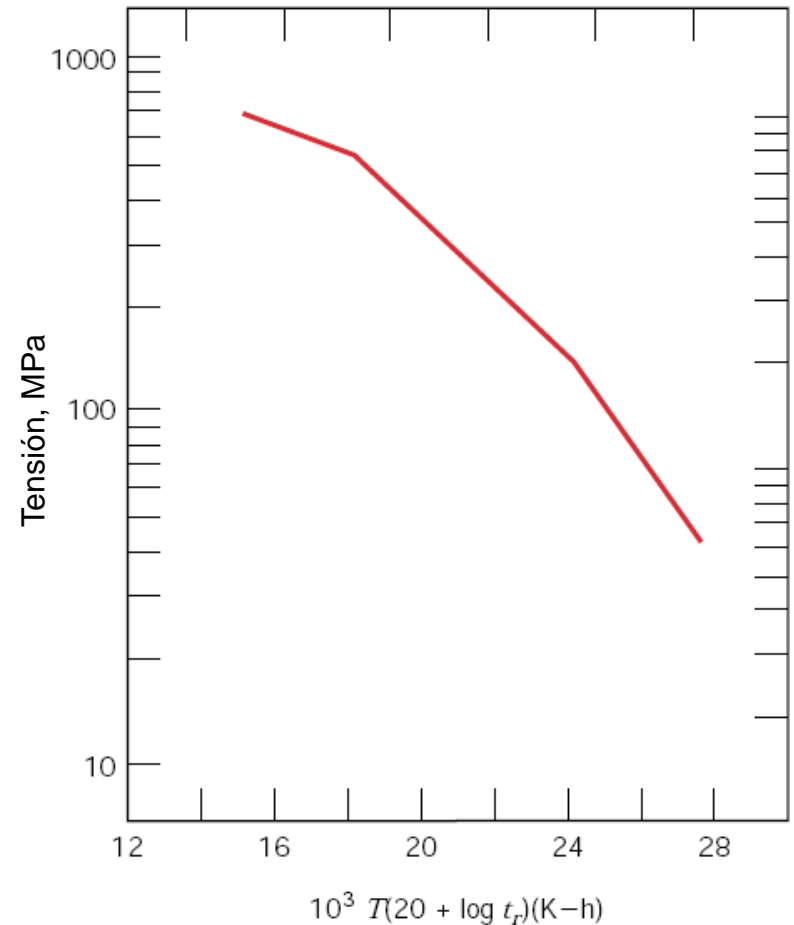
$$\mathbf{L.M. = T(C + \log t_r)}$$

Donde: C = cte

T en grados Kelvin

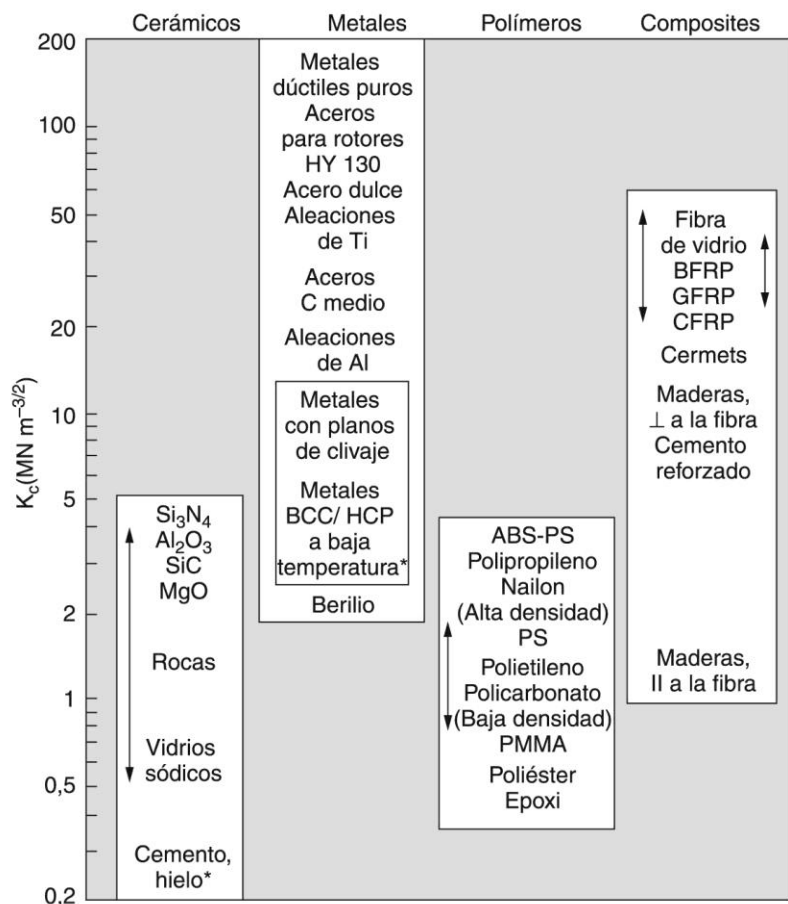
$t_r$  = tiempo de ruptura en horas

El  $t_r$  para un determinado material a una  $\sigma$  determinada varía con T de tal forma que L.M. es cte.



Logaritmo de la tensión frente al parámetro de Larson-Miller para el acero S-590

# 5.6. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES EN FUNCIÓN DE SU TENACIDAD



Tenacidad a la fractura,  $K_c$  (valores a temperatura ambiente excepto los marcados con asterisco).

Figura 13.6 Ashby vol 1. 978-84-291-7255-3 © Ed. Reverté, 2008

Tenacidad,  $G_c$ , y tenacidad a la fractura,  $K_c$ .

Material	$G_c$ ( $\text{kJ m}^{-2}$ )	$K_c$ ( $\text{MN m}^{-3/2}$ )
Metales dúctiles puros (p.ej. Cu, Ni, Ag, Al)	100-1000	100-350
Aceros para rotores (A533; Discalloy)	220-240	204-214
Aceros para vasijas a presión (HY130)	150	170
Aceros de alta resistencia (HSS)	15-118	50-154
Aceros suaves	100	140
Aleaciones de titanio (Ti6Al4V)	26-114	55-115
GFRP	10-100	20-60
Fibra de vidrio (fibra de vidrio /epoxi)	40-100	42-60
Aleaciones de aluminio (alta y baja resistencia)	8-30	23-45
CFRP	5-30	32-45
Maderas comunes, grieta $\perp$ a la fibra	8-20	11-13
Fibra de boro-epoxi	17	46
Acero C medio	13	51
Polipropileno, PP	8	3
Poliétileno (baja densidad), LDPE	6-7	1
Poliétileno (alta densidad), HDPE	6-7	2
ABS poliestireno	5	4
Nailon, PA	2-4	3
Hormigón armado	0,2-4	10-15
Fundición	0,2-3	6-20
Poliestireno, PS	2	2
Maderas comunes, grieta $\parallel$ a la fibra	0,5-2	0,5-1
Policarbonato, PC	0,4-1	1,0-2,6
Cermets carburo de cobalto/wolframio	0,3-0,5	14-16
Polimetacrilato de metilo, PMMA	0,3-0,4	0,9-1,4
Epoxi	0,1-0,3	0,3-0,5
Granito (granito Westerly)	0,1	3
Poliéster	0,1	0,5
Nitruro de silicio, $\text{Si}_3\text{N}_4$	0,1	4-5
Berilio	0,08	4
Carburo de silicio, SiC	0,05	3
Magnesia, MgO	0,04	3
Cemento/hormigón no reforzado	0,03	0,2
Calcita (mármol, caliza)	0,02	0,9
Alúmina, $\text{Al}_2\text{O}_3$	0,02	3-5
Esquisto (petrolífero)	0,02	0,6
Vidrio sódico	0,01	0,7-0,8
Porcelana eléctrica	0,01	1
Hielo	0,003	0,2*

\* Valores a temperatura ambiente excepto el señalado.

978-84-291-7255-3 © Ed. Reverté, 2008