



Problemas de tecnología de materiales

Manuel Pascual Guillamón
Fidel Salas Vicente
Miguel Ángel Pérez Puig
Jesús Cembrero Cil
Rafael Pascual Martínez
Francisco Javier Cárcel Carrasco

The background of the cover is a composite image. The top half shows a close-up of a metallic gear mechanism with several interlocking gears. The bottom half shows a close-up of a wooden gear mechanism with several interlocking gears. The entire image is set against a dark brown background with a white curved line separating the top and bottom sections.

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Manuel Pascual Gillamón (coord.)
Fidel Salas Vicente
Miguel Ángel Pérez Puig
Jesús Cembrero Cil
Rafael Pascual Martínez
Francisco Javier Cárcel Carrasco

Problemas de tecnología de materiales

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Colección *Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Pascual Guillamón, Manuel; Salas Vicente, Fidel; Pérez Puig, Miguel Ángel; Cembrero Cil, Jesús; Pascual Martínez, Rafael; Cárcel Carrasco, Francisco Javier (2018). *Problemas de tecnología de materiales*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

©Manuel Pascual Guillamón
Fidel Salas Vicente
Miguel Ángel Pérez Puig
Jesús Cembrero Cil
Rafael Pascual Martínez
Francisco Javier Cárcel Carrasco

© 2018, Editorial Universitat Politècnica de València
distribución: www.lalibreria.upv.es / Ref.: 0508_07_01_01

Imprime: Byprint Percom, sl

ISBN: 978-84-9048-705-1
Impreso bajo demanda

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es.

Impreso en España

Índice

Capítulo I. Deformación y fractura	1
Capítulo II. Sinterización	83
Capítulo III. Colada, tratamientos térmicos y diagramas de fase de los aceros.....	111
Capítulo IV. Deformación plástica: Forja, laminación y embutición.....	153
Capítulo V. Técnicas de ensayos no destructivos	197
Bibliografía	259

Capítulo I

Deformación y fractura

DEFINICIÓN

Deformación es la variación que sufre un material en forma y dimensiones cuando es sometido a fuerzas exteriores que la producen.

Las deformaciones se pueden suceder con endurecimiento y sin endurecimiento y pueden a su vez ser elásticas cuando recuperan su forma inicial al cesar las fuerzas que las producen e inelásticas o plásticas cuando quedan deformadas permanentemente.

Las deformaciones con endurecimiento son las que se producen cuando al someterlas a acciones de fuerzas externas ocasionan aumentos de su dureza y de sus características resistentes, pero a su vez disminuyen sus capacidades de deformación, en general es la deformación en frío.

Las deformaciones sin endurecimiento son las que al cesar los esfuerzos que las producen no hay variación de sus características mecánicas ni resistentes. Generalmente son las que se generan a altas temperaturas

Fractura es la consecuencia de producirse una discontinuidad en un sólido, debido a un esfuerzo suficiente que precipitará su separación en dos o más partes. Otros factores que pueden precipitar la rotura de un material son tales como poros, inclusiones, temperatura, precipitados en segundas fases, tratamientos térmicos, aplicación de cargas y otros.

Los modos de fractura se puede clasificar en dúctil que permite la rotura con deformación y estricción y frágil en la que se produce la rotura inminente sin deformación.

CONCEPTOS DE DEFORMACIÓN Y FRACTURA

Deformación con endurecimiento. Endurecimiento que presentan algunos sólidos sobre todos lo metálicos al ser sometidos a diferentes esfuerzos aumentando las características resistentes pero por el contrario en deterioro de sus propiedades dúctiles y eléctricas.

Fractura dúctil. Es la fractura producida con deformación plástica generándose estricción antes de la rotura

Fractura frágil. Es la fractura que se produce de forma inminente sin deformación ni estricción

Fractura por Fatiga. Es la fractura producida cuando los esfuerzos dinámicos son cíclicos, produciéndose una notable deformación del material

Fractura sin endurecimiento del material. Es la fractura Producida cando los materiales son sometidos a altos esfuerzos y temperaturas

SOBRE EL CONTENIDO DEL CAPÍTULO 1

Los problemas presentados en este capítulo tratan en primer lugar en mostrar un conjunto de ejercicios que tratan de aclarar las nociones básicas sobre las características resistentes en materiales a temperatura ambiente, como son las tensiones a las que están sometidos cuando soportan determinadas cargas, así como sus deformaciones elásticas y su Módulos elásticos, o bien cuando estas cargas generan deformaciones permanentes.

A partir de los conceptos básicos de resistencia se ha expuesto una serie de problemas en los que se analizan los comportamientos de determinados materiales sometidos a elevadas temperaturas, sus deformaciones y su fluencia en función de la velocidad con la que se van deformando sin haber apenas un proceso de endurecimiento del material.

Otra selección de problemas muestran el comportamiento de ciertos materiales generalmente frágiles o bien que han sufrido tratamientos de endurecimiento y en los que se han generado grietas o bien se les han provocado entallas, lo que modifica su comportamiento pudiéndose producir aumentos de tensión que a su vez generan crecimientos de grietas y rotura frágil inminente suponiéndose en comportamiento cuasi estático.

En un tercer bloque se estudia el comportamiento y la vida útil antes de la rotura de numerosos materiales sometidos a distintas sollicitaciones dinámicas, en los que se generan fisuras, produciéndose el crecimiento de las mismas que derivaran en su rotura inminente cuando se alcanza cierto límite o grieta crítica

NOMENCLATURA

Algunas denominaciones características, junto a las unidades de medida más usuales):

F = Fuerza (N)

S = Sección o superficie (mm^2)

l = Longitud

Δl = Deformación (mm)

ε = Deformación unitaria

Ψ = Estricción

E = Módulo elástico o de Young (GPa)

V_ε = Velocidad de deformación (s^{-1} ; min^{-1} ; h^{-1})

C_i = Constante que depende del material

δ = Tamaño de grano

m = Coeficiente que depende del material

σ = Tensión (MPa)

Q_c = Calor de activación (J/mol)

R = Constante de los gases perfectos (J/(mol·K))

a = Tamaño de grieta

ρ = Radio de entalla

K_I = Factor de intensidad de esfuerzo en modo I ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$)

K_{IC} = Tenacidad a la fractura en modo I ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$)

K_{ICP} = Tenacidad a la fractura en modo I en tensión plana ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$)

K_{ICD} = Tenacidad a la fractura en modo I en deformación plana ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$)

K_{II} = Factor de intensidad de esfuerzo en modo II ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$)

K_{IIC} = Tenacidad a la fractura en modo II ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$)

\bar{E}_f = Factor de forma

W = Ancho en la zona hacia donde crece la grieta

P = Presión (MPa)

n = Coeficiente de endurecimiento

n_s = Coeficiente de seguridad

Y = Límite elástico (MPa)

N = Número de ciclos

ζ = Energía elástica

ECUACIONES

Deformación en periodo elástico:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{S \cdot E}$$

Deformación en periodo plástico:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l_f}{l_0}$$

Velocidad de deformación sin endurecimiento:

$$V_\varepsilon = C_i \cdot \delta^{-m} \cdot \sigma^n \cdot e^{-\frac{Q_c}{R \cdot T}}$$

Energía elástica:

$$\xi = \frac{\varepsilon^2 \cdot E}{2}$$

Concentración de tensión en borde de entalla:

$$\sigma_m = 2 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

Tenacidad a fractura en grieta:

$$K_{IC} = F_f \cdot \sigma_C \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Factor de forma en grieta externa:

$$F_f = 1,12 - 0,23 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) + 10,5 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21,7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30,2 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4$$

Factor de forma en grieta interna:

$$F_f = \frac{1 - 0,5 \cdot \frac{2 \cdot a}{W} + 0,37 \cdot \left(\frac{2 \cdot a}{W}\right)^2 - 0,044 \cdot \left(\frac{2 \cdot a}{W}\right)^3}{\sqrt{1 - \frac{2 \cdot a}{W}}}$$

Verificación de tensión plana:

$$b \leq \left(\frac{K_{ICD}}{Y}\right)^2$$

Verificación de deformación plana:

$$b \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{ICD}}{Y}\right)^2$$

Tensión oblicua:

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^2 \geq 1$$

Cálculo a fatiga y fórmula de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^n$$

$$\Delta K = F_{f \text{ medio}} (\sigma_{Max} - \sigma_{min}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$N = \frac{1}{C \cdot \left(F_{f \text{ medio}} \cdot (\sigma_{Max} - \sigma_{min}) \cdot \sqrt{\pi}\right)^n} \cdot \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{(\sqrt{a})^n}$$

C y n constantes ΔK incremento de tenacidad

Problema 1. Un alambre que tiene 6 mm de diámetro y 1 m de longitud está sometido a una carga a tracción de 10^4 N. Calcular:

- Esfuerzo unitario
- Alargamiento unitario y total
- Límite elástico si la deformación permanente empieza en un alargamiento de 2 mm.
- Carga de trabajo máxima si por coeficiente de seguridad se adopta 2/3 del límite elástico.
- ¿Podrá utilizarse el cable para estas condiciones?

Datos $E = 210 \text{ GNm}^{-2}$

Solución:

a)

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{\text{Fuerza (carga)}}{\text{Sección cable}} = \frac{10000 \text{ N}}{\frac{6^2 \cdot \pi}{4}} = 353 \text{ N/mm}^2 = 353 \text{ MPa}$$

b)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot \varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{353 \text{ N/mm}^2}{210000 \text{ N/mm}^2} = 1,68 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow \Delta l = 1,68 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 \text{ mm} = 1,68 \text{ mm}$$

c)

$$\sigma_e = E \cdot \varepsilon = 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{2 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}} = 420 \text{ N/mm}^2 = 420 \text{ MPa}$$

d)

$$\sigma_t = \frac{420 \text{ N/mm}^2 \cdot 2}{3} = 280 \text{ N/mm}^2$$

e)

En estas condiciones el cable no serviría ya que el esfuerzo unitario al que está sometido es mayor que la carga máxima admisible σ_t .

Problema 2. Un latón tiene un módulo elástico de 120 GNm^{-2} y un límite elástico de $250 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Una varilla de este material de 10 mm^2 y 150 cm de longitud está colgada verticalmente y lleva en su extremo un peso de 1600 N . determinar:

- Recuperará la varilla su longitud inicial si se le quita la carga.
- Cual será el alargamiento unitario en estas condiciones. Hallar su energía elástica.
- Cual será la carga que podrá soportar si se aplica un coeficiente de seguridad de 5.
- Que diámetro deberá de tener la varilla para que sometida a una carga de $8 \cdot 10^4 \text{ N}$ no experimente deformación permanente.

Solución:

a)

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{\text{Fuerza (carga)}}{\text{Sección varilla}} = \frac{1600 \text{ N}}{10 \text{ mm}^2} = 160 \text{ N/mm}^2 = 160 \text{ MPa}$$

Recuperará su longitud puesto que la tensión soportada es inferior al límite elástico ($160 \text{ MPa} < 250 \text{ MPa}$)

b)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 120000 \text{ N/mm}^2 \cdot \varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{160 \text{ N/mm}^2}{120000 \text{ N/mm}^2} = 1,33 \cdot 10^{-3}$$

$$\xi = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} = \frac{\varepsilon^2 \cdot E}{2} = \frac{(1,33 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 120 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2}{2} = 0,106 \text{ N/mm}^2 = 106 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$$

c)

$$\sigma_t = \frac{\sigma_e}{n_s} = \frac{250 \text{ MPa}}{5} = 50 \text{ N/mm}^2 = \frac{F}{10 \text{ mm}^2} \rightarrow F = 500 \text{ N (d)}$$

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S} \rightarrow S = \frac{F}{250 \text{ N/mm}^2} = \frac{80000 \text{ N}}{250 \text{ N/mm}^2} = 320 \text{ mm}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{320 \cdot 4}{3,14}} = 20,2 \text{ mm}$$

Problema 3. Una probeta según norma UNE-EN tiene un diámetro de 13,8 mm y 100 mm de distancia entre puntos. En un ensayo de tracción comenzó a fluir con 33000 N, produciéndose la rotura a los 60000 N. El alargamiento sufrido en ese instante fue de 20 mm y el diámetro de la sección de rotura, 10 mm. Calcular:

- Límite de fluencia
- Tensión nominal de rotura
- Tensión real en el momento de la rotura
- Alargamiento en %
- Estricción en %

Solución:

a)

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} = \frac{33000 \text{ N}}{\frac{\pi \cdot 13,8^2}{4}} = \frac{4 \cdot 33000 \text{ N}}{\pi \cdot 13,8^2 \text{ mm}^2} = 220,75 \text{ N/mm}^2 = 220,75 \text{ MPa}$$

b)

$$\sigma_{RN} = \frac{F_R}{S_0} = \frac{60000 \text{ N}}{\frac{\pi \cdot 13,8^2}{4} \text{ mm}^2} = \frac{60000 \text{ N} \cdot 4}{\pi \cdot 13,8^2 \text{ mm}^2} = 401,35 \text{ N/mm}^2 = 401,35 \text{ MPa}$$

c)

$$\sigma_{Rreal} = \frac{F_R}{S_r} = \frac{60000 \text{ N}}{\frac{\pi \cdot 10^2}{4} \text{ mm}^2} = \frac{60000 \text{ N} \cdot 4}{\pi \cdot 10^2 \text{ mm}^2} = 764 \text{ N/mm}^2 = 764 \text{ MPa}$$

d)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{20 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} \cdot 100 = 20\%$$

e)

$$\Psi = \frac{S_0 - S_F}{S_0} \cdot 100 = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot (13,8^2 - 10^2)}{\frac{\pi}{4} \cdot 13,8^2} \cdot 100 = \frac{13,8^2 - 10^2}{13,8^2} \cdot 100 = 47,49\%$$

Problema 4. Un soporte está formado por dos barras unidas de distinto diámetro y material, la barra de 1000 mm es de acero y tiene un diámetro de 15 mm y la barra de 700 mm de diámetro es de bronce con un diámetro de 10mm, del soporte pende una carga de 10000N, los módulos elásticos correspondientes son 210 GPa para el acero y 150 GPa para el bronce. Determinar el esfuerzo que soportará cada barra y la deformación total del soporte. Despreciar el peso de las barras

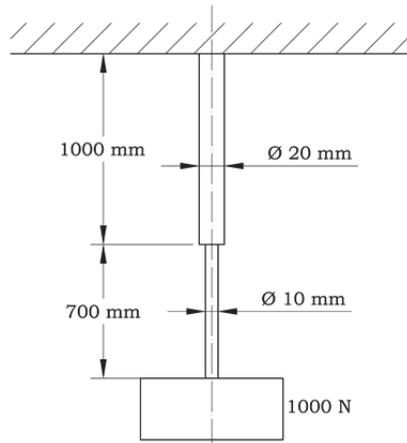


Figura I.1

Solución:

La tensión que soporta el acero viene dada por:

$$\sigma_{Fe} = \frac{F}{S_{0Fe}} = \frac{10000N}{\frac{\pi \cdot 15^2}{4}} = \frac{10000N \cdot 4}{3,14 \cdot 15^2 \text{ mm}^2} = 56,61N / \text{mm}^2$$

La que soporta el bronce será:

$$\sigma_{Br} = \frac{F}{S_{0Br}} = \frac{10000N}{\frac{\pi \cdot 10^2}{4} \text{ mm}^2} = \frac{10000N \cdot 4}{3,14 \cdot 10^2} = 127,38N / \text{mm}^2$$

En base a estos resultados, la deformación en el acero es:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{F}{S_0} \rightarrow \Delta l = \frac{F \cdot l_0}{E \cdot S_0}$$

$$\Delta l_{Fe} = \frac{10000 N \cdot 1000 mm}{\frac{\pi \cdot 15^2}{4} mm^2 \cdot 210000 N / mm^2} = 0,26 mm$$

y en el bronce:

$$\Delta l_{Br} = \frac{10000 N \cdot 700 mm}{\frac{\pi \cdot 10^2}{4} mm^2 \cdot 150000 N / mm^2} = 0,59 mm$$

Así pues, la deformación total es: $0,26 + 0,59 = 0,85 mm$

Problema 5. Un apoyo formado por un perfil hueco cuadrado de fundición de lado exterior de 45 cm y de 4 cm de espesor está relleno de hormigón. El apoyo está sometido axialmente a una carga de 700000 N, determinar la tensión a la que está sometido el hormigón y la fundición si los módulos elásticos correspondientes son de $E_{Fun} = 105$ GPa y el $E_{horm} = 17,5$ GPa.

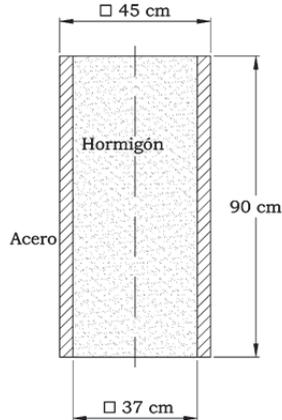


Figura I-2

Solución:

La fuerza total soportada por el apoyo se reparte entre el tubo de fundición y el hormigón que lo llena.

$$F_{Fun} + F_{Hor} = 700000 \text{ N}$$

Además, ambos elementos experimentarán la misma deformación, por lo que:

$$\Delta l_{Fun} = \Delta l_{Hor} \rightarrow \frac{F_{Fun} \cdot L_{Fun}}{S_{Fun} \cdot E_{Fun}} = \frac{F_{Hor} \cdot L_{Hor}}{S_{Hor} \cdot E_{Hor}} \rightarrow F_{Fun} = \frac{S_{Fun} \cdot E_{Fun}}{S_{Hor} \cdot E_{Hor}} F_{Hor} = \frac{(45^2 - 37^2) \cdot 105 \text{ GPa}}{37^2 \cdot 17,5 \text{ GPa}} = 2,87 F_{Hor}$$

Ahora puede hacerse:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Fun} + F_{Hor} = 700000 \text{ N} \\ F_{Fun} = 2,87 \cdot F_{Hor} \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} F_{Hor} = \frac{700000 \text{ N}}{3,87} = 180878 \text{ N} \\ F_{Fun} = 2,87 \cdot 180878 = 519122 \text{ N} \end{array}$$

Conocidas las fuerzas ya es posible obtener las tensiones y la compresión que soporta el apoyo:

$$\sigma_{Hor} = \frac{F_{Hor}}{S_{Hor}} = \frac{180878N}{0,37^2 m^2} = 1,32 MPa$$

$$\sigma_{Fun} = \frac{F_{Fun}}{S_{Fun}} = \frac{519122N}{(0,45^2 - 0,37^2)m^2} = 7,91 MPa$$

$$\Delta l = \frac{519122N \cdot 0,90m}{(0,45^2 - 0,37^2)m^2 \cdot 105 GPa} = 8,37 \cdot 10^{-5} m$$

Para seguir leyendo haga click aquí