

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)

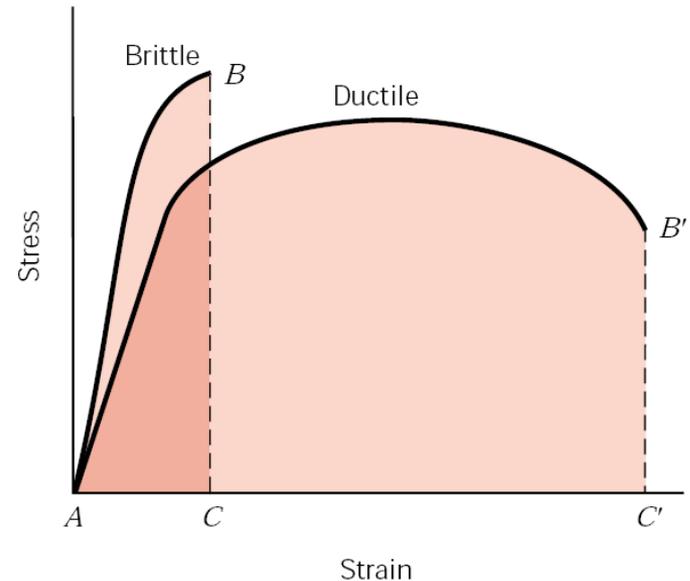
TENSIONES {
 Tracción
 Compresión
 Cizalladura
 Torsión

Según la capacidad el material de experimentar deformación plástica

Dúctil {
 ↑ Deformación plástica
 ↑ Energía absorbida

Frágil {
 ↓ Deformación plástica
 ↓ Energía absorbida

A }
 R } DUCTILIDAD = función {
 $\frac{T}{d\varepsilon / dt}$
 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 σ

5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

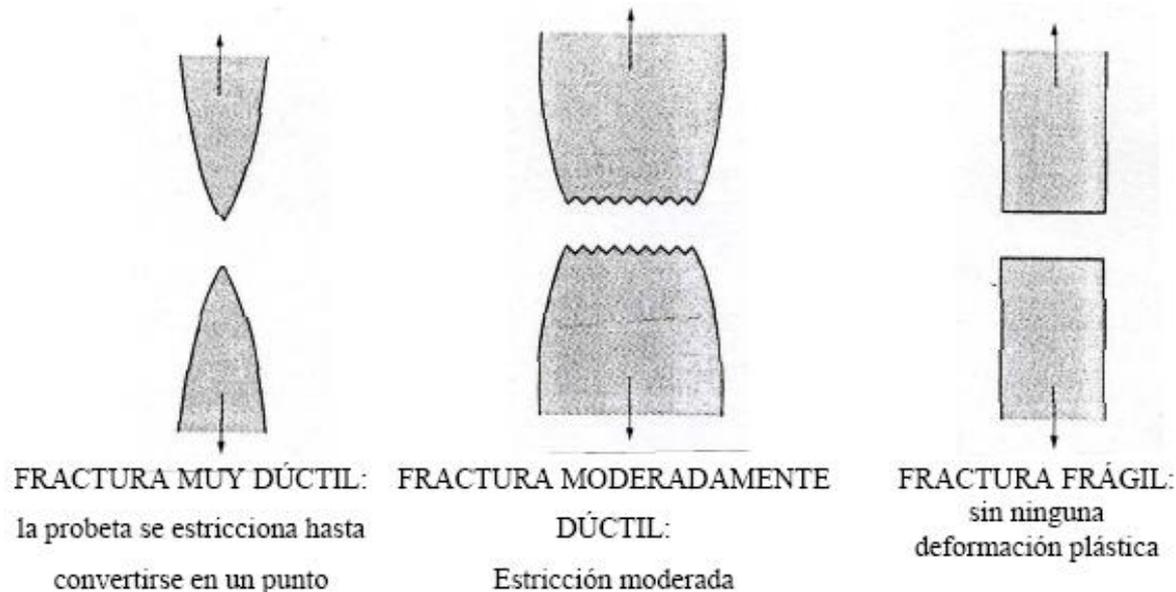
Se prefiere un fractura dúctil por:

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



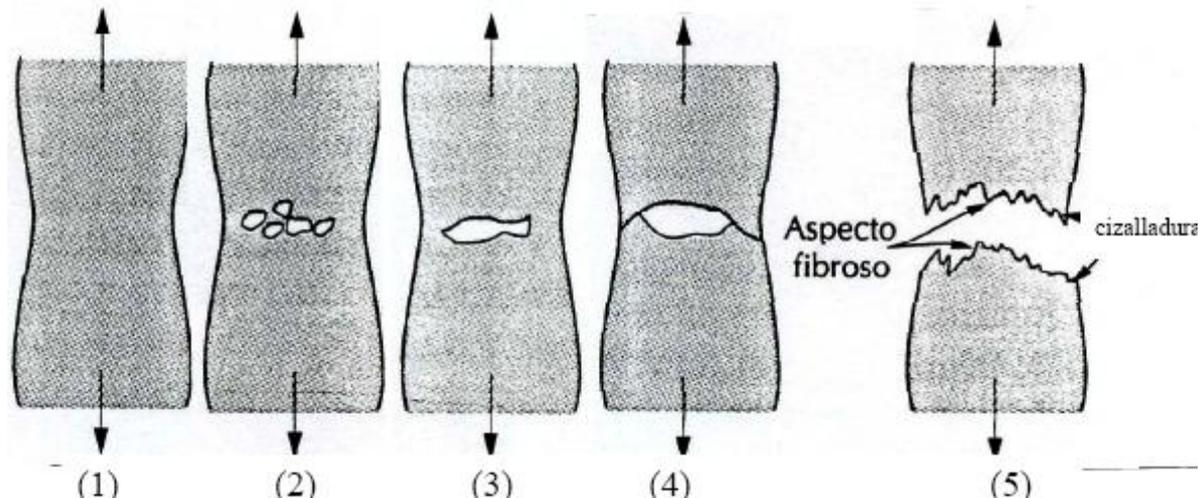
5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

5.1.1. Fractura dúctil

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

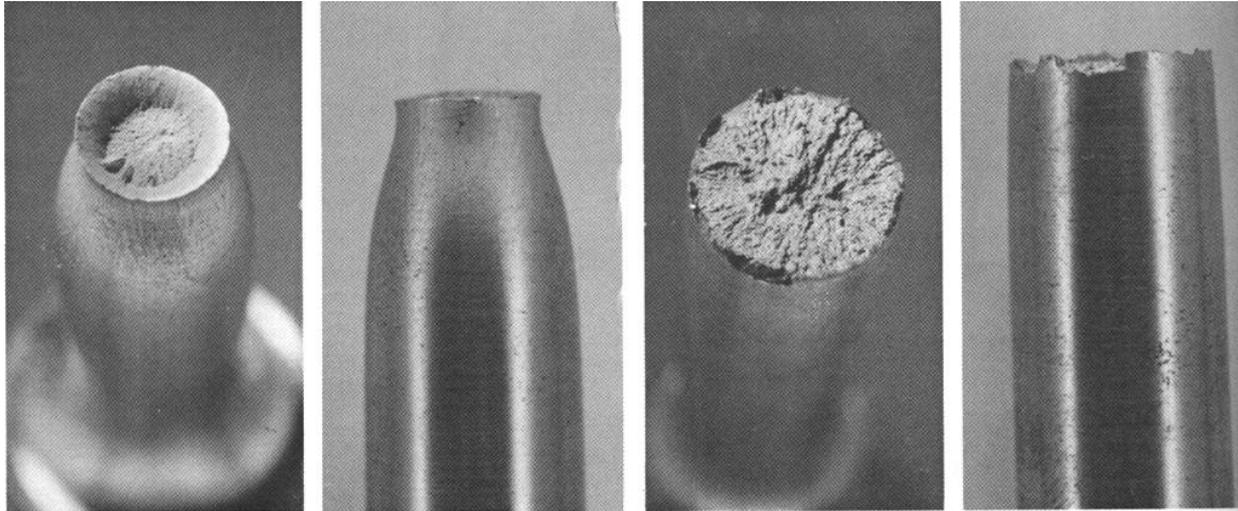
La fractura se da en etapas:

- 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)



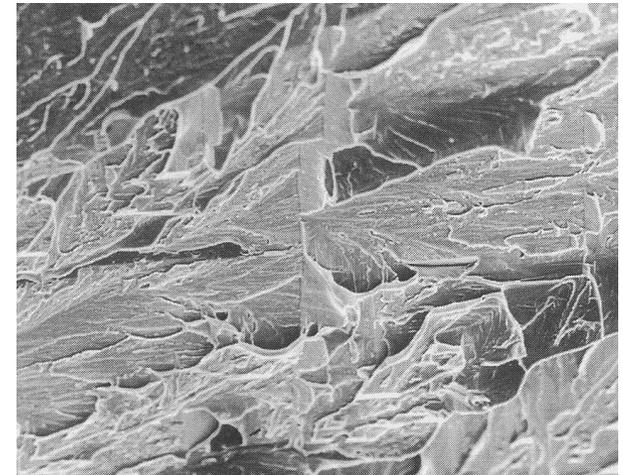
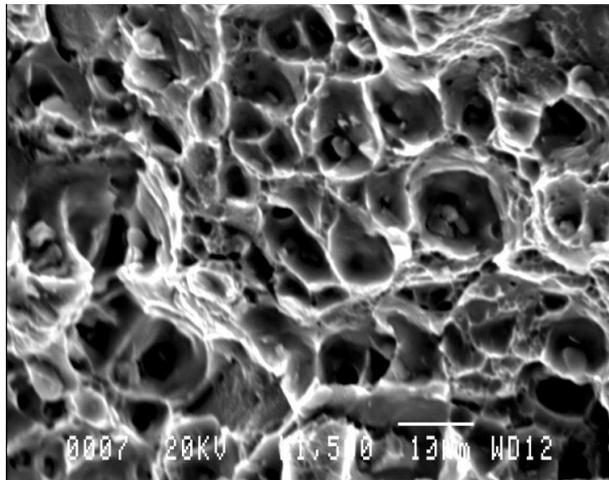
5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

5.1.1. Fractura dúctil



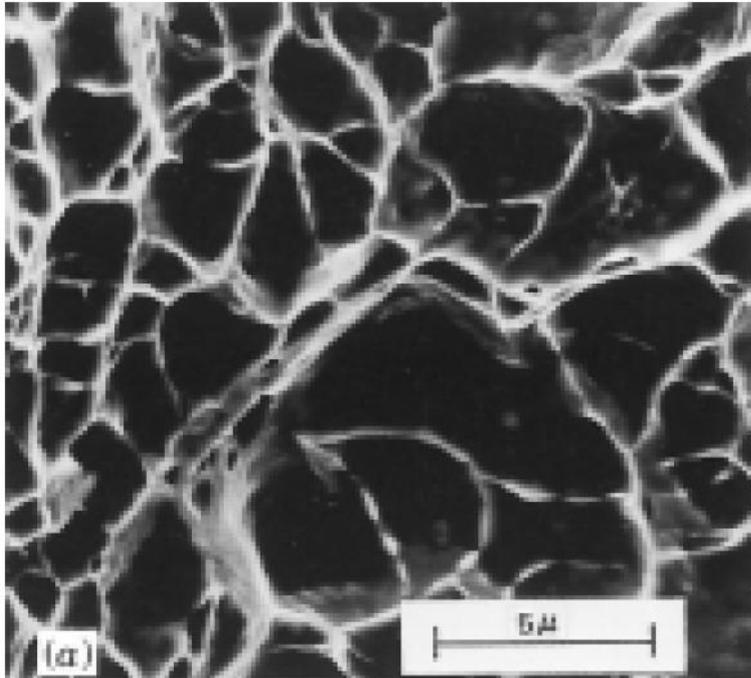
Fractura dúctil copa-cono en el aluminio

Fractura frágil en un acero bajo en carbono

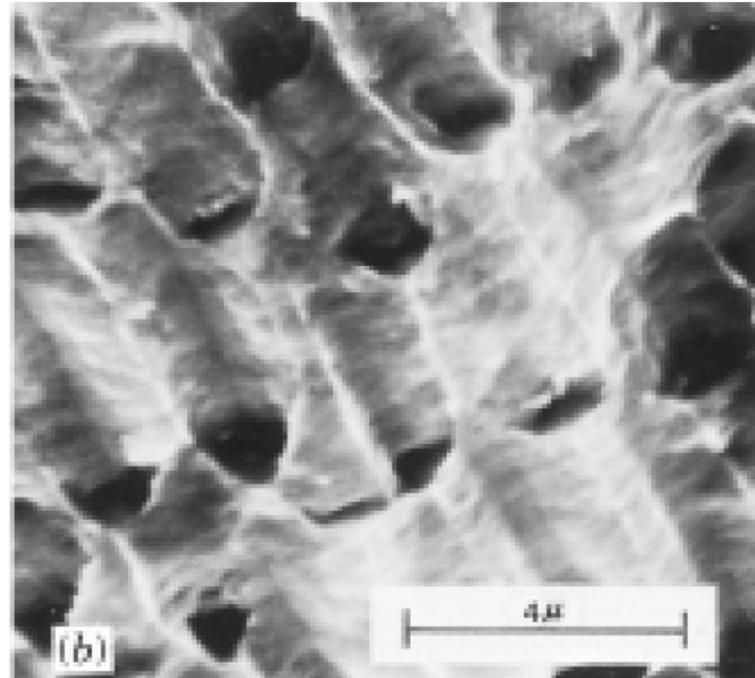


5.1. FUNDAMENTOS DE LA FRACTURA

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

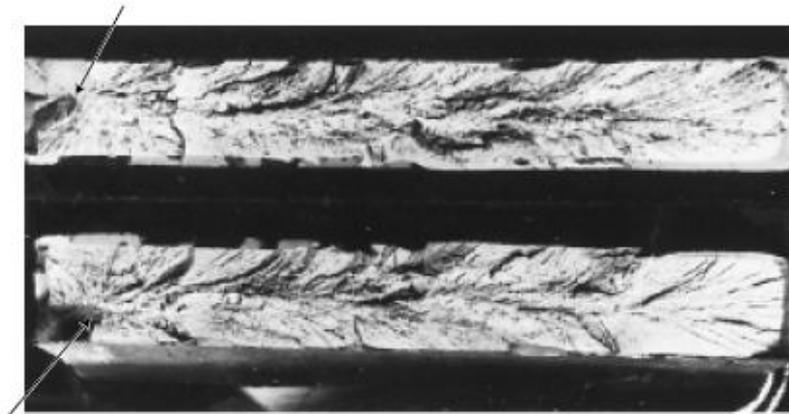
5.1.2. Fractura frágil

Sin deformación plástica y propagación rápida de la grieta.

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

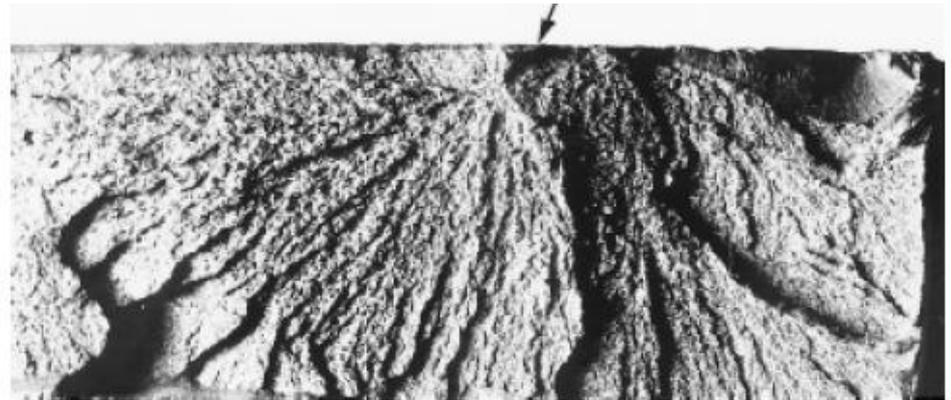
Detalles característicos:

- 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)*



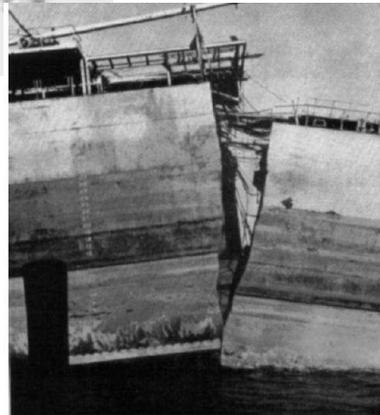
Rotura del petrolero Schenectady

Construidos: ~2700

Barcos con roturas: 400

Roturas graves : 90

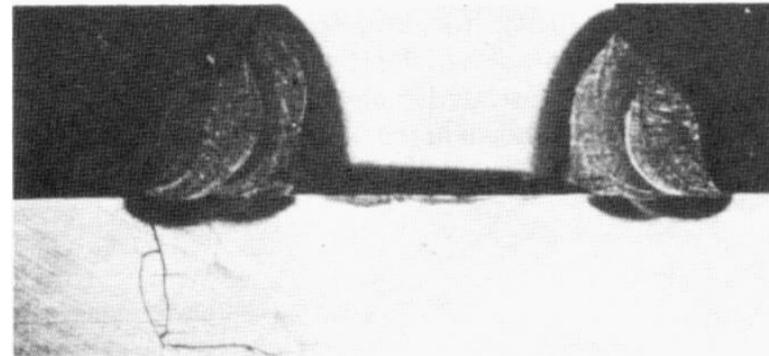
Fallo total: 20 (10 de ellos partidos en dos)



• *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



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 σ aplicada \uparrow en la punta de la grieta.

- ♦ El grado en que la σ es concentrada depende de la orientación y la geometría de la grieta
- ♦ La magnitud de la σ 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 (σ_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

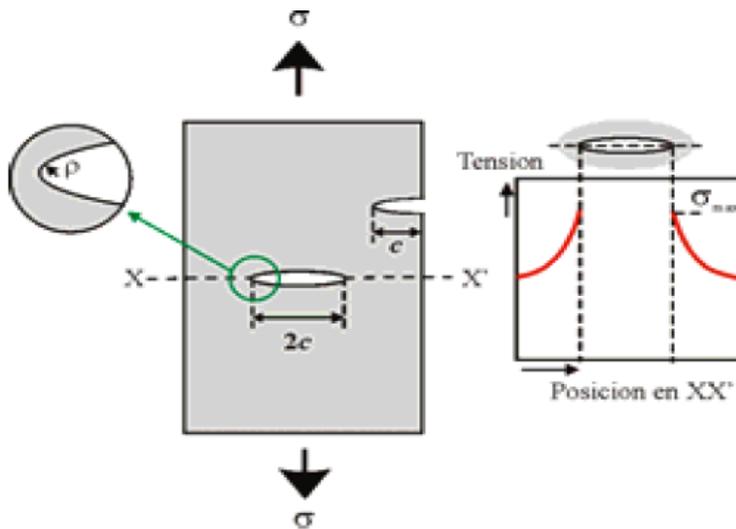
Si la grieta es elíptica y está orientada perpendicular a la σ aplicada, la $\sigma_{\text{máx}}$ en el extremo de la grieta viene dada por:

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

$\sigma \Rightarrow$ 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 σ 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:

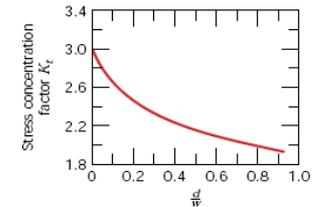
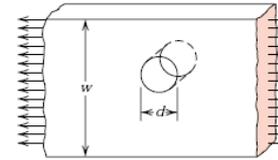
ϵ plástica si $\sigma > \sigma_y \Rightarrow$ distribución más uniforme de la σ en el concentrador $\Rightarrow K_t$ máx menor que el teórico

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

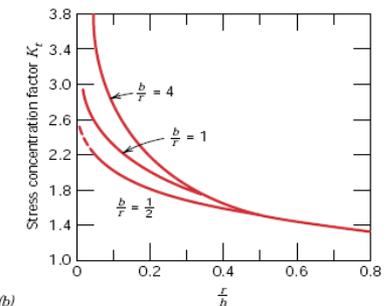
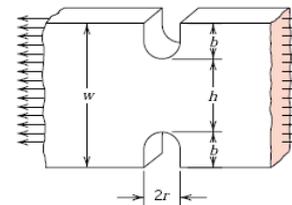
Al aplicar un esfuerzo de tracción \Rightarrow rotura cuando la R cohesiva teórica sea superada en la punta de uno de los defectos \Rightarrow formación de una grieta que propaga rápidamente.

Si no existieran defectos:

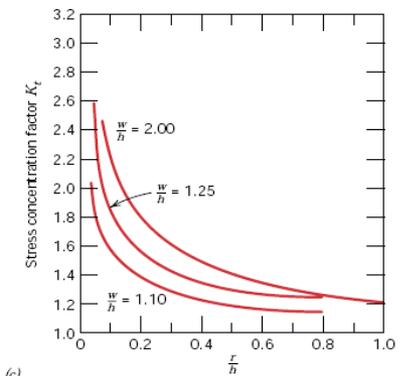
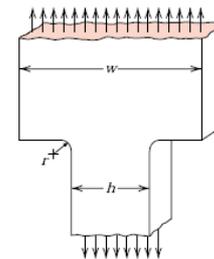
$R_{fractura} = R_{cohesiva}$



(a)



(b)



(c)

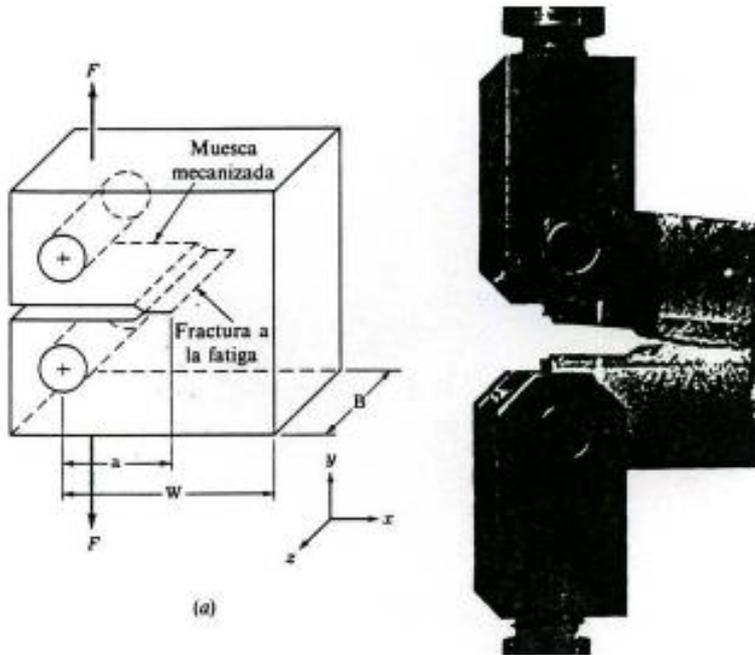
Curvas teóricas de los factores de concentración de tensiones para tres geometrías sencillas

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 σ_c

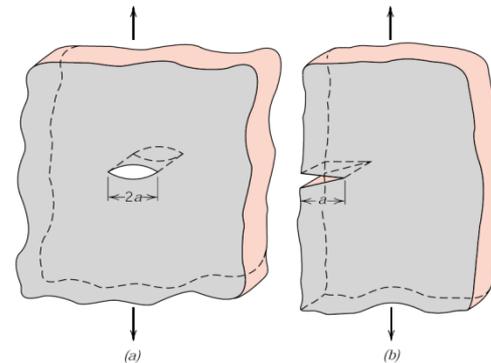
Se define un valor crítico del factor de intensidad de tensiones \Rightarrow La **Tenacidad de fractura, K_c** , es una medida de la R del material a la fractura frágil cuando existe una grieta



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

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

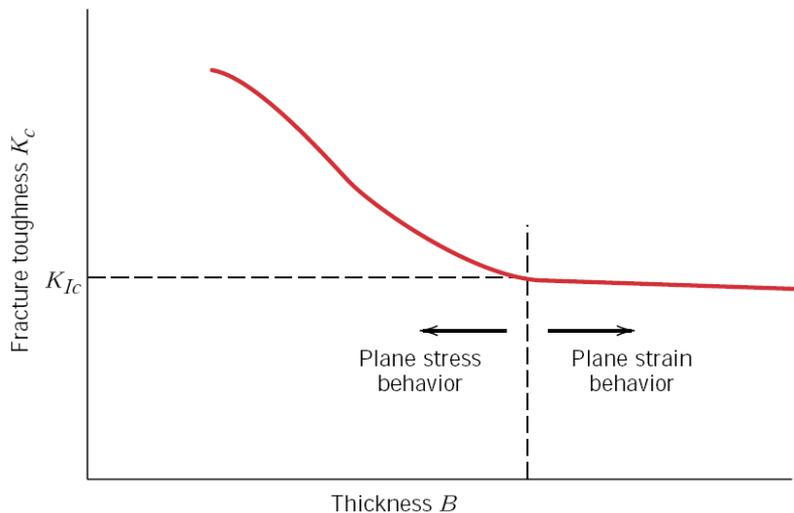
5.2. PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

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		$MPa\sqrt{m}$
Metales			
Aleación de aluminio ^a (2024-T351)	325		36
Aleación de aluminio ^a (7075-T651)	505		29
Acero aleado ^a (4340 revenido @ 260°C)	1640		50,0
Acero aleado ^a (4340 revenido @ 425°C)	1420		87,4
Aleación de titanio ^a (Ti-6Al-4V)	910		44-66
Cerámicas			
Óxido de aluminio	-		3,0-5,3
Vidrio común	-		0,7-0,8
Hormigón	-		0,2-1,4
Polímeros			
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} , σ , 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)*, σ_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 (σ) y la K_{Ic} son prefijadas por la situación de diseño, entonces se calculará el *tamaño de grieta máximo* que se puede permitir.

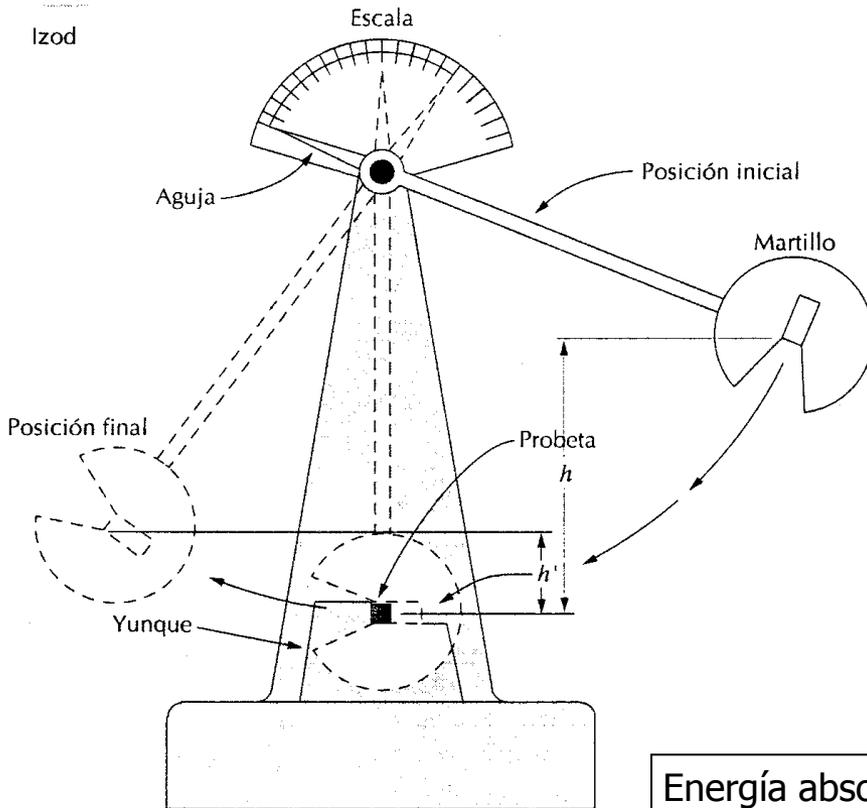
$$a_c \leq \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{Y \sigma} \right)^2$$

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:



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')

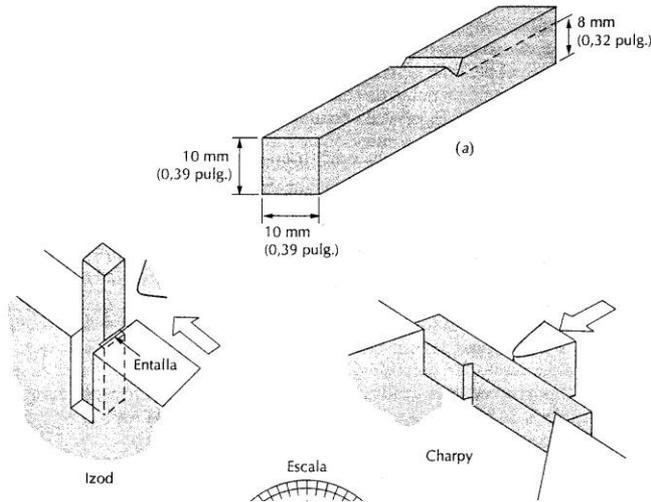
Energía absorbida en el impacto = Pérdida de energía potencial ($h-h'$)

<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:

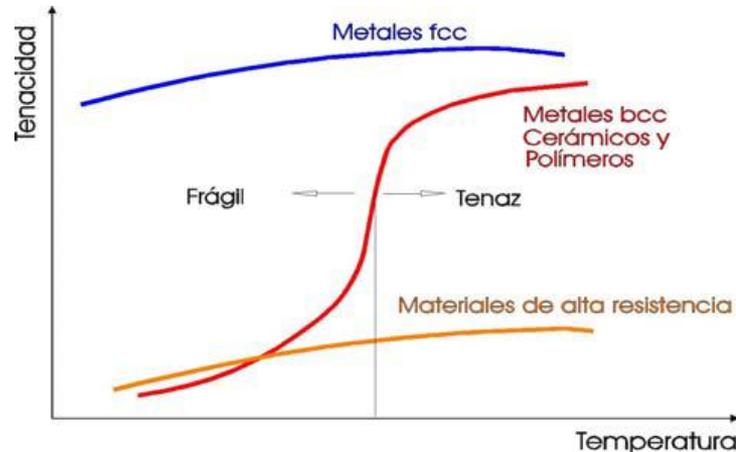
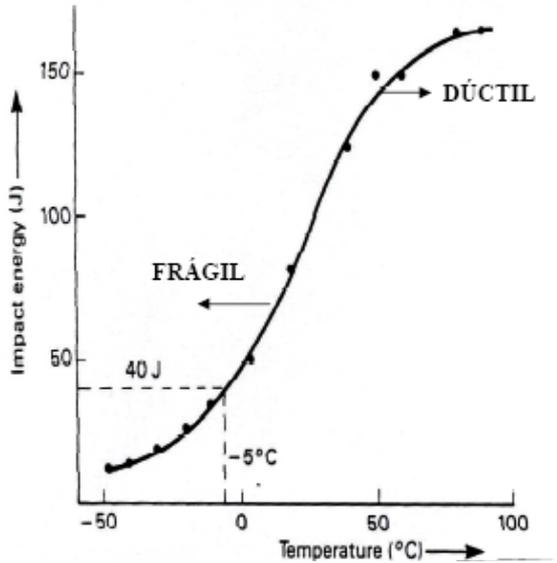
- ① Tamaño y forma de probeta
- ② Configuración y forma de la entalla

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}

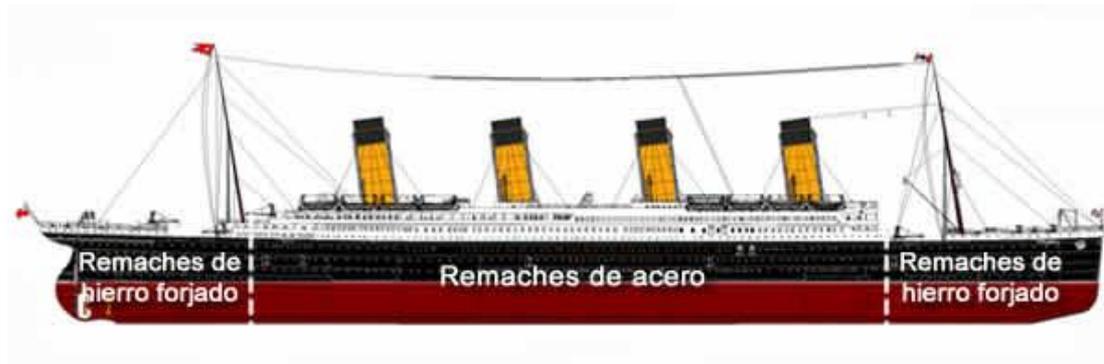
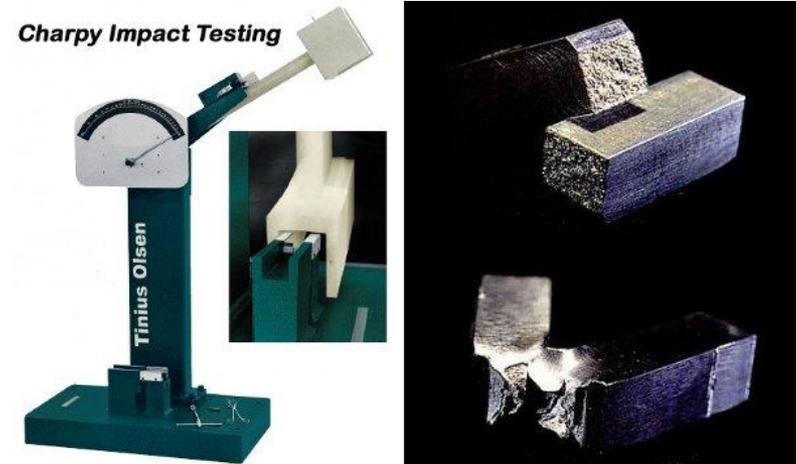
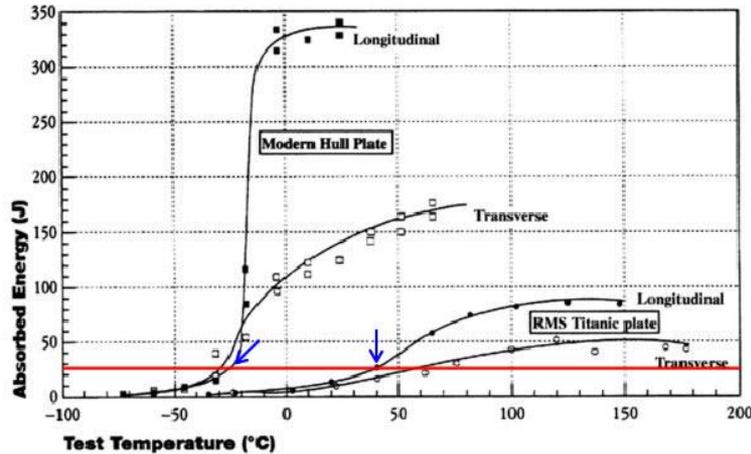
$T_{D-F} \Rightarrow$ Sensible a la composición y a la microestructura

5.3. ENSAYOS DE FRACTURA POR IMPACTO

5.3.2. Transición Dúctil-Frágil

Hundimiento del Titanic

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

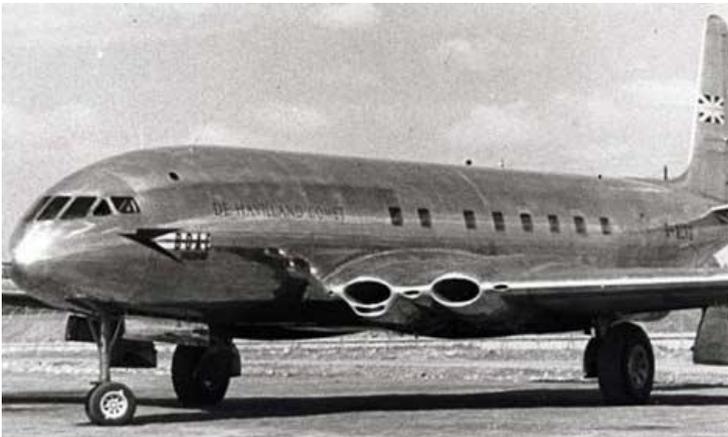


5.4. FALLO POR FATIGA

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.

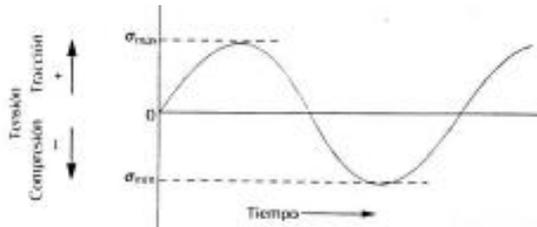
28 de abril de 1988 \Rightarrow vuelo 243 entre Hilo y Honolulu (Hawaii) de la aerolínea Aloha Airlines, realizado por un Boeing 737-200

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

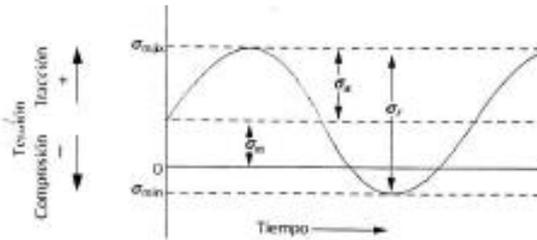
5.4. FALLO POR FATIGA

5.4.1. Tensiones cíclicas

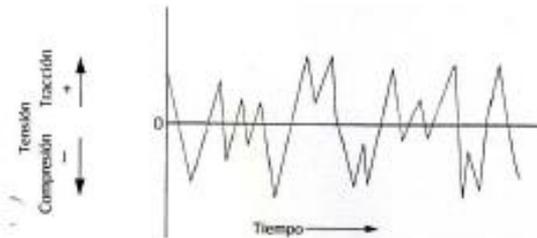
① CICLO SIMÉTRICO DE CARGA INVERTIDA



② CICLO DE CARGA REPETIDA



③ CICLO DE TENSIONES AL AZAR



La σ 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 (σ_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 (σ_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 (σ_a)** \Rightarrow Mitad del intervalo de tensiones

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

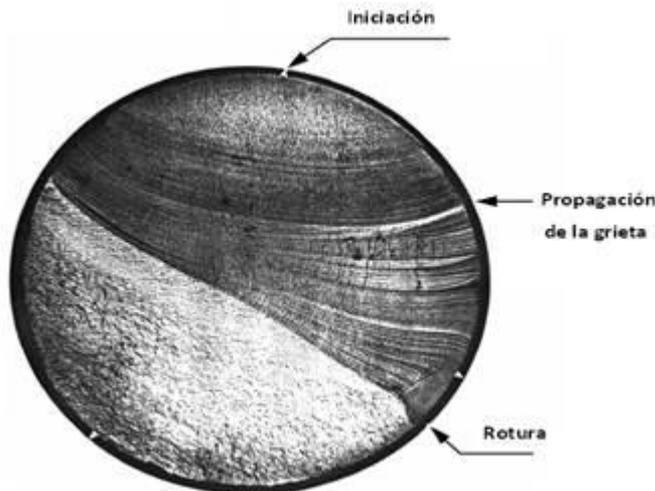
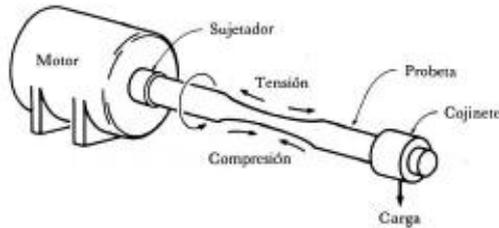
④ **Cociente de tensiones (R)** \Rightarrow Cociente entre las amplitudes.

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

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 σ_a (S) \Rightarrow menor es N

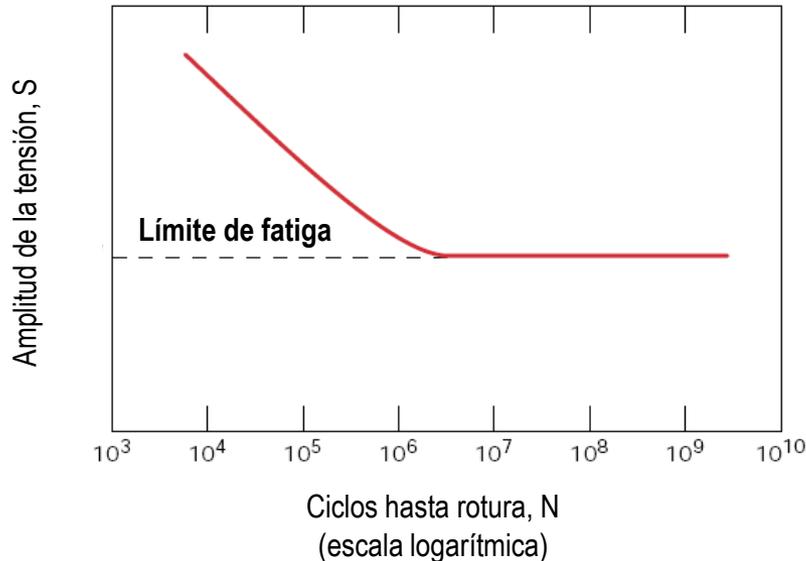
5.4. FALLO POR FATIGA

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**:

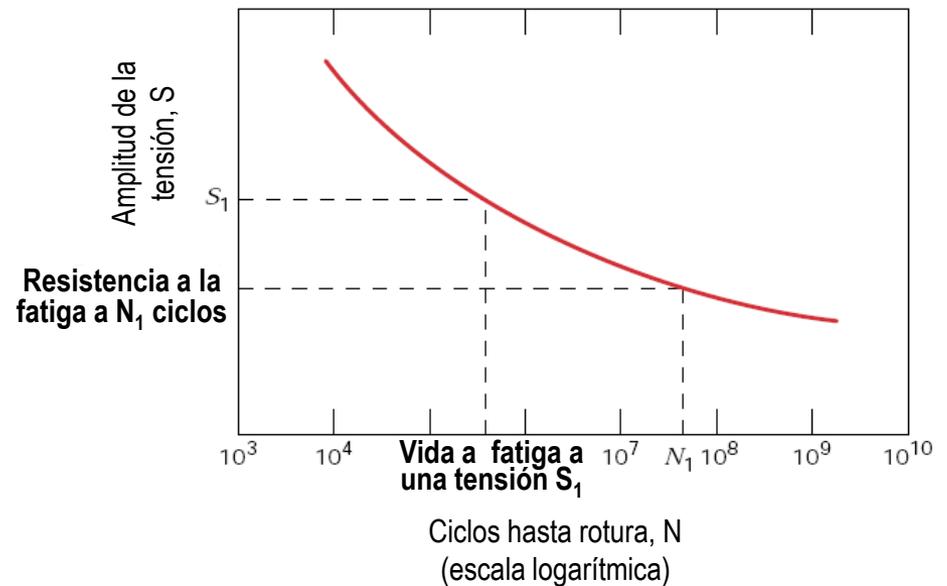
Con **límite de fatiga**

Aleaciones férreas y de Ti



Sin **límite de fatiga**

Aleaciones de Al, Cu, Mg,...



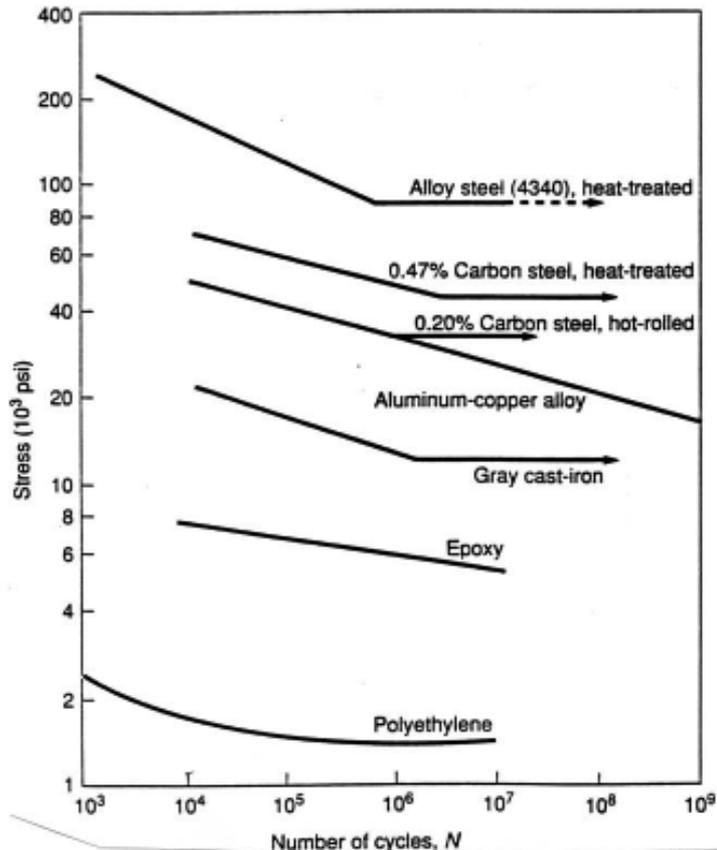
El límite de fatiga es un valor de tensión por debajo del cual no ocurre rotura por fatiga.

S continúa \downarrow cuando $N \uparrow$

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 σ que produce la rotura después de un determinado n° de ciclos

Vida a fatiga (Nf): N° 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, σ_m y frecuencia de ensayo.

Existen dos dominios de comportamiento a fatiga:

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

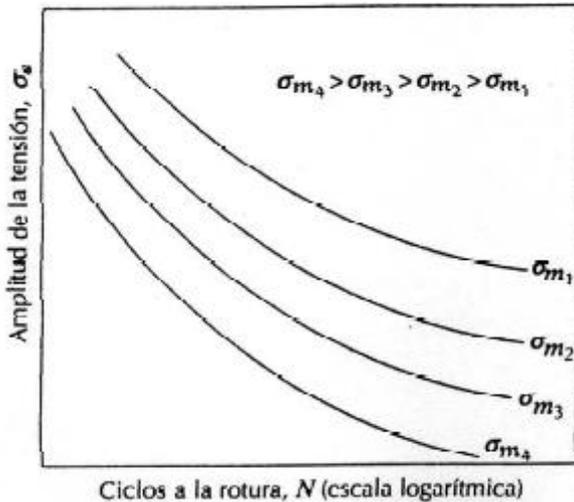
$$\sigma \uparrow, \epsilon_{\text{elástica}} + \epsilon_{\text{plástica}} \Rightarrow Nf \downarrow$$

♦ **Fatiga de alto n° 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 σ_a para un determinado valor de σ_m . La σ_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 $\sigma \Rightarrow \downarrow N_f$

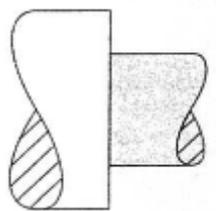
♦ Tratamientos superficiales

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

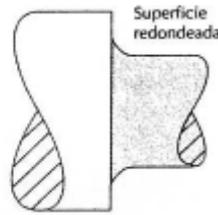
Granallado (esfuerzos residuales de compresión) $\Rightarrow \uparrow N_f$

♦ Endurecimiento superficial

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



DISEÑO POBRE
(canto vivo)



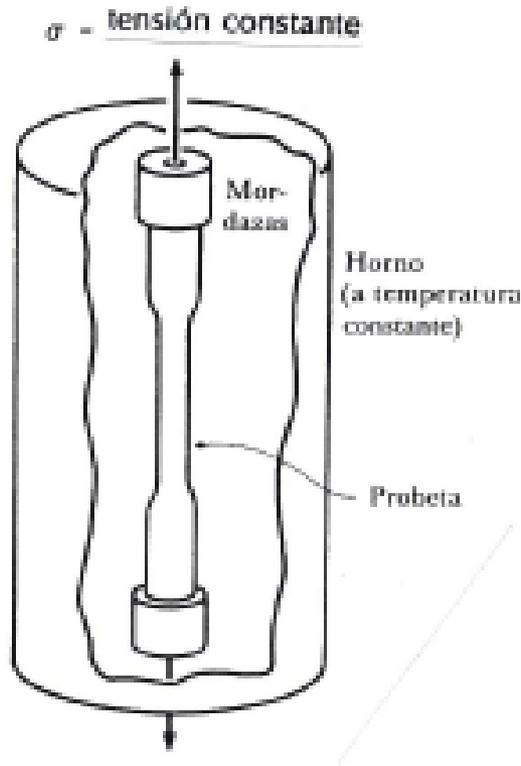
DISEÑO CORRECTO
(unión suave)

3) Influencia del medio

Fatiga térmica: A $\uparrow T$ por σ 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 σ 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 ϵ 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

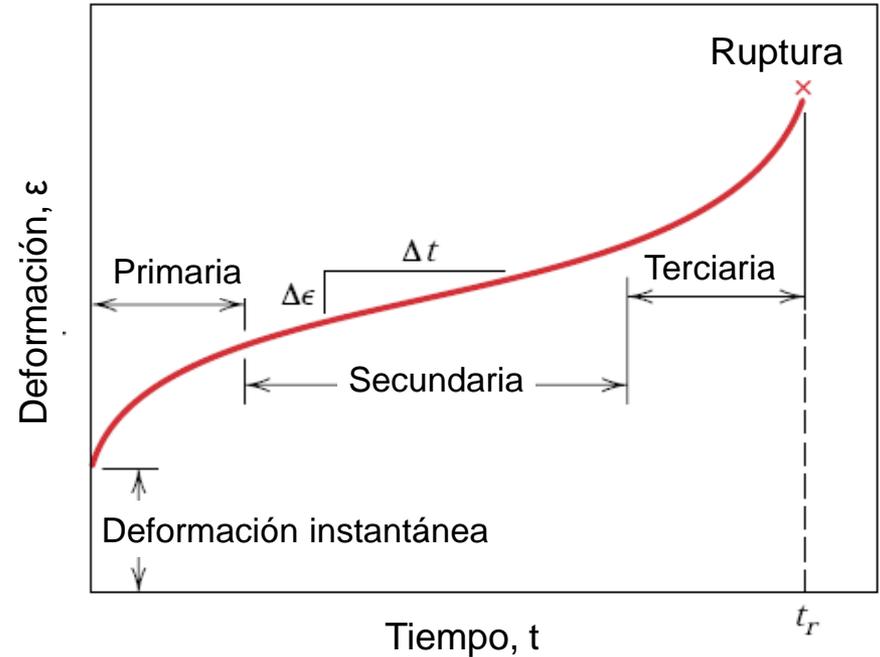
Balance entre endurecimiento por deformación y restauración

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

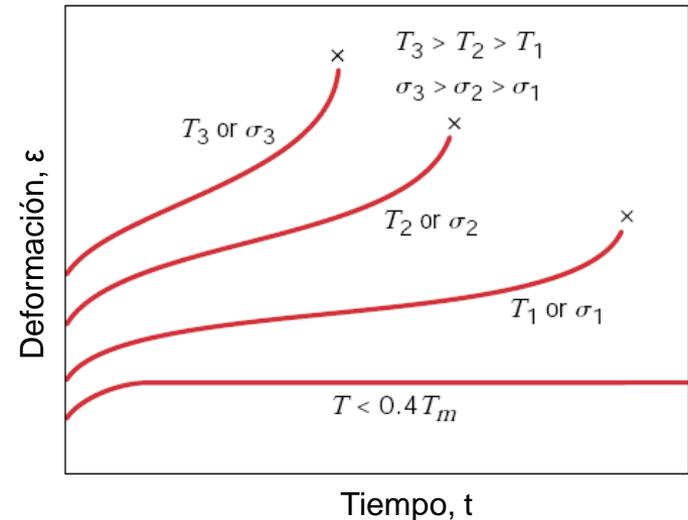
$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$$

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 σ influyen en el comportamiento a fluencia

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

Al \uparrow T o σ :

- 1) ϵ 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 σ** 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 σ :

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

donde: K_1 y n son ctes que dependen del material

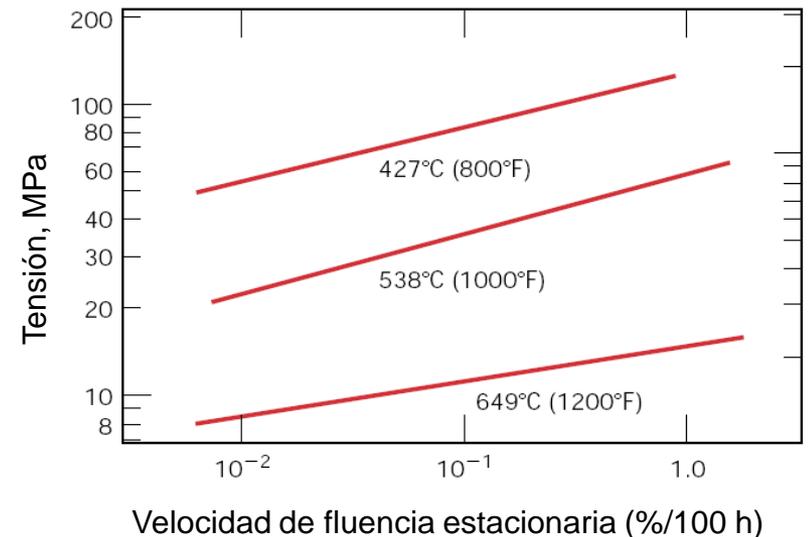
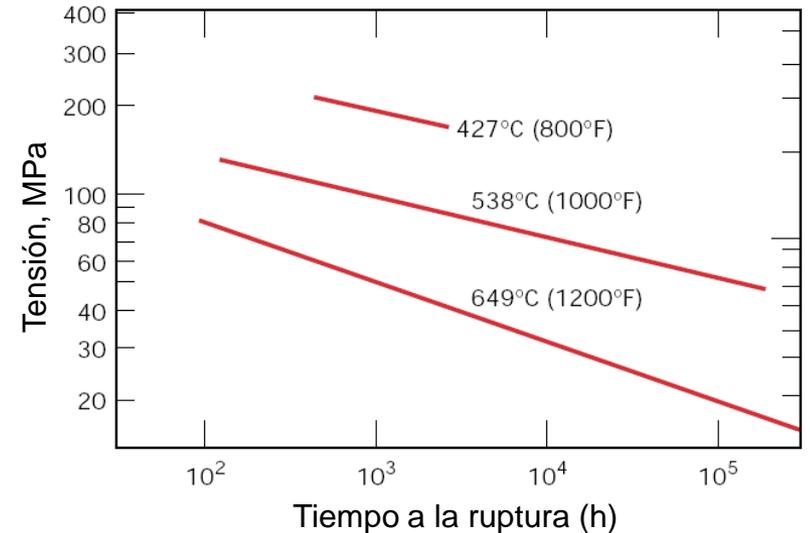
n es la pte para cada T

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:

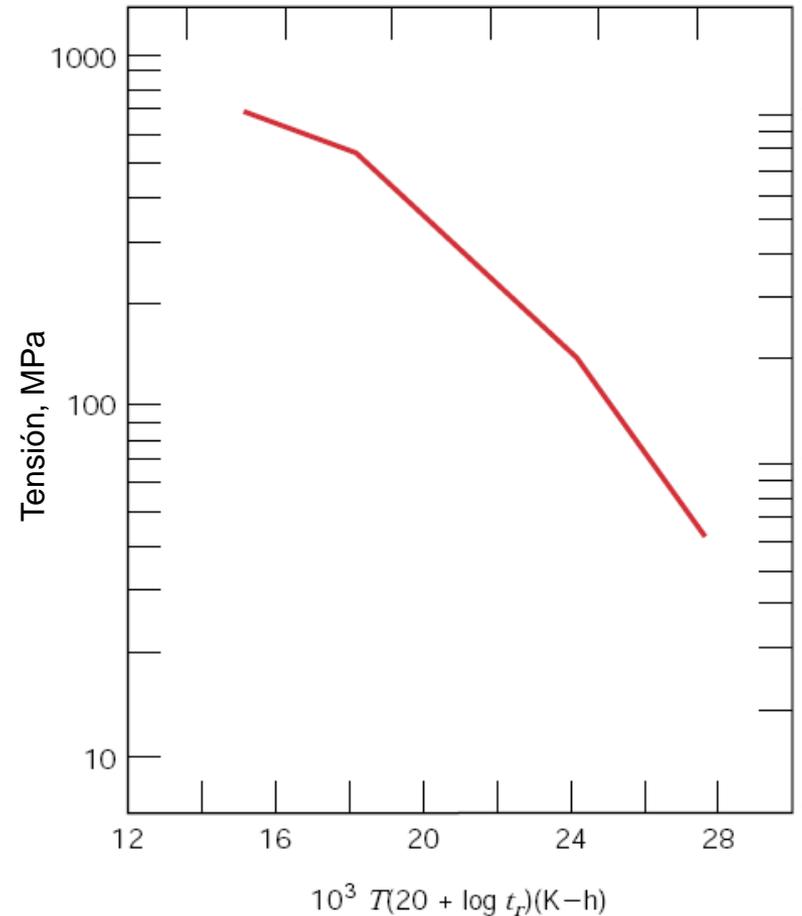
$$\mathbf{L.M. = T(C + \log t_r)}$$

Donde: C = cte

T en grados Kelvin

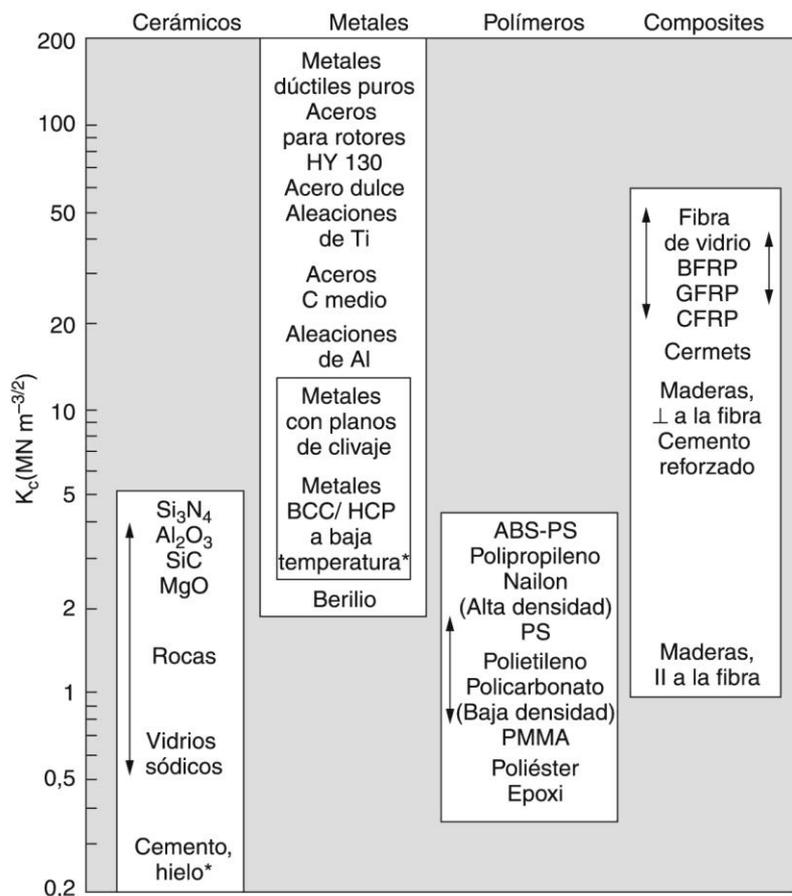
t_r = tiempo de ruptura en horas

El t_r para un determinado material a una σ 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 ($kJ m^{-2}$)	K_c ($MN m^{-3/2}$)
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, Si_3N_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, Al_2O_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