



Estudio y Ensayo de Materiales Industriales

Tenacidad y termofluencia



Contenido

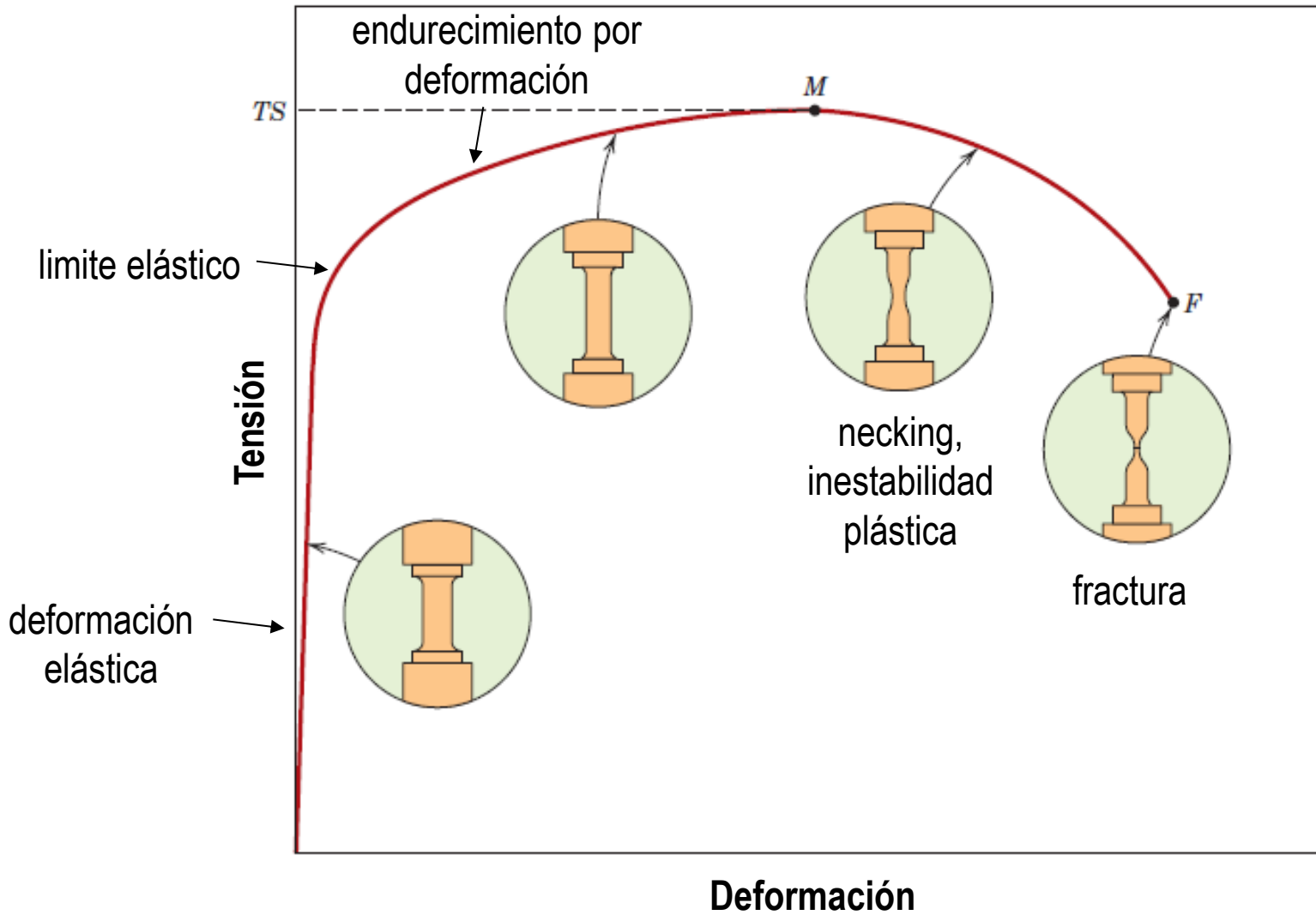
- **Tenacidad**
- **Fractura frágil y fractura dúctil**
- **Ensayo de impacto**
- **Transición dúctil-frágil**
- **Mecánica de fractura: Lineal Elastic Fracture Mechanics**
- **Termofluencia (creep)**

Bibliografía:

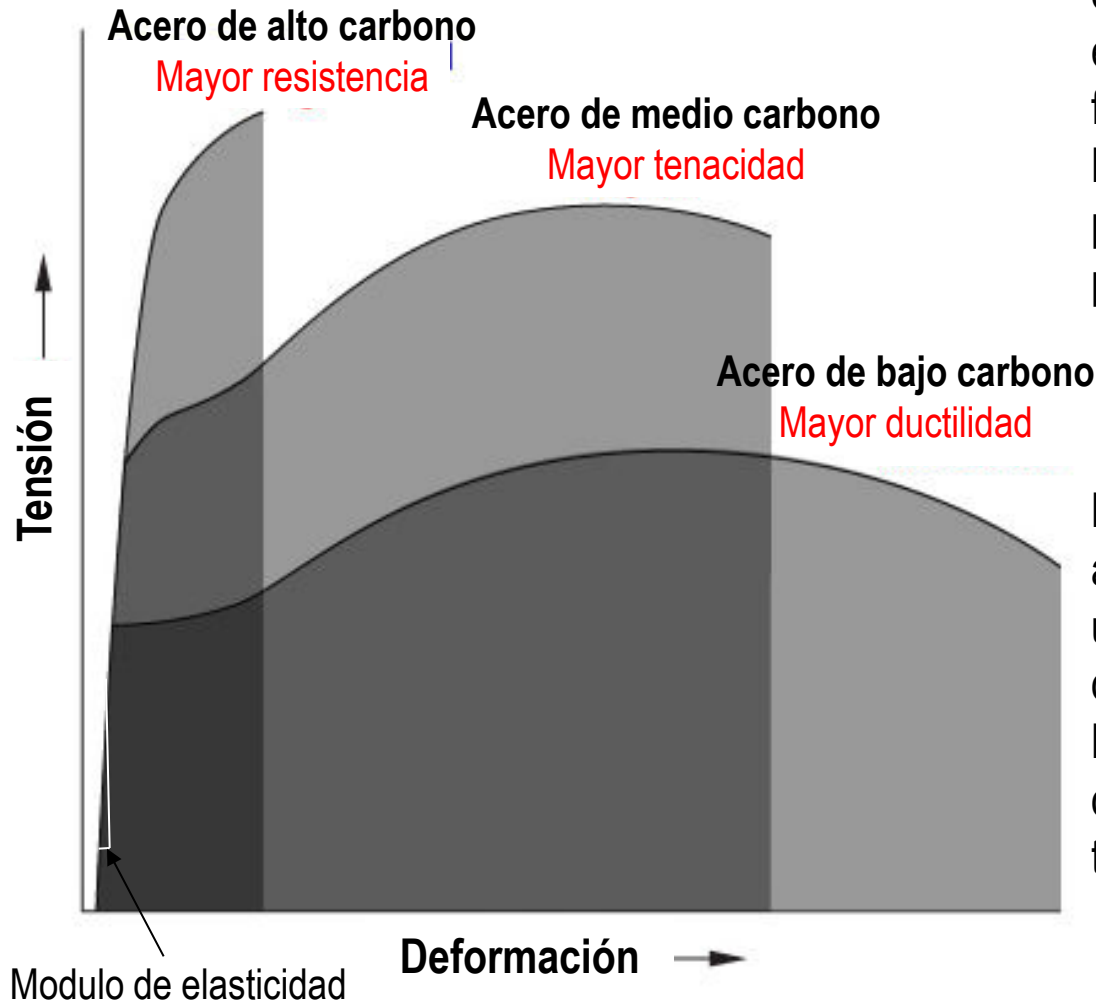
Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Cuarta edición, International Thomson. **Donald R. Askeland, Pradeep P. Phulé.**

Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Tercera edición, Mc Graw Hill. **William Smith.**

Ensayo de tracción



Tenacidad



Tenacidad: Capacidad de un material en deformarse plásticamente, y absorber energía en el proceso, antes de fracturarse.

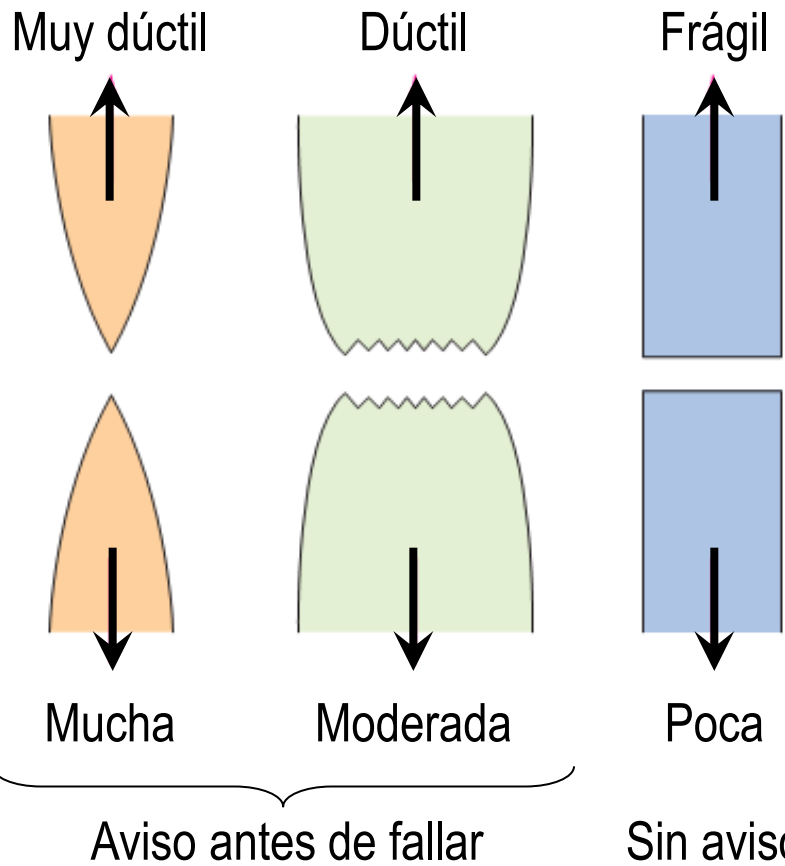
Ductilidad: Es una medida de cuanto puede un material deformarse plásticamente antes de la fractura.

La tenacidad puede medirse mediante el área de la curva tensión-deformación de un ensayo de tracción (Energía por unidad de volumen).

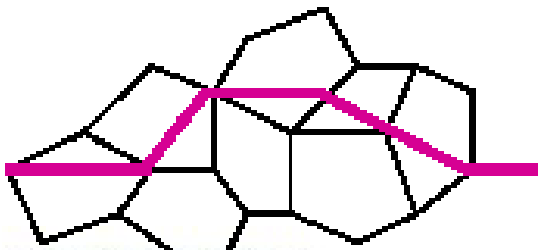
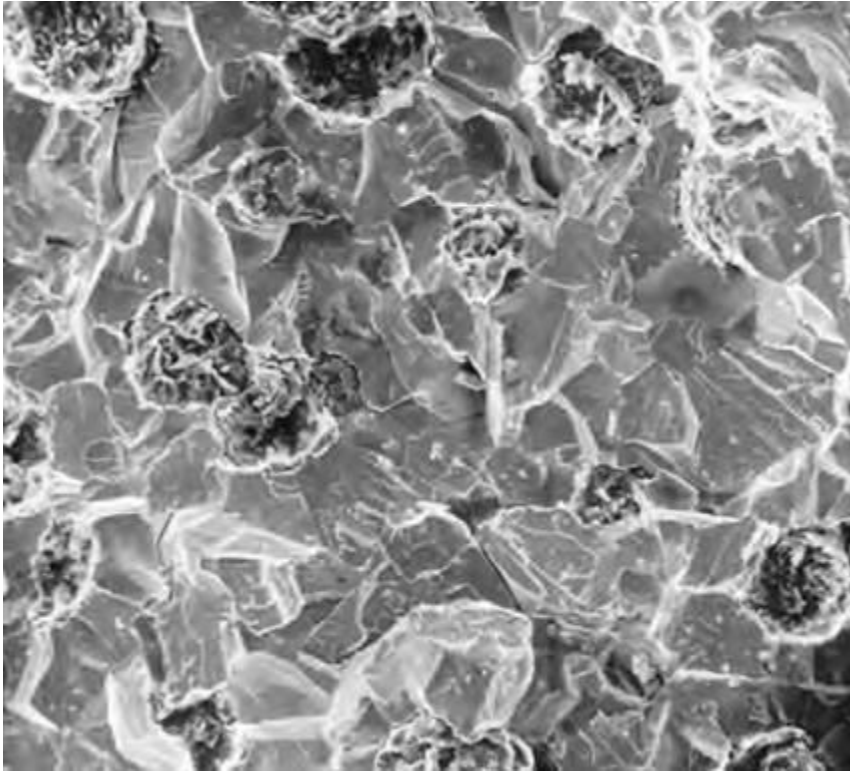
La tenacidad de un material también depende de la velocidad de carga, la temperatura y la presencia de defectos.

Fractura

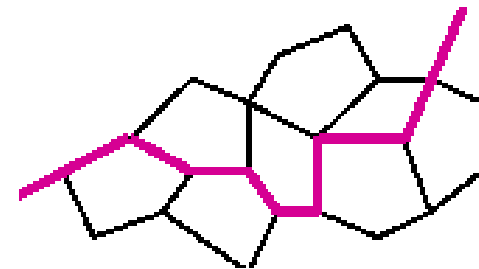
Fractura frágil y fractura dúctil



Fractura



Fractura transgranular

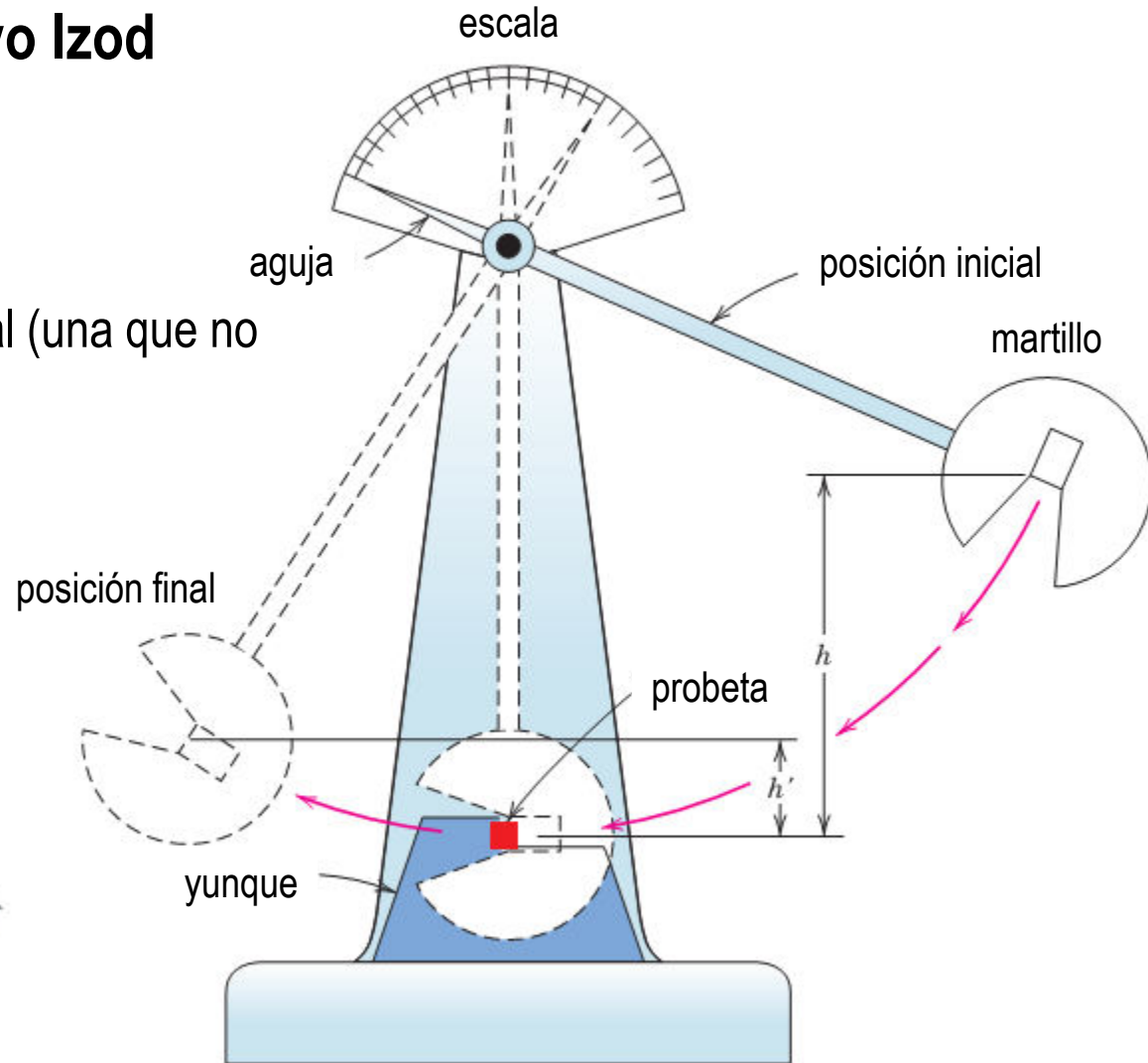
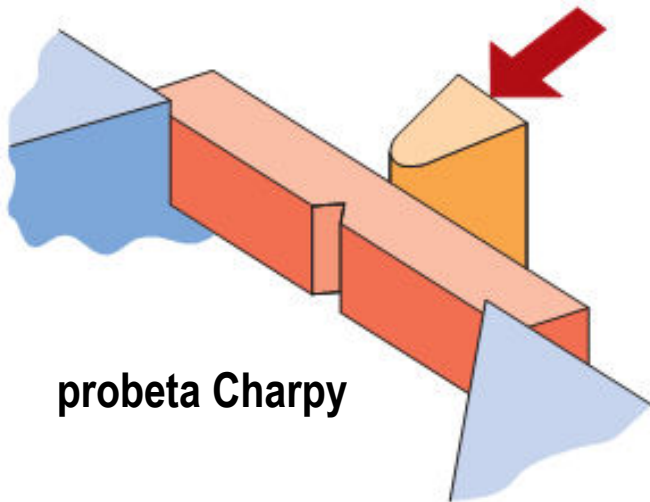


Fractura intergranular

Ensayos de impacto

Ensayo Charpy, ensayo Izod

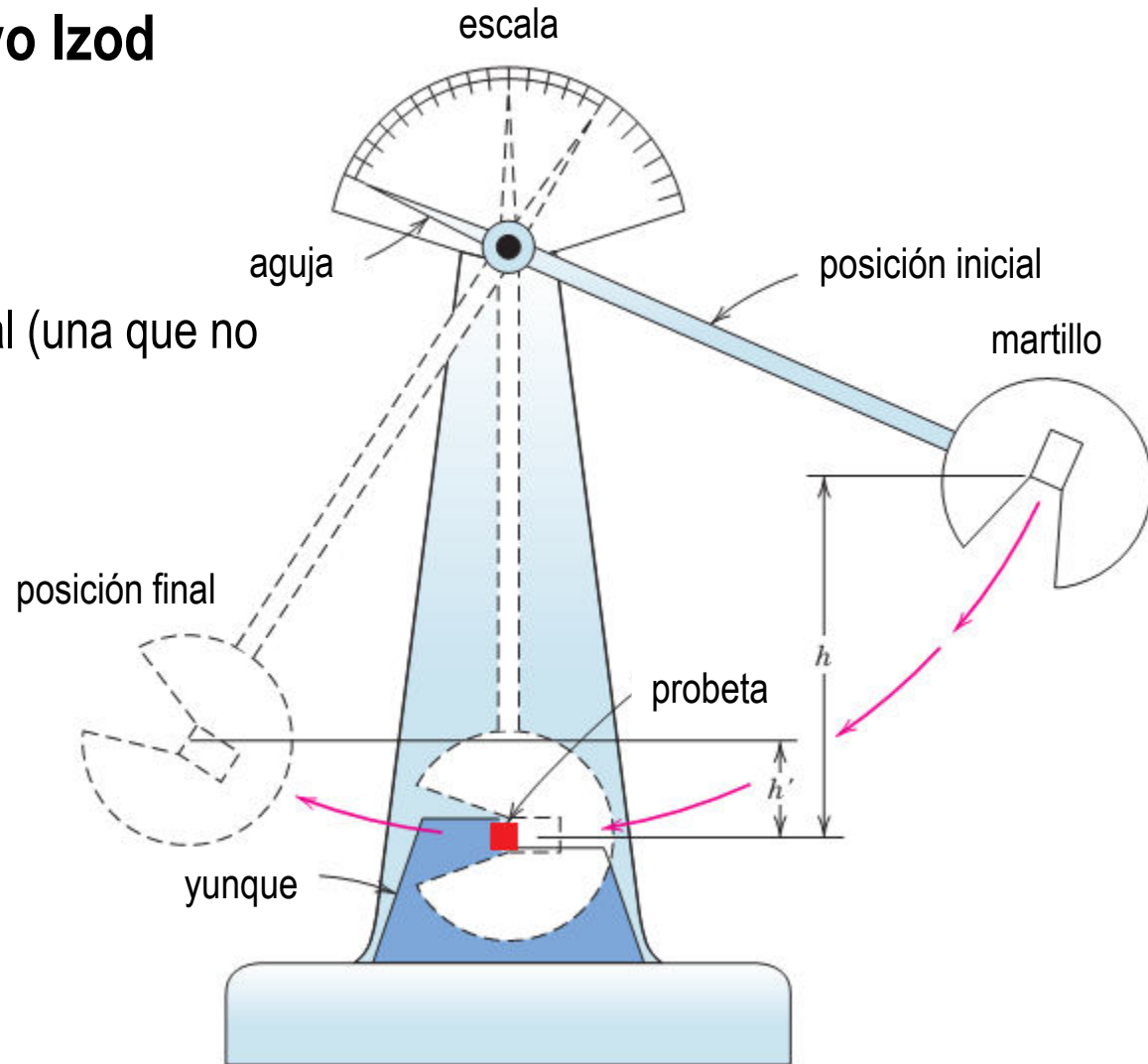
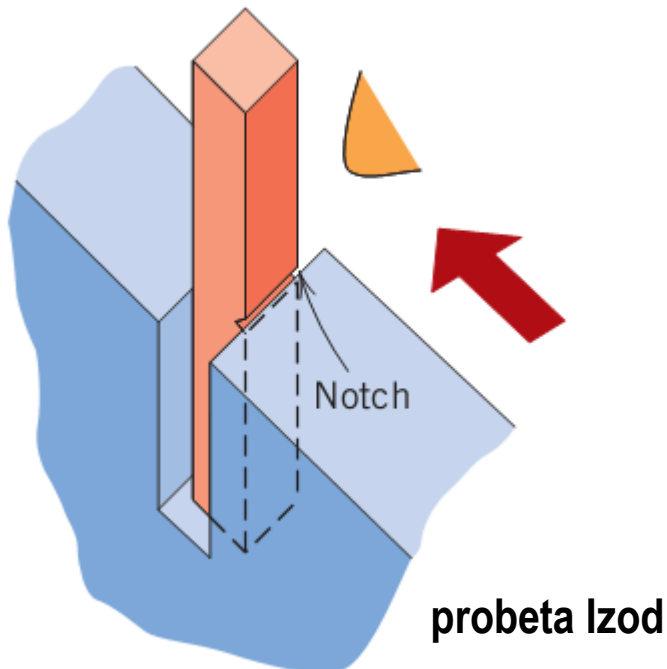
- El caso más severo para ensayar
- Sirve para control de calidad
- No mide una propiedad del material (una que no dependa de la tamaño o la forma)



Ensayos de impacto

Ensayo Charpy, ensayo Izod

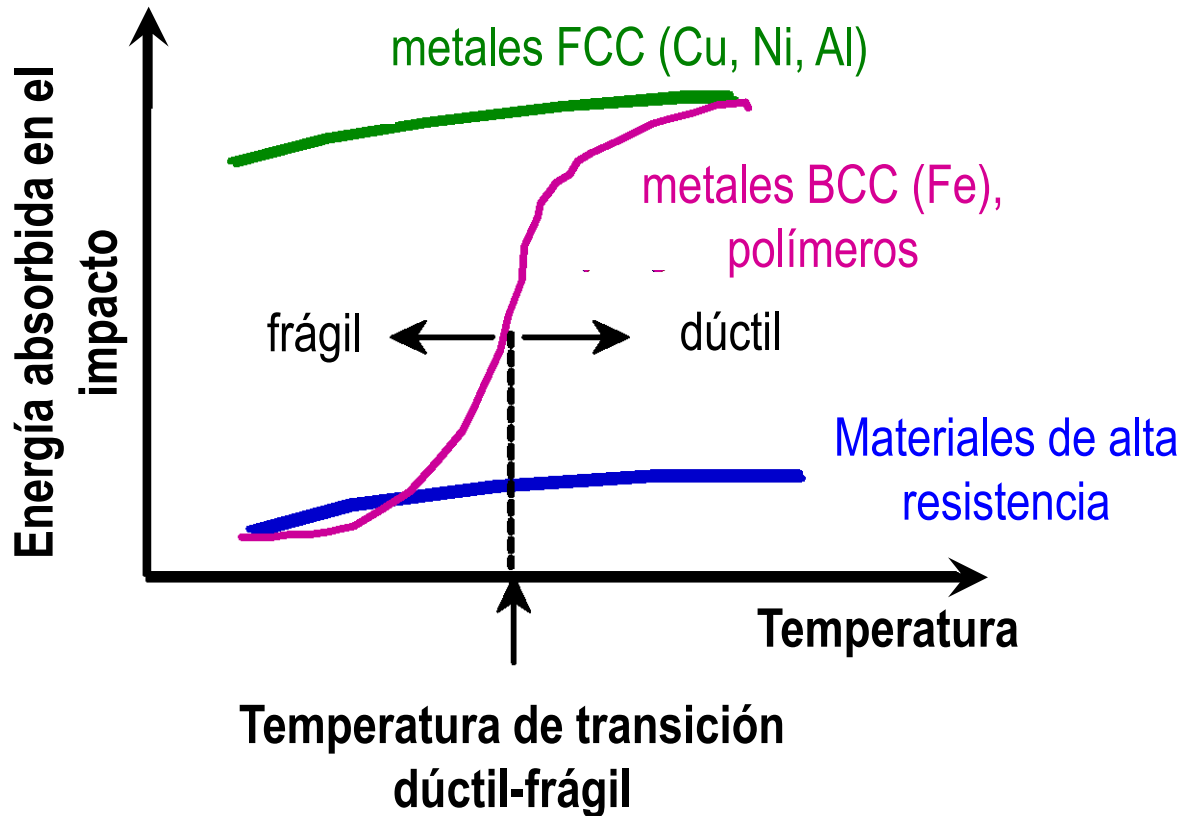
- El caso más severo para ensayar
- Sirve para control de calidad
- No mide una propiedad del material (una que no dependa de la tamaño o la forma)



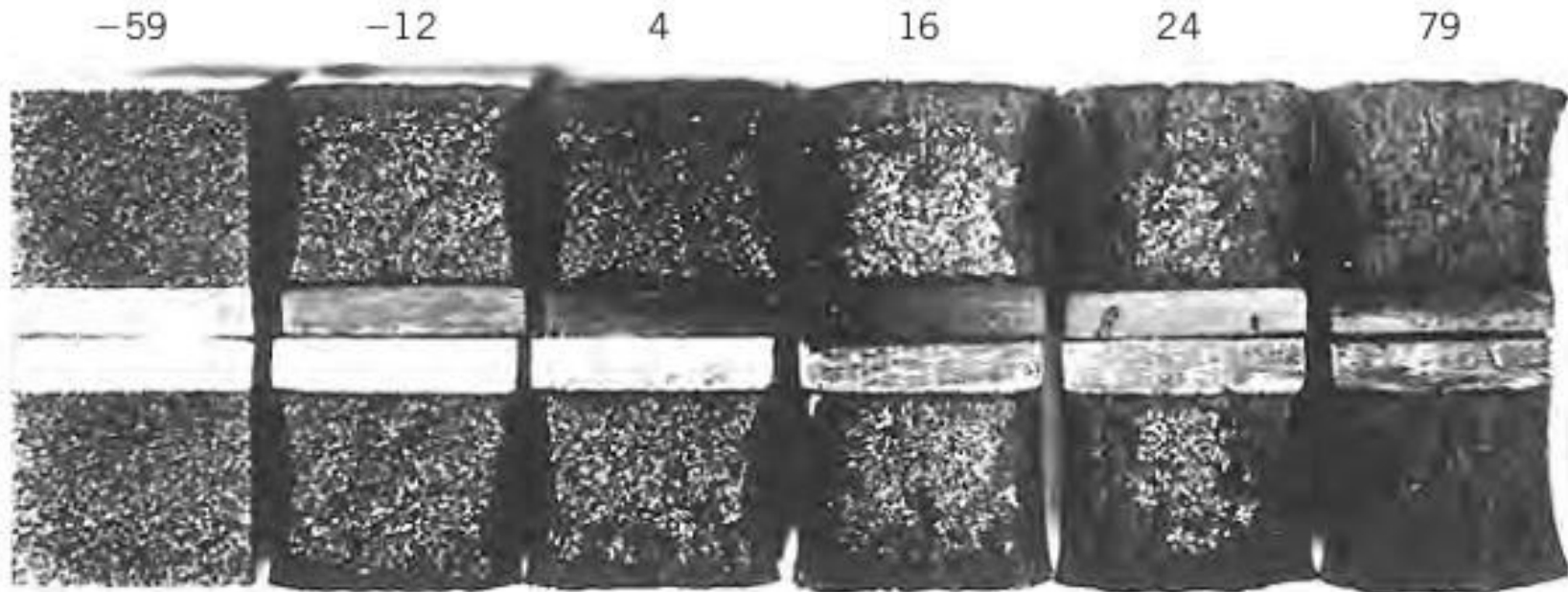
Transición dúctil-frágil

Incrementar la temperatura incrementa la elongación a tracción y tenacidad a la fractura

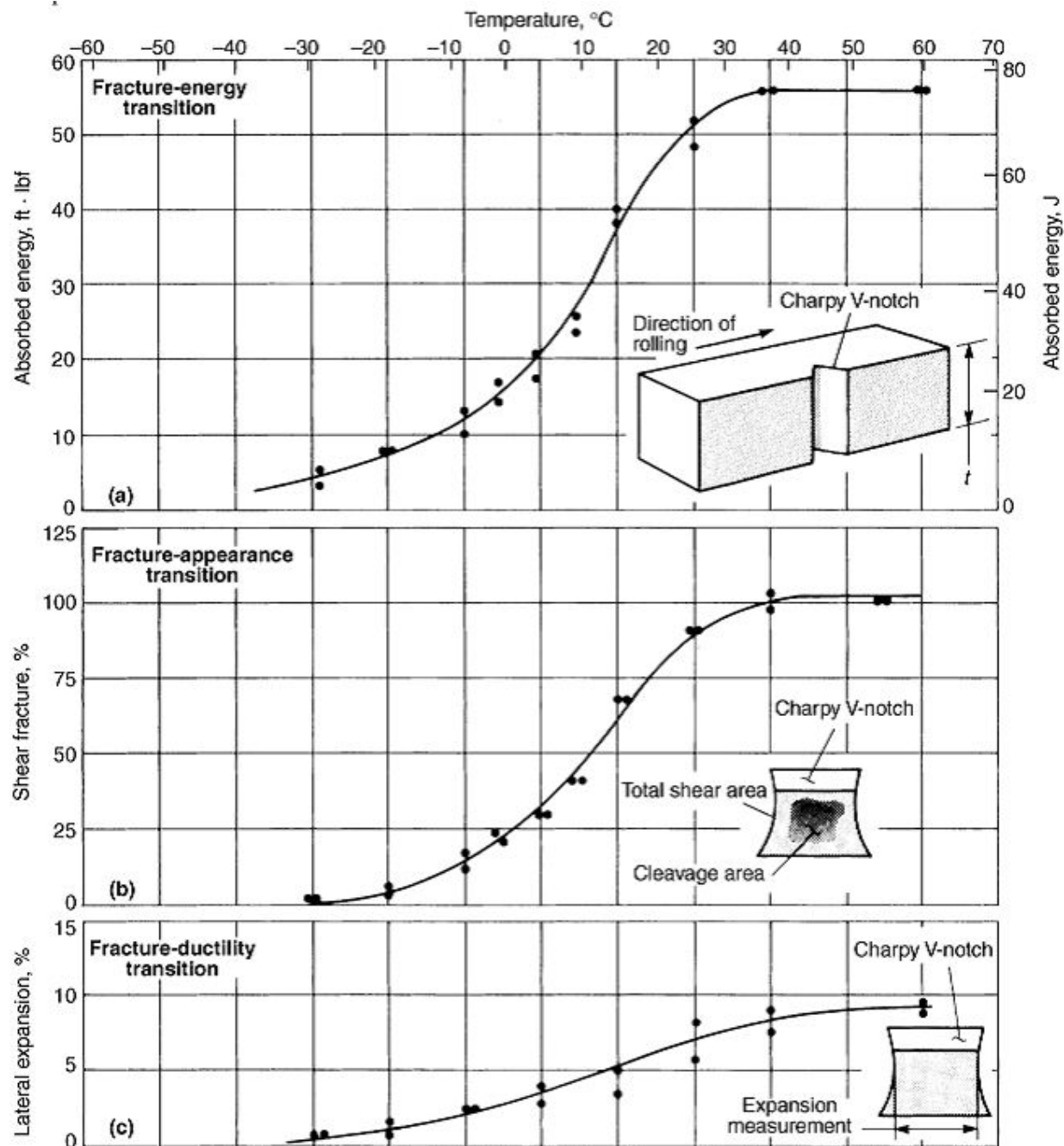
Criterios de transición dúctil frágil: media entre energía de las zonas dúctil y frágil, o 20 J.



Probetas Charpy de acero ensayadas a diferentes temperaturas

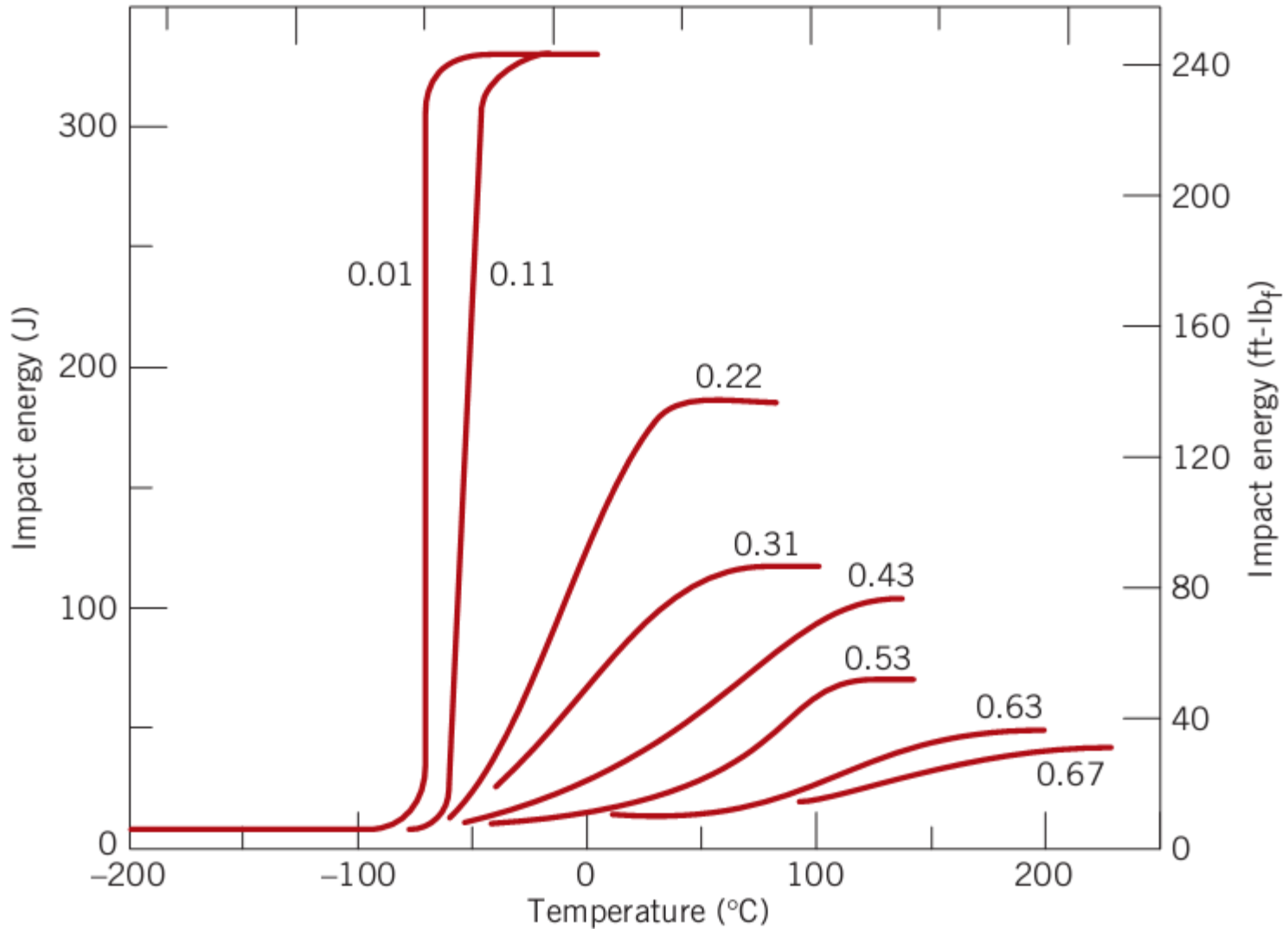


Probetas Charpy de acero ensayadas a diferentes temperaturas



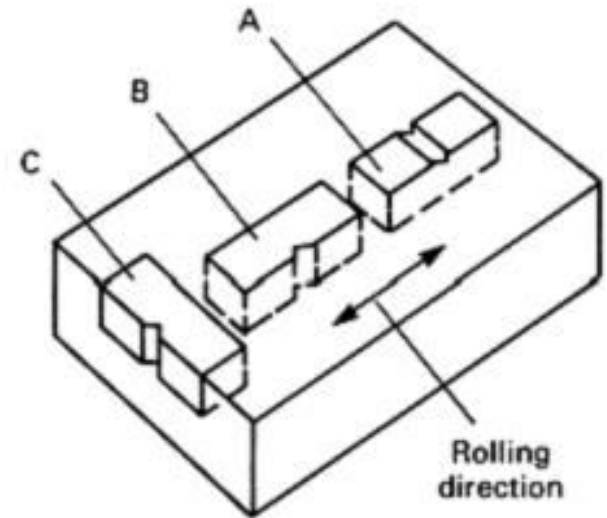
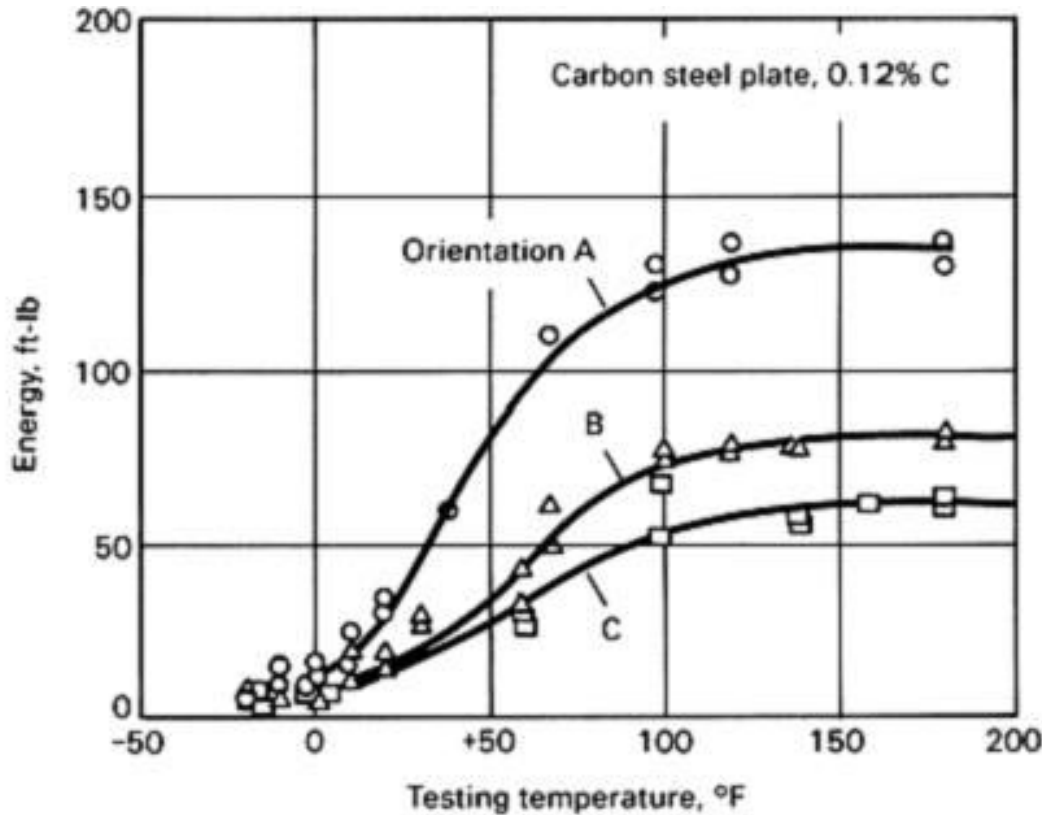


Efecto de %C en la energía absorbida en el ensayo de impacto



Mecánica de fractura: LEFM

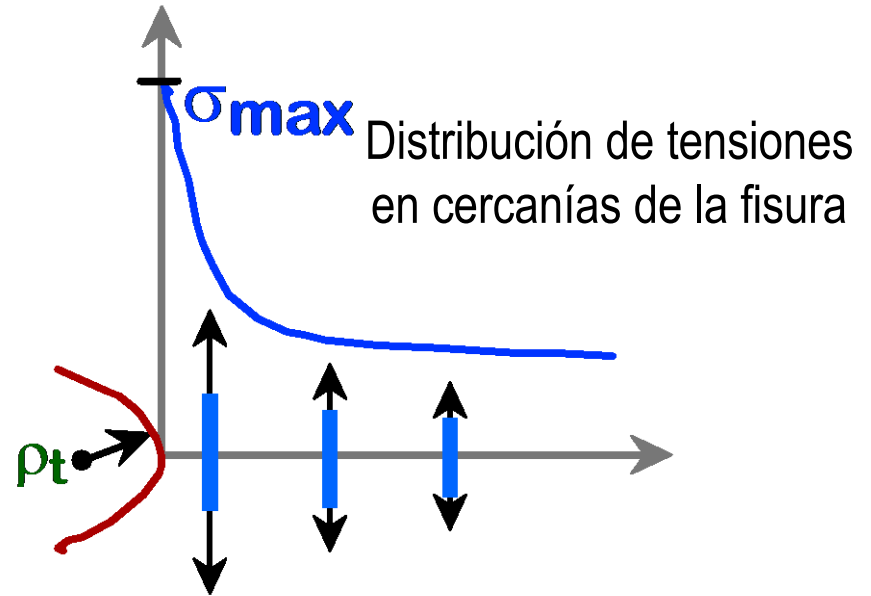
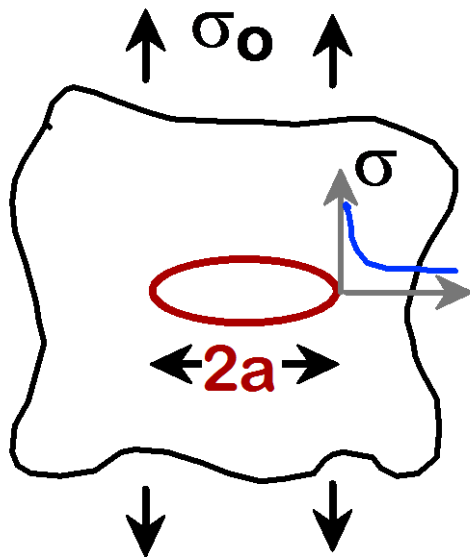
Efecto la deformación plástica en la energía absorbida en el ensayo de impacto



Concentración de tensiones en fisuras

Una fisura dentro del material funciona como un concentrador de tensiones

Fisura elíptica en una placa



La forma de la fisura controla σ_{max} / σ_0

Si σ_{max} / σ_0 es muy grande se promueve la fractura del material



$$\sigma_{max} / \sigma_0 = 3$$

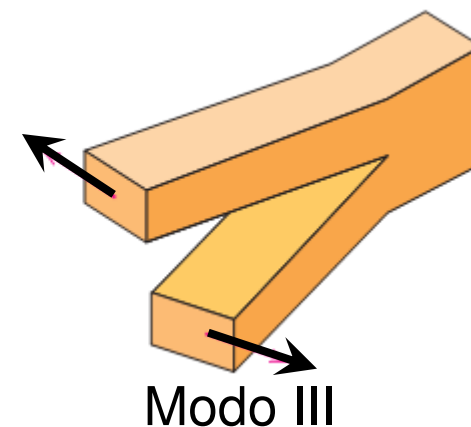
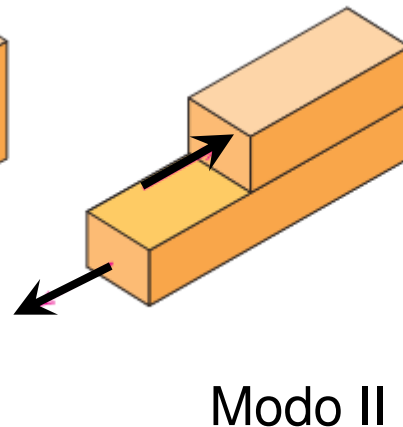
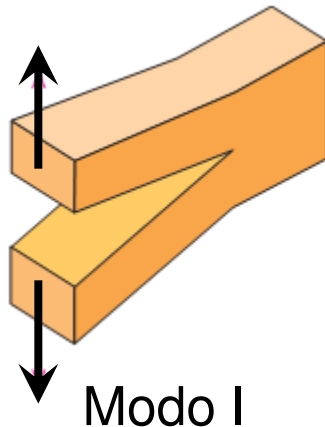


$$\sigma_{max} / \sigma_0 \gg 3$$

Propagación de fisuras

¿Cuando se propaga una fisura?

- Aunque la $\sigma < \sigma_y$, si el radio de la fisura es muy pequeño, la tensión en la fisura será muy grande.
- Existe un valor crítico de concentración de tensiones a partir del cual la fisura comienza a propagarse en forma frágil
- La tenacidad a la fractura es la resistencia de un material a la propagación de la fisura.





Propagacion de fisuras

Es muy difícil construir una estructura libre de defectos, sin ninguna fisura:

- Las fisuras provienen de material (inclusiones y oclusiones)
- Las fisuras con causadas por los defectos de solidificación y soldadura
- Las operaciones de maquinado producen fisuras
- Las cargas cíclicas producen fisuras por fatiga
- La corrosión produce fisuras
- Cuanto más grande sea una estructura o pieza, más fisuras tiene



El material tiene que tener suficiente tenacidad a la fractura como para que las fisuras que puedan provocar un falla puedan ser detectadas a tiempo y evitar una falla catastrófica.

El tamaño y distribución de los defectos debe ser conocido y controlado.

Mecánica de fractura: LEFM

Factor de intensidad de tensiones

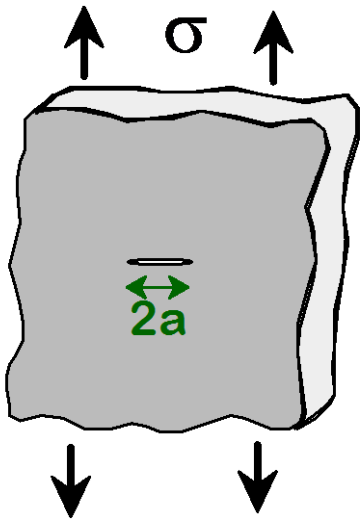
Depende de la carga y de la geometría

$$K \geq K_c$$

Tenacidad a la fractura

Depende del material, la temperatura y la velocidad de carga

Calculo de K para geometrías y cargas estándar



$Y = 1$

Constante geometría + carga

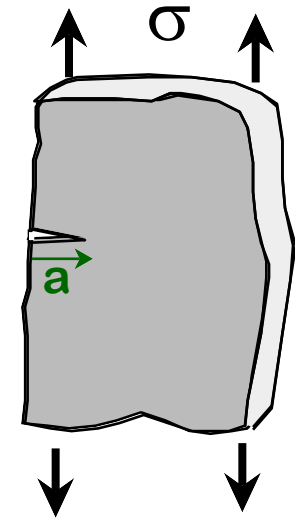
Tensión aplicada

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

Modo de fractura I

Tamaño de la fisura

Unidades de K: $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$



$Y = 1,1$



Mecánica de fractura: LEFM

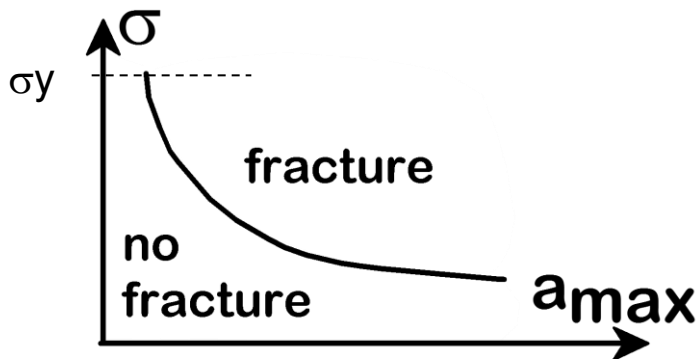
Condición para la propagación de fisuras

$$K \geq K_c \rightarrow Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Las fisuras mas **grandes** y mas **tensionadas** crecerán primero

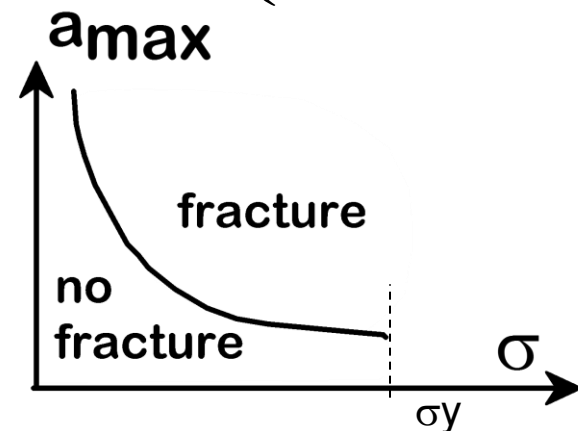
1. El máximo tamaño de fisura determina la máxima tensión admisible

$$\sigma_{diseño} < \frac{K_c}{Y\sqrt{\pi a_{max}}}$$

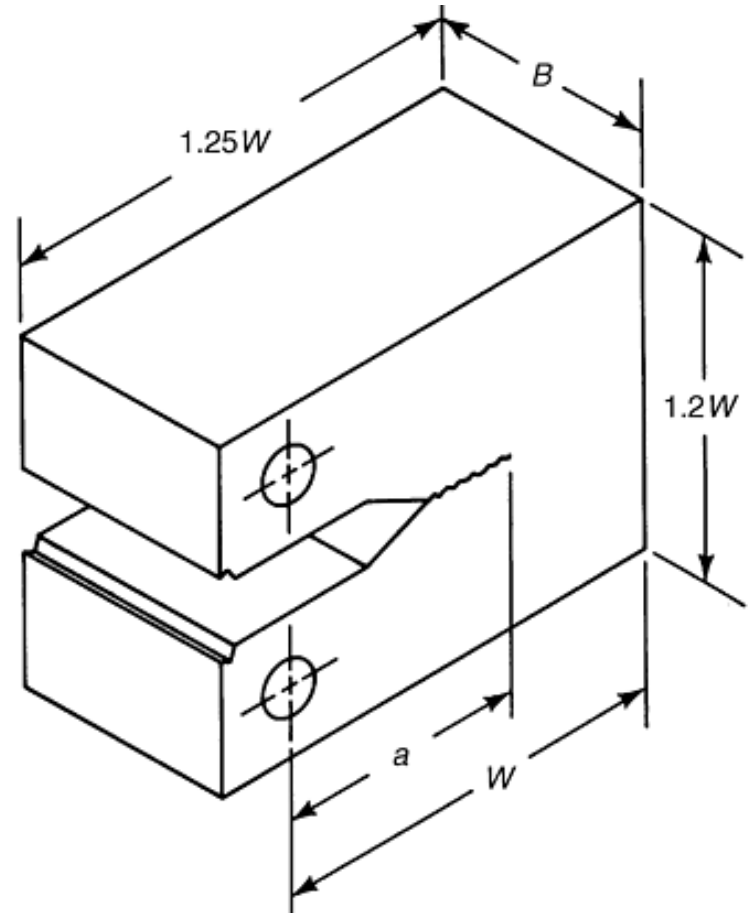
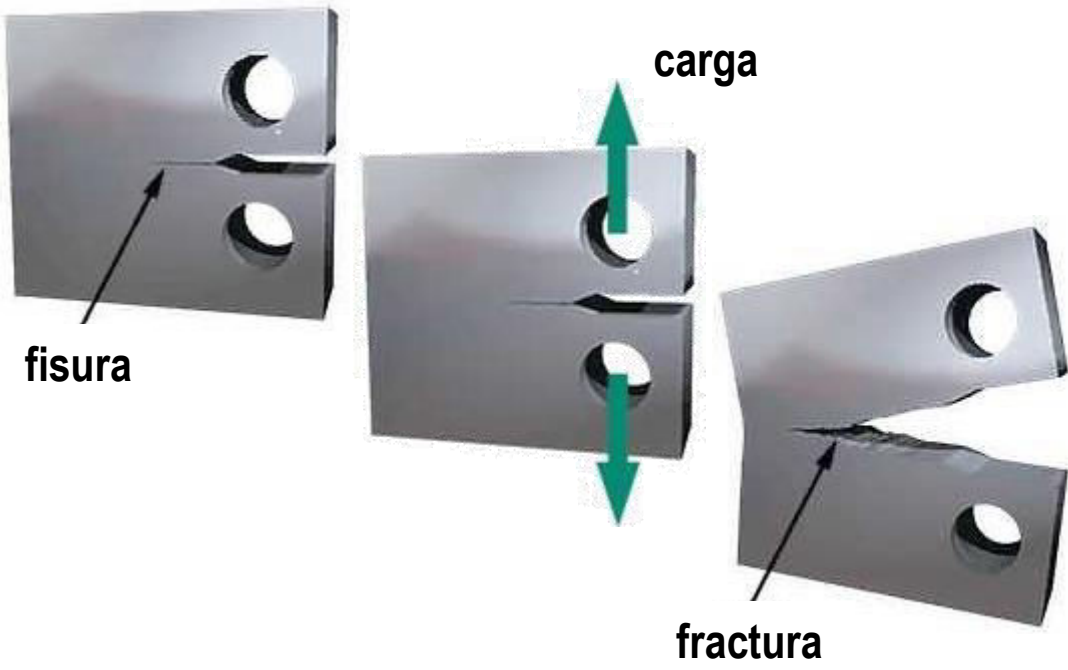


2. La tensión de diseño determina el máximo tamaño de fisura

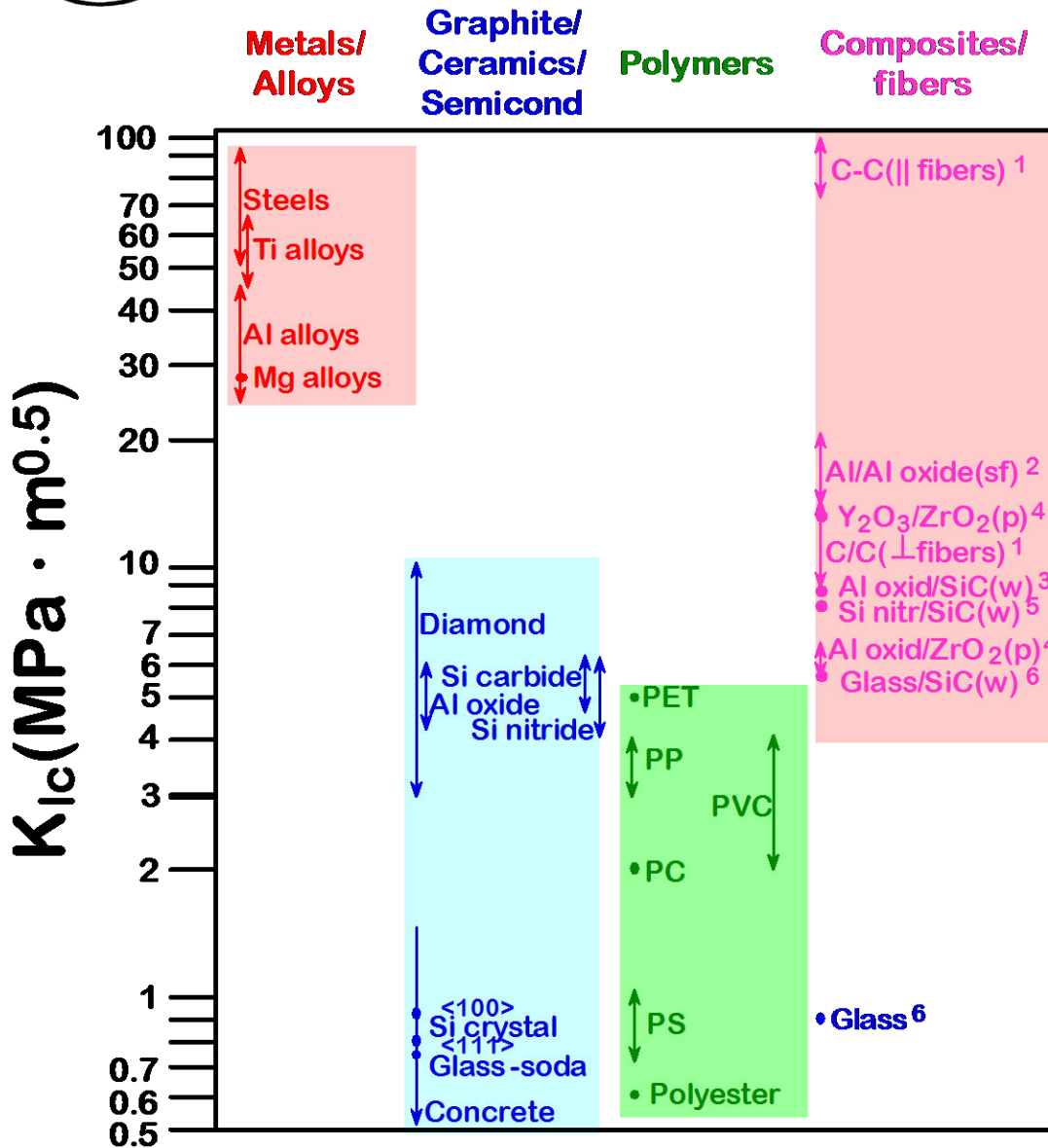
$$a_{max} < \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{Y\sigma_{diseño}} \right)^2$$



Ensayo de tenacidad a la fractura



$$K_{IC} = \frac{P}{B\sqrt{W}} f(a/W) \quad a, B \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$$



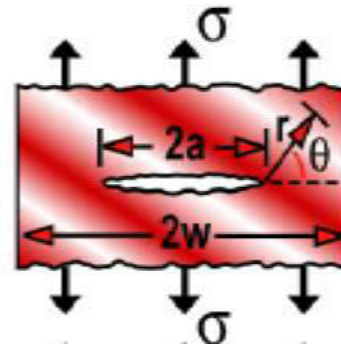
Material	MPa.m ^{1/2}
Acero 4340 (templado a 425° C)	88
Acero 4340 (templado a 260° C)	50
Titanio 6Al4V	55
Aluminio 2024 T3	44
Aluminio 7075 T651	24
Concreto	0,2-1,4
Vidrio	0,7-0,8
Alumina	2,7-5,0
Poliestireno (PS)	0,7-1,1
Polimetilmetacrilato (PMMA)	0,7-1,6
Policarbonato (PC)	2,2

Ejemplo de valores de defectos críticos

1. Placa de vidrio con defecto pasante. Para una $\sigma = 100$ MPa y $K_{IC} = 0,4$ MPa m^{1/2} (E = 70 MPa). **$2a_c = 9 \mu\text{m}$** .

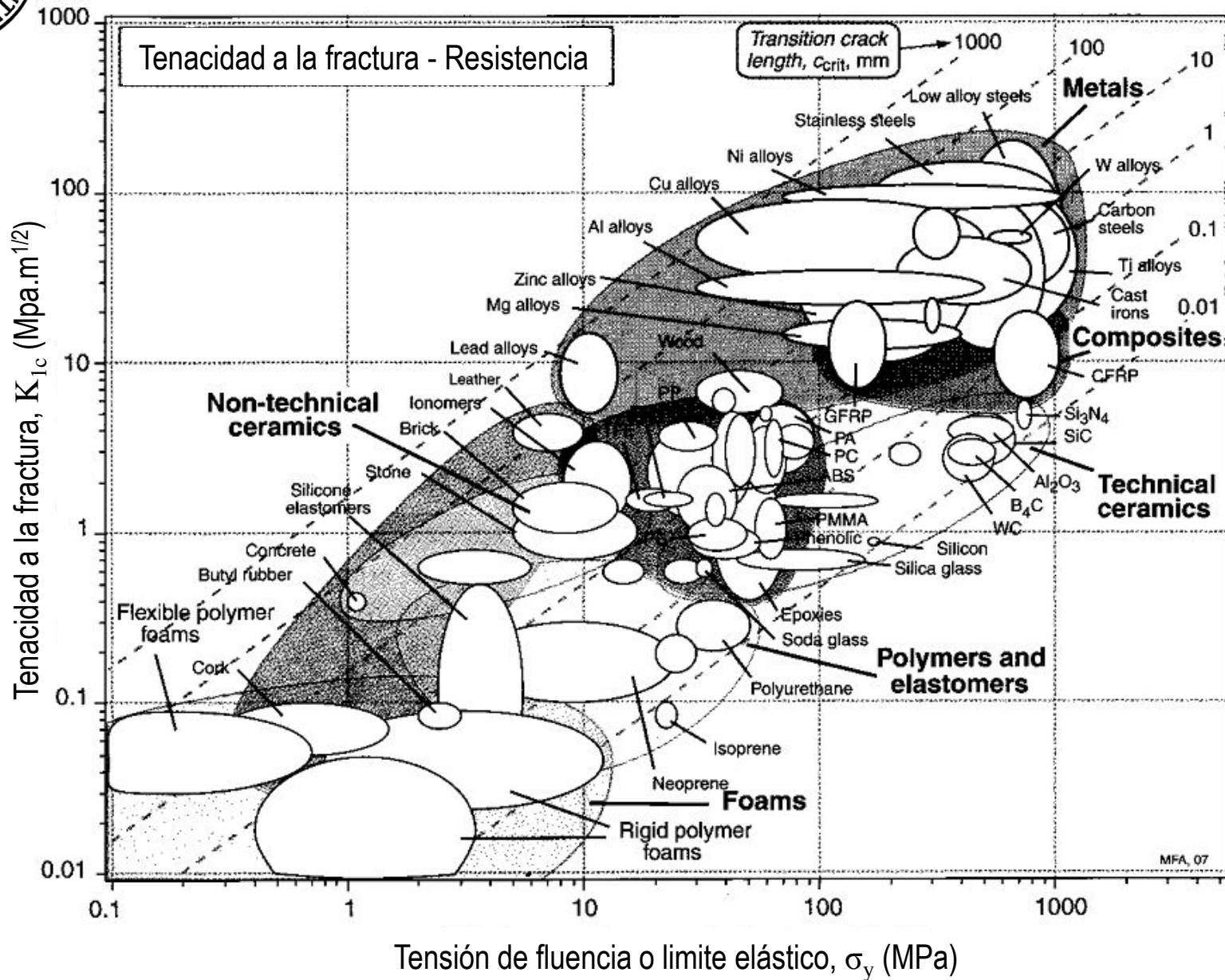
2. Placa de un acero de alta resistencia con defecto pasante. Para una $\sigma = 1000$ MPa y $K_{IC} = 110$ MPa m^{1/2} (E = 210 MPa). **$2a_c = 6 \text{ mm}$**

$$a_{\max} < \frac{1}{\pi} \left(\frac{Kc}{Y\sigma_{\text{diseño}}} \right)^2$$

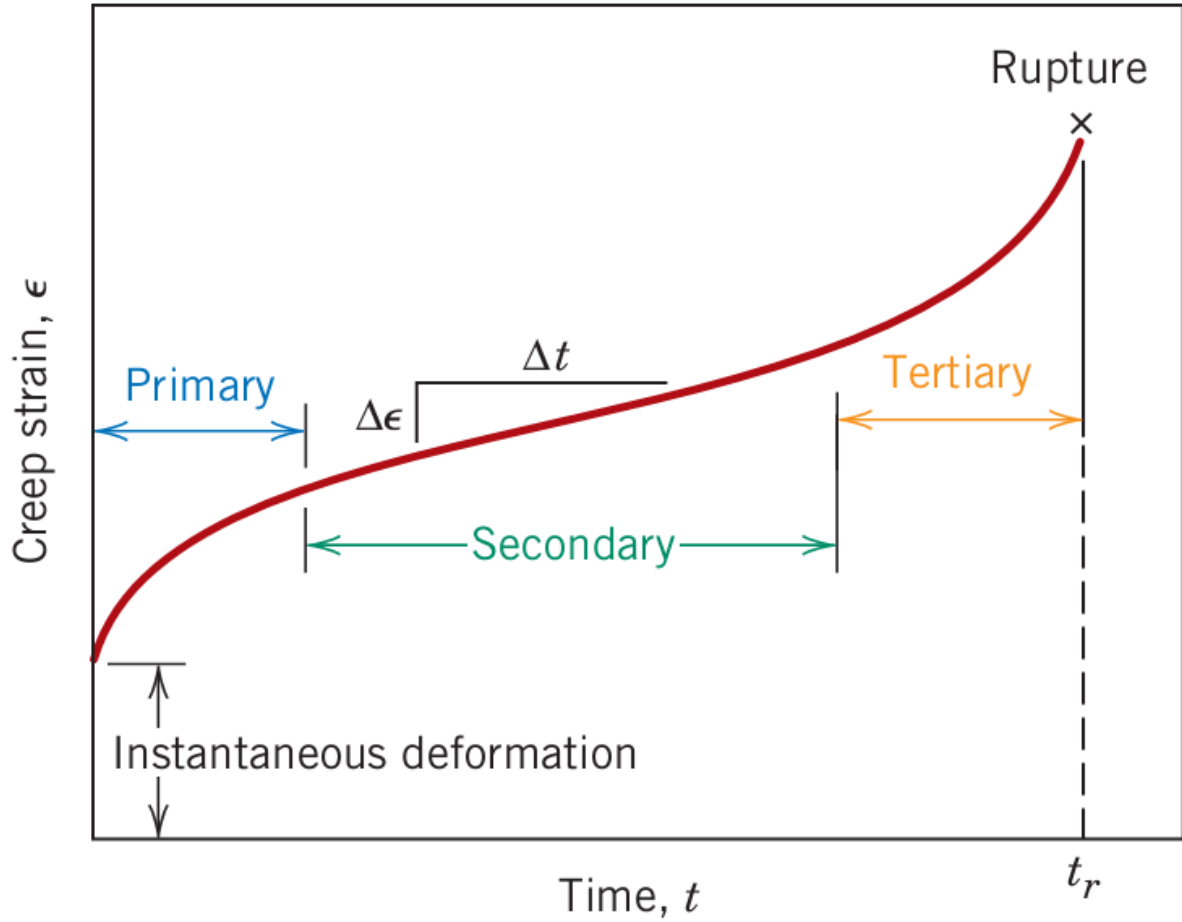


El defecto admisible en la placa de acero es 3 órdenes de magnitud mayor aún para una tensión 10 veces superior a la de la placa de vidrio.

Esto se debe a la gran energía absorbida en forma de deformación plástica para el caso del metal

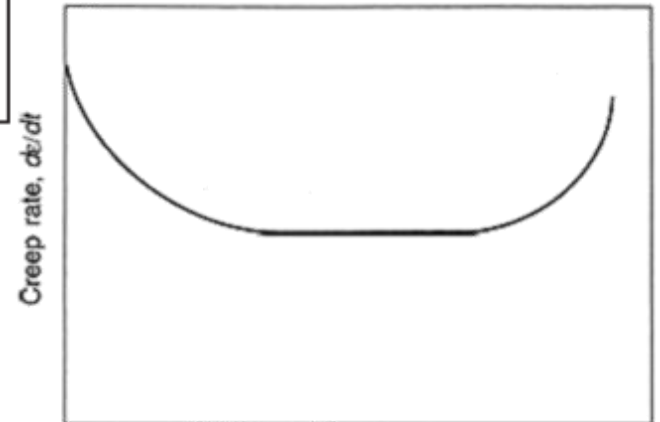


Termofluencia (creep)



- En algunos materiales expuestos a cargas mecánicas estáticas (menores a la tensión de fluencia) a altas temperaturas, ocurre una deformación permanente denominada creep. Ej. Rotores de turbinas.
- Este fenómeno limita la vida útil de los componentes.
- La termofluencia en los metales se observa a temperaturas mayores a $0,4T_m$.

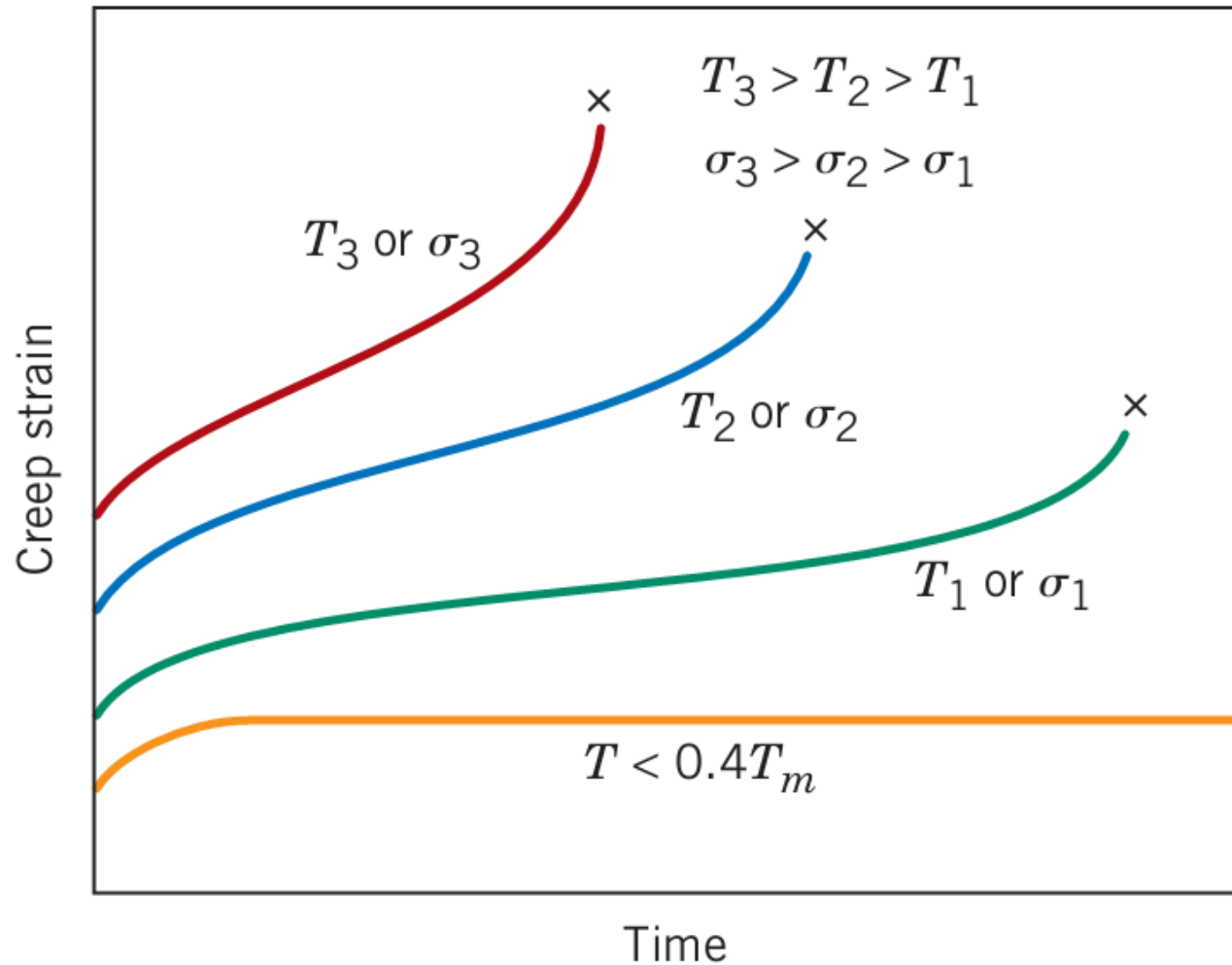
Velocidad de creep





Termofluencia (creep)

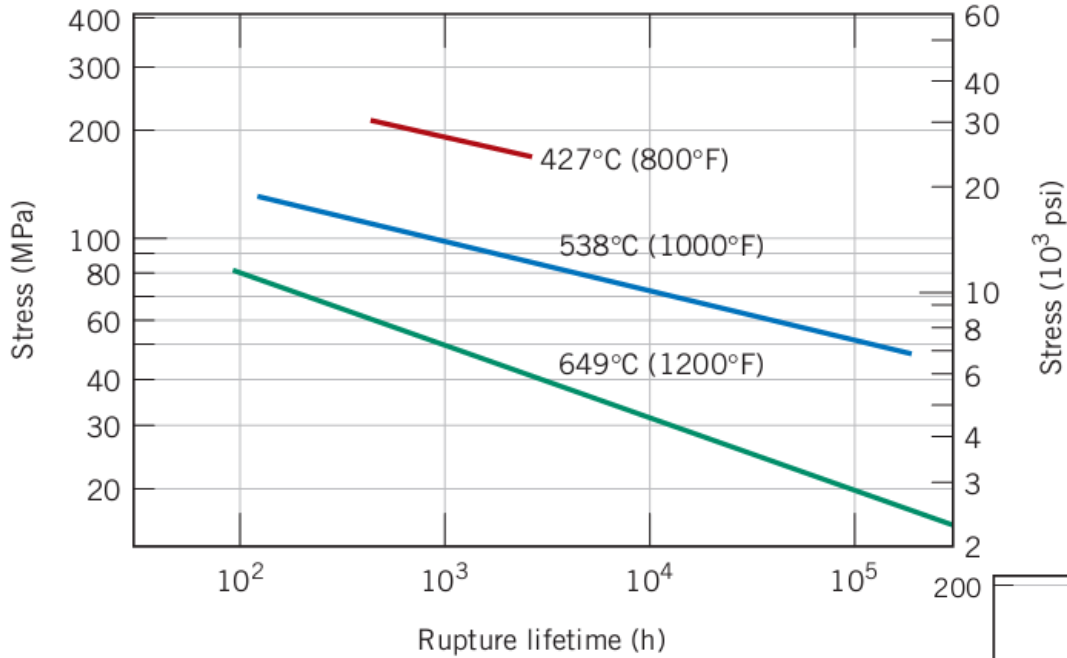
Efecto de la tensión y la temperatura



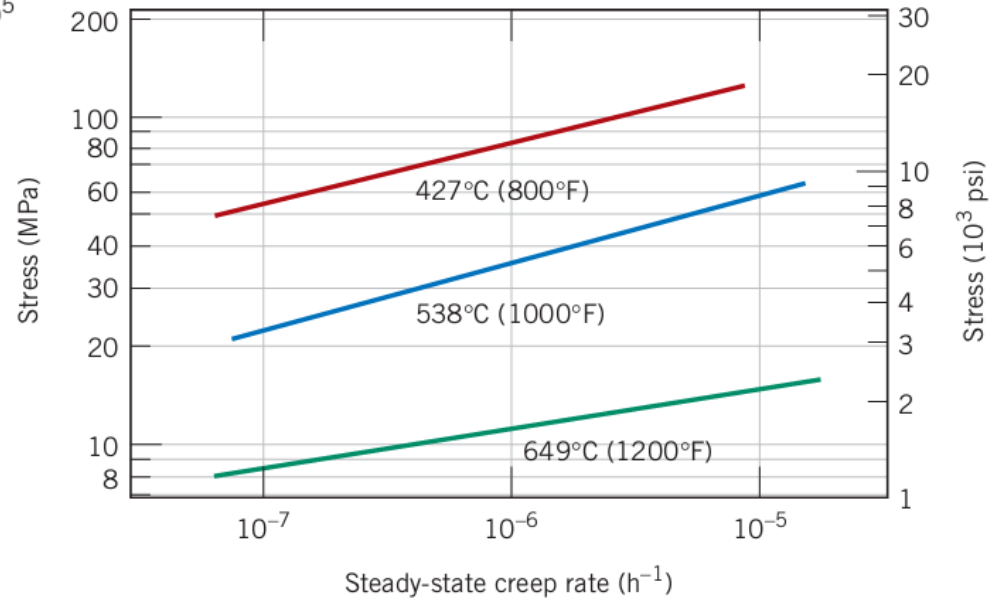


Termofluencia (creep)

Acero de bajo carbono
aleado con níquel

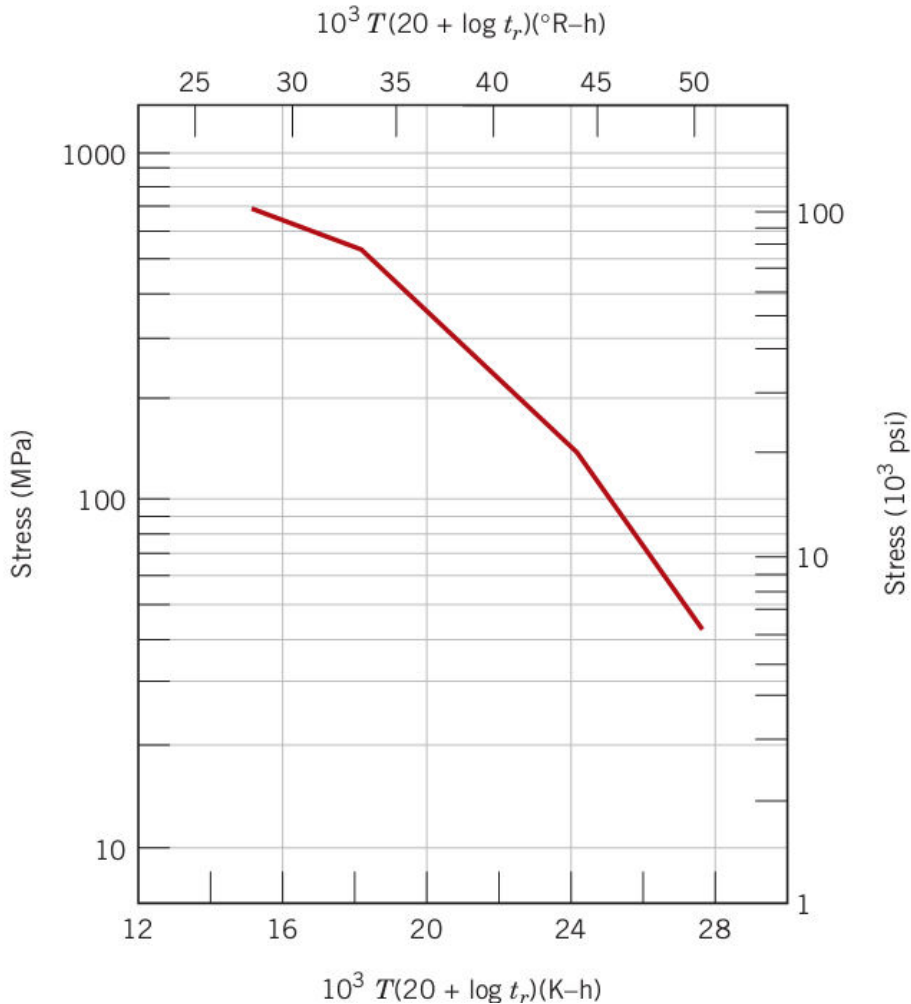


$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \sigma^n$$





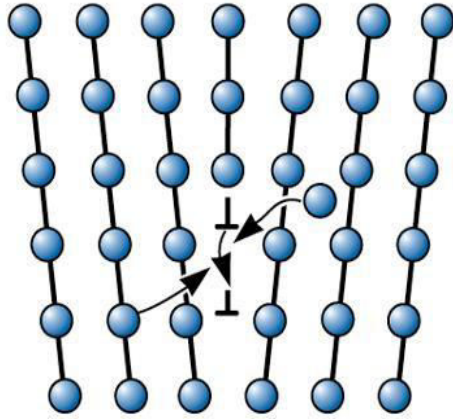
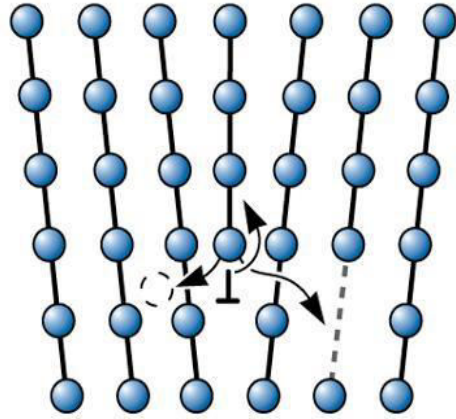
Termofluencia (creep)



Parámetro de Larson-Miller para fundición de hierro (S590)

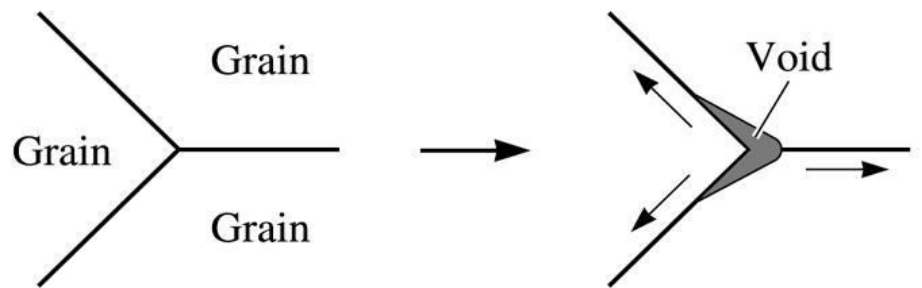
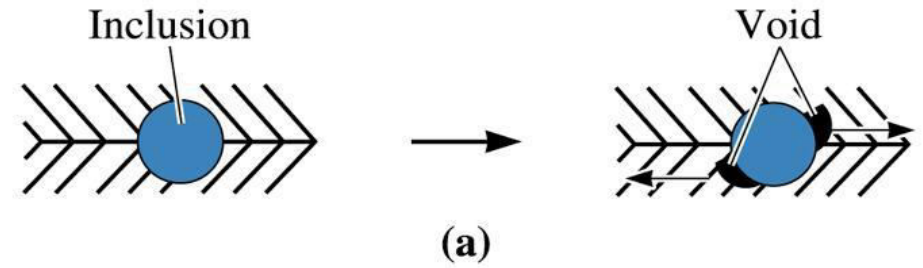
Ej.: Para 140 MPa (20000 psi) y 800° C (1073 K) el parámetro de Larson-Miller es $24 \cdot 10^3$, por lo que $t_r = 233h$ (9,7días)

Creep: Mecanismos

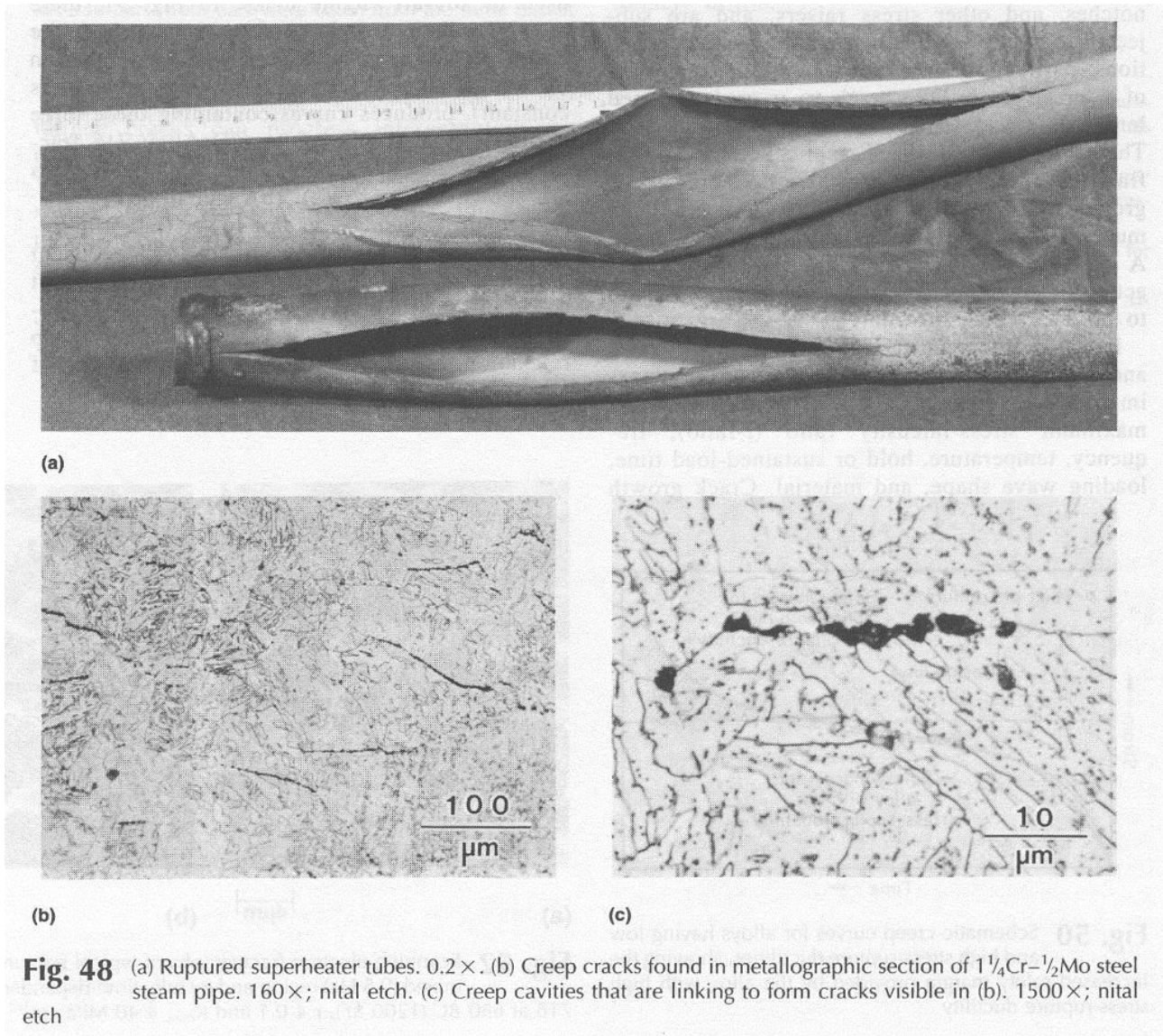


Trepado de dislocaciones

Acumulación de vacancias



Creep: Mecanismos





Aleaciones resistentes al creep

Mantienen la resistencia mecánica a temperaturas elevadas

Mecanismos de endurecimiento:

- Solución sólida
- Precipitados coherentes (fase γ' : $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$)
- Carburos (MC , M_{23}C_6 , M_6C , M_7C_3)

No se usan mecanismos de endurecimiento por deformación plástica ya que habría recristalización, ni tampoco afinamiento de grano ya que el material sufriría de creep (termofluencia)



Aleaciones resistentes al creep

Termorresistentes

Superalaciones

Aceros termoresistentes Cr-Mo : 540 °C (UNS K11547 ½ Cr ½ Mo)

Aceros inoxidable: 600° - 700 °C

Superalaciones base Fe: 800° - 900 °C

Incoloy 800, A-286, Incoloy 907
(30-60%Fe; 20-35% Ni; 20-25% Cr)

Superalaciones base Ni: más de 1000 °C

Inconel, Hastelloy, Waspalloy

Superalaciones base Co: más de 1000 °C

Stellite (40-60 Co; 20-30 Cr;
10-25% Ni; 3-20% Fe)

Aleaciones resistentes al creep



(a)

Conventional casting



(b)

Columnar grain



(c)

Single crystal