



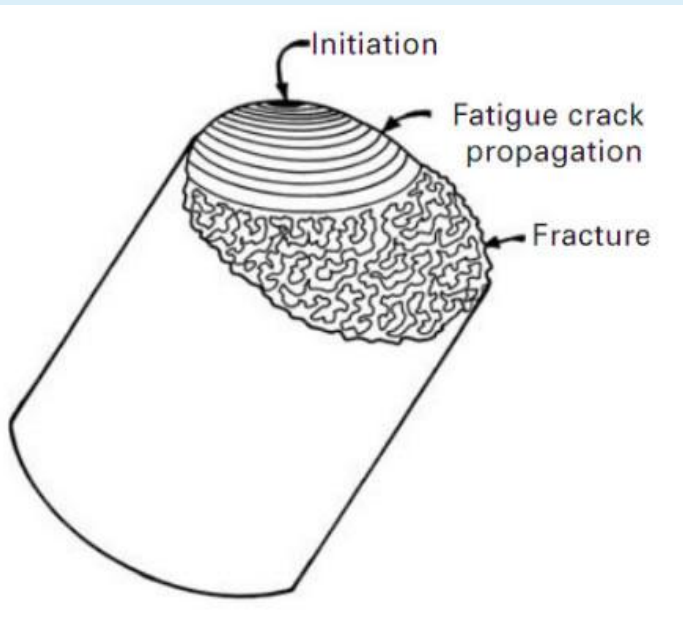
ELEMENTOS DE MÁQUINAS

Ingeniería Electromecánica

Plan de Estudios 2013

Año 2026

FATIGA



ELEMENTOS SOMETIDOS A CARGAS CONSTANTES

- *La carga estática puede provocar: deflexión inaceptable, inestabilidad elástica, distorsión plástica y fractura.*
- *Las Teorías de roturas utilizadas para materiales dúctiles son:*
 - *Teoría del máximo esfuerzo cortante*
 - *Teoría de la máxima energía de distorsión*

Teoría del esfuerzo cortante máximo para materiales dúctiles

La teoría del esfuerzo cortante máximo estipula que la fluencia comienza cuando el esfuerzo cortante máximo de cualquier elemento iguala al esfuerzo cortante máximo en una pieza de ensayo a tensión del mismo material cuando esa pieza comienza a fluir

$$\sigma = P/A$$

$$\tau_{\text{máx}} = \sigma/2$$

$$\tau_{\text{máx}} = S_y/2$$

el esfuerzo cortante máximo ocurre a 45° de la superficie en tensión

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2} \quad \text{o} \quad \sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y$$

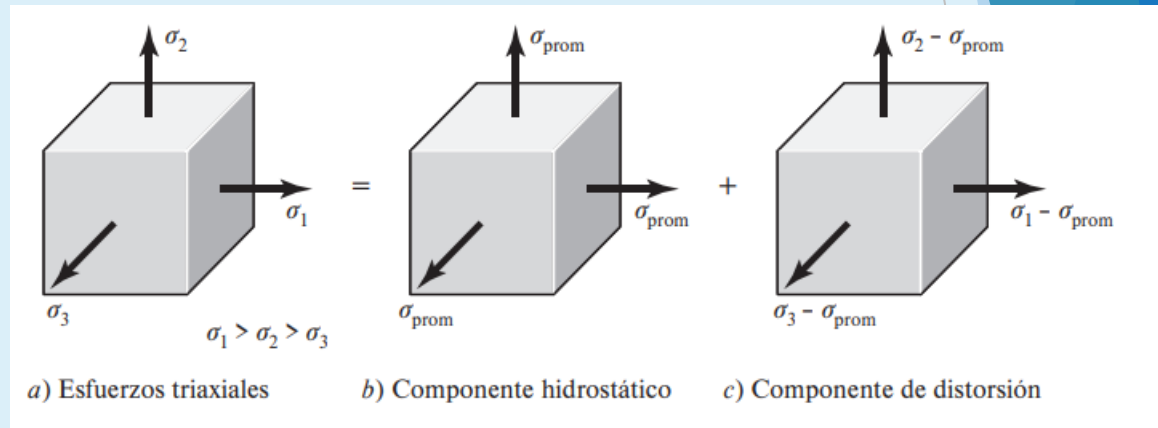
$$S_{sy} = 0.5S_y$$

La resistencia a la fluencia en cortante

Teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles

La teoría de la energía de deformación máxima predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material.

a) Elemento con esfuerzos triaxiales; este elemento experimenta cambio de volumen y distorsión angular. b) Elemento sometido a tensión hidrostática que solo experimenta cambio de volumen. c) Elemento con distorsión angular sin cambio de volumen.



la energía de distorsión es

$$u_d = \frac{1 + \nu}{3E} S_y^2$$

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$

Estado plano

Esfuerzo Von Mises

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2}$$

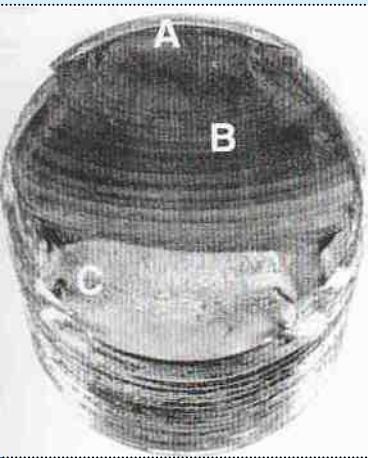
$$\sigma' = \frac{S_y}{n}$$

$$S_{sy} = 0.577 S_y$$

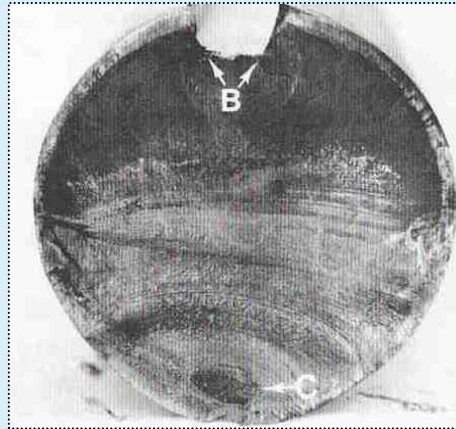
La resistencia a la fluencia en cortante

ELEMENTOS SOMETIDOS A CARGAS VARIABLES

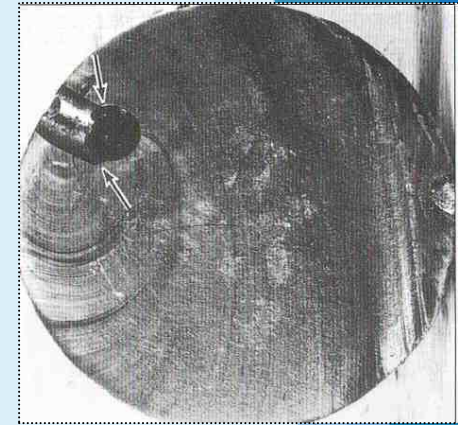
Perno



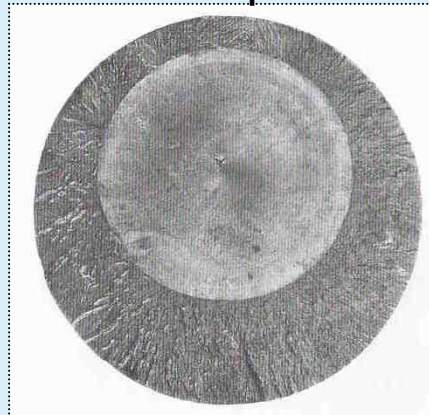
Eje de transmisión AISI 4320



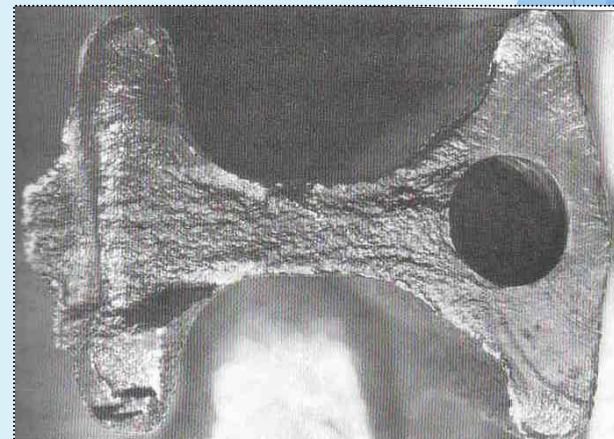
Pasador AISI 8640



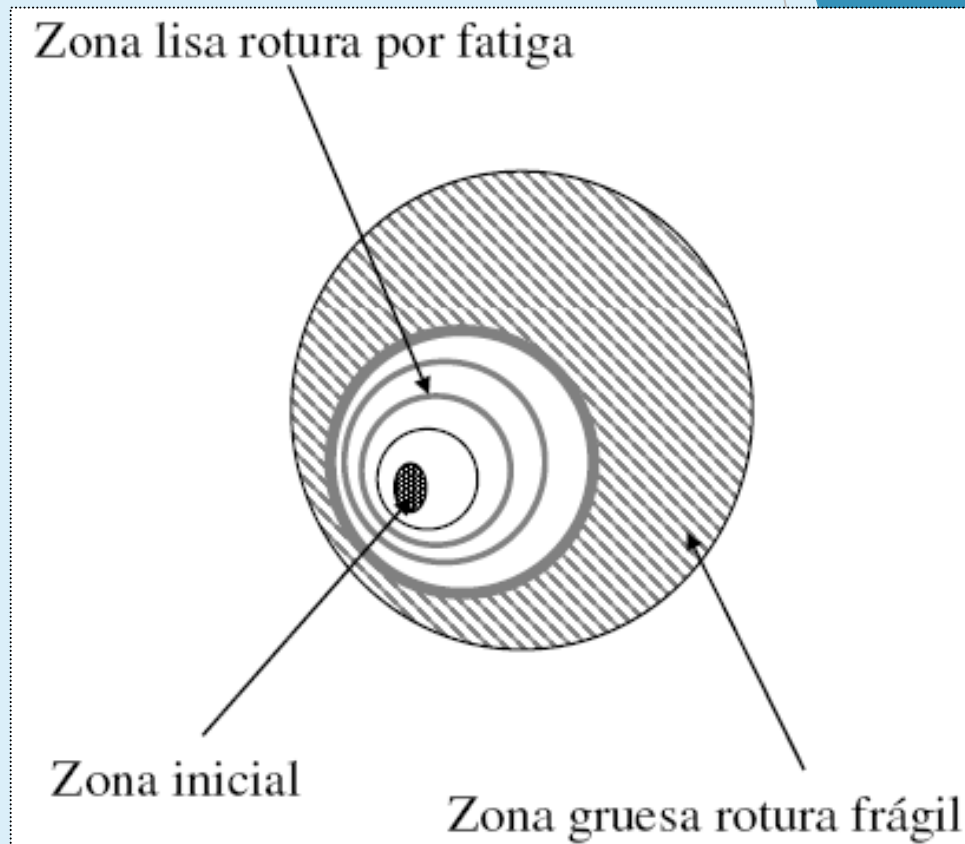
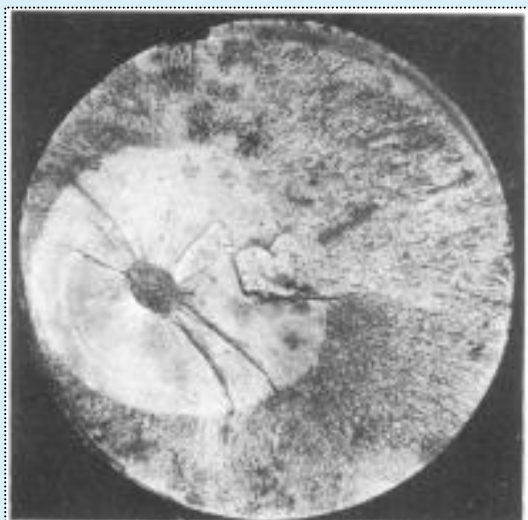
Varilla de pistón



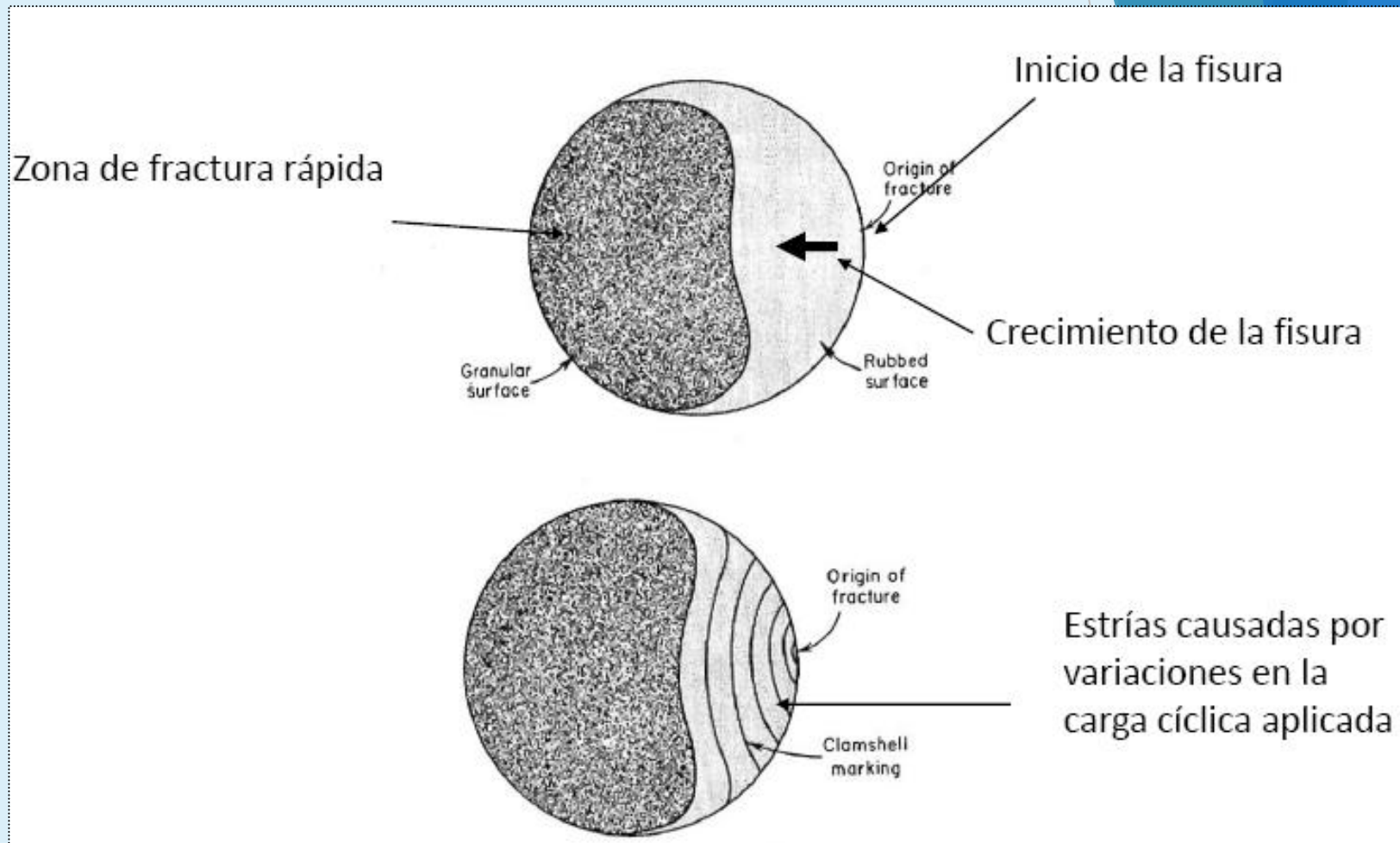
Biela forjada de acero AISI 8640



ELEMENTOS SOMETIDOS A CARGAS VARIABLES



ELEMENTOS SOMETIDOS A CARGAS VARIABLES



ELEMENTOS SOMETIDOS A CARGAS VARIABLES

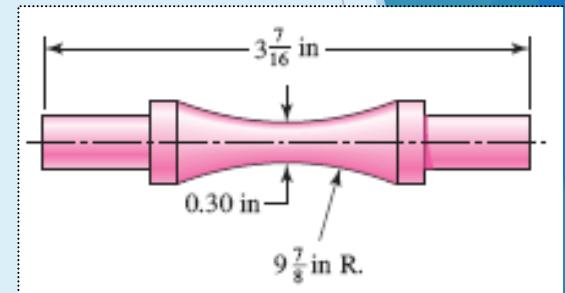
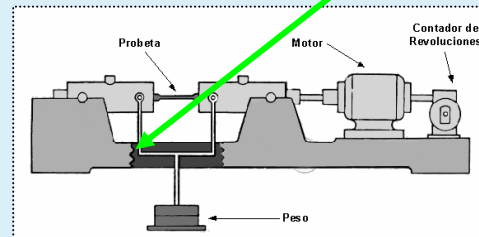
Fisuras causadas por fatiga térmica (ciclos de calentamiento y enfriamiento) en disco de embrague



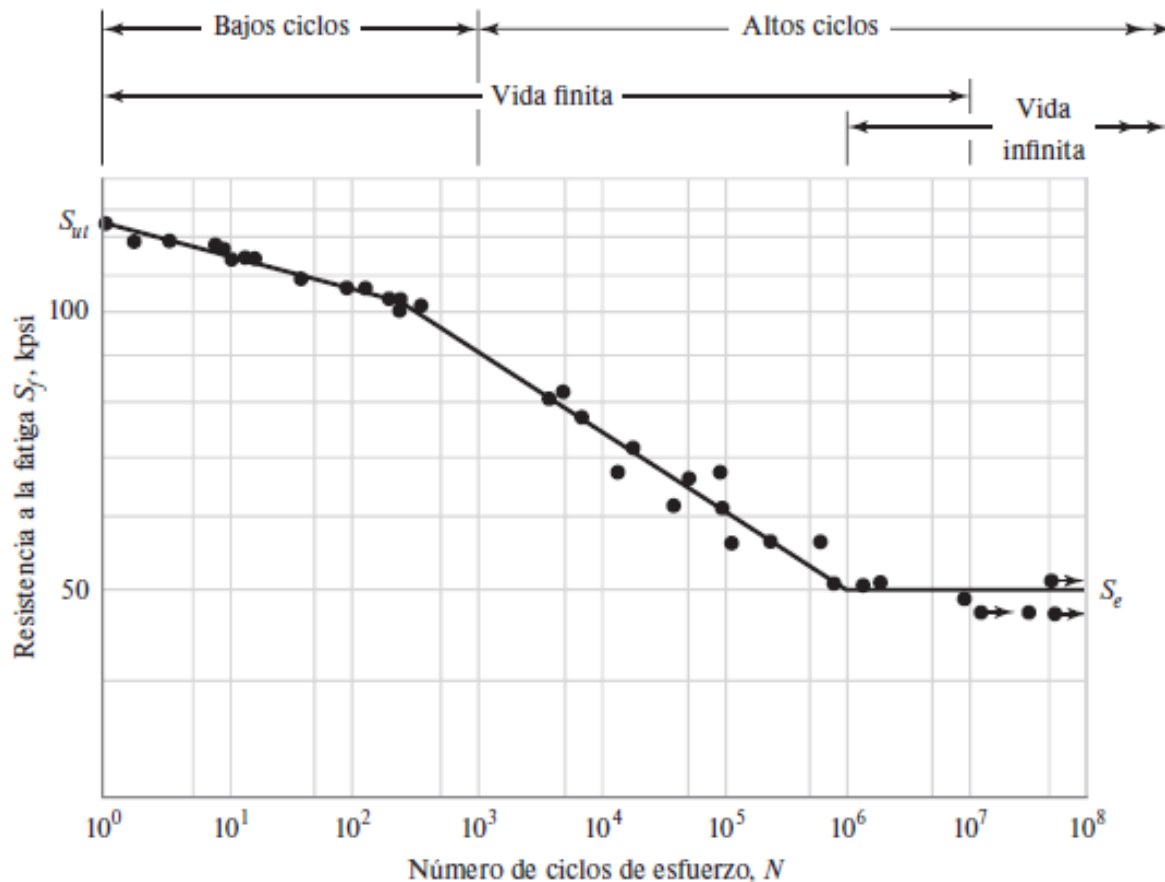
Elementos sometidos a Cargas variables

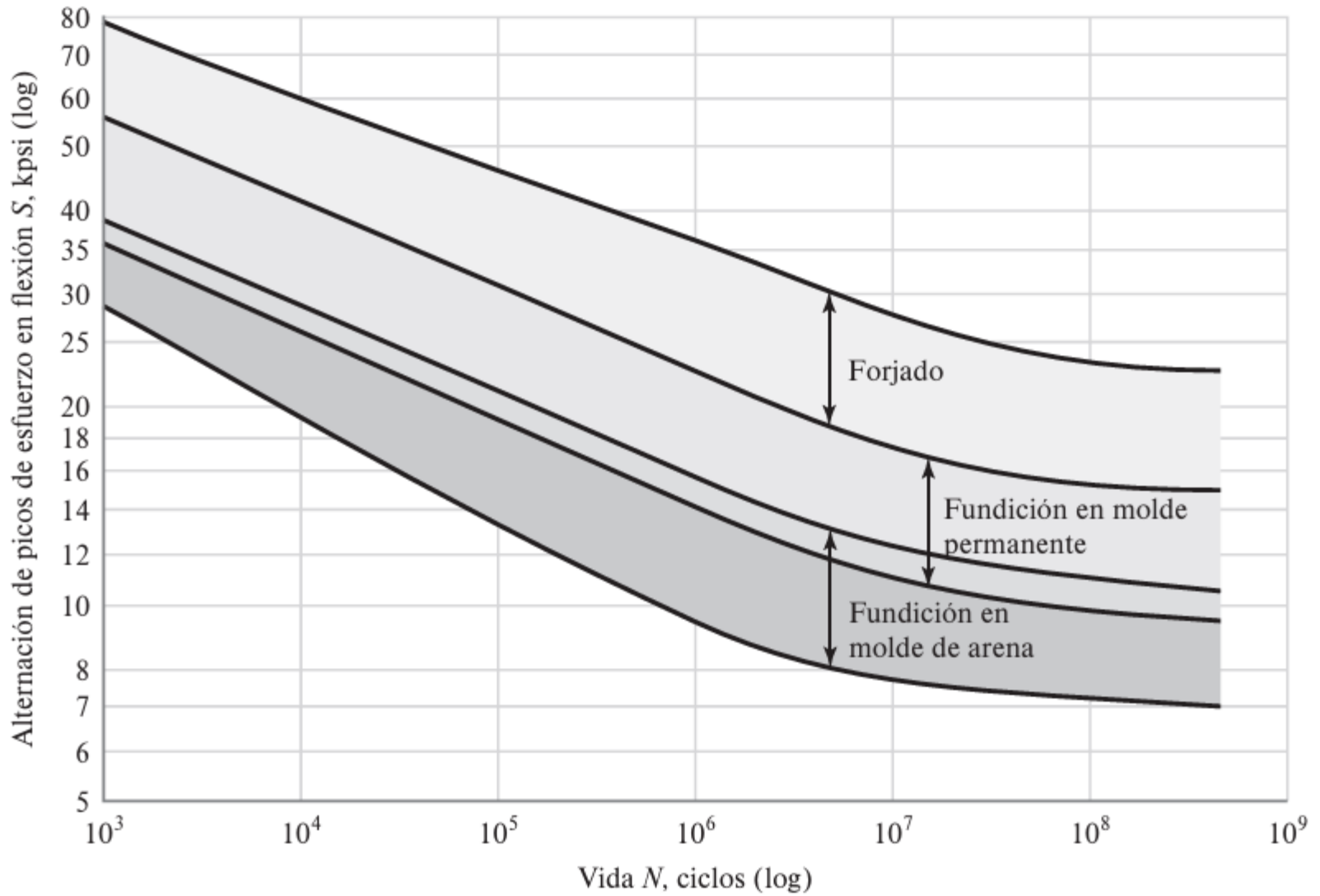
Máquina de ensayos fatiga

Método del esfuerzo-vida
máquina de viga rotativa de alta velocidad
de R.R. Moore.



Curva de comportamiento de una probeta de acero





Límite de Fatiga o límite de Resistencia a la Fatiga

- ▶ Valores aproximados

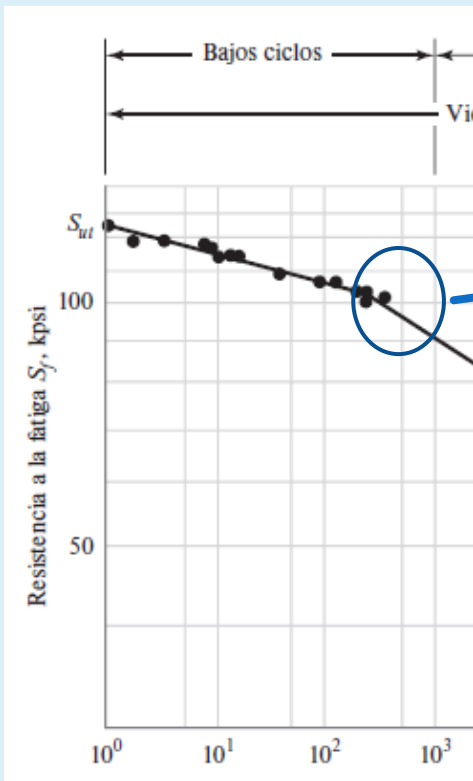
$$S'_e = \begin{cases} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1 400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Ciclos Bajos

Vida finita

Resistencia a la fatiga de una probeta con un número específico de ciclos como

$$(S'_f)_N = E\Delta\varepsilon_e/2$$



$$(S'_f)_N = \sigma'_F(2N)^b$$

$$(S'_f)_{10^3} = \sigma'_F(2 \cdot 10^3)^b = f S_{ut}$$

$$(2-15), \sigma'_F = \sigma_0 \varepsilon^m, \text{ con } \varepsilon = \varepsilon'_F.$$

$$f = \frac{\sigma'_F}{S_{ut}} (2 \cdot 10^3)^b$$

$$b = - \frac{\log(\sigma'_F / S'_e)}{\log(2N_e)}$$

se emplea la aproximación 11 SAE para aceros con $HB \leq 500$

para $S_{ut} < 70$ kpsi, sea $f = 0.9$.

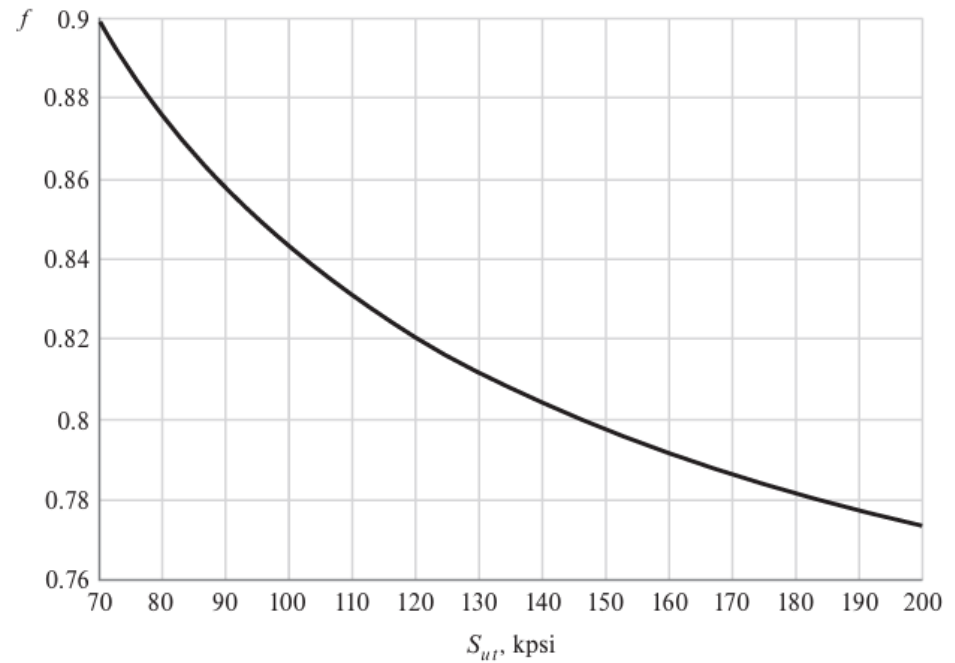
$$\sigma'_F = S_{ut} + 50 \text{ kpsi} \quad \text{o} \quad \sigma'_F = S_{ut} + 345 \text{ MPa}$$

Ciclos Bajos

Vida finita

Figura 6-18

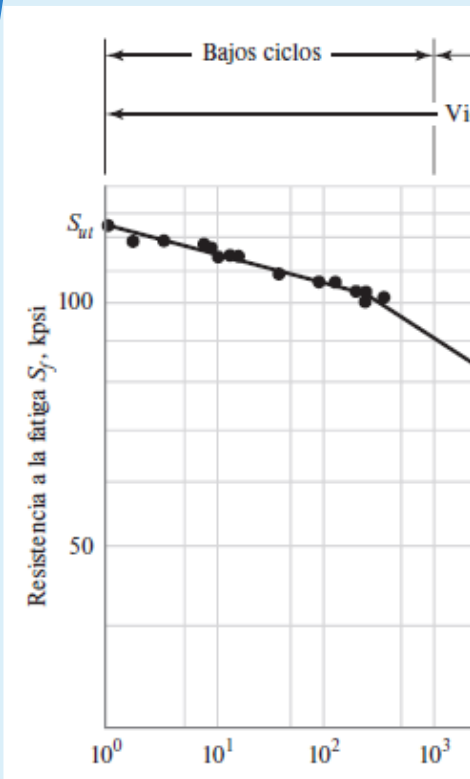
Fracción de resistencia a la fatiga, f , de S_{ut} a los 10^3 ciclos para $S_e = S'_e = 0.5 S_{ut}$ a los 10^6 ciclos.



para $S_{ut} < 70$ kpsi, sea $f = 0.9$.

Ciclos Bajos Vida finita

Se define para ciclos que varíen entre 1000 y 1000000



$$S_f = aN^b$$

$$N = \left(\frac{\sigma_{inv}}{a} \right)^{1/b}$$

$$a = \frac{(fS_{ut})^2}{S_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{fS_{ut}}{S_e}$$

S_{ut} kpsi	60	90	120	200
f	0.93	0.86	0.82	0.77

S_f : Resistencia fatiga vida finita
 S_e : Resistencia fatiga vida infinita
 S_u : Resistencia última
 N : Número ciclos

Condiciones que afectan el Límite de Resistencia a la Fatiga

- ▶ **Material:** composición química.
- ▶ **Manufactura:** método de fabricación, tratamiento térmico, corrosión por desgaste, condición de superficie, concentración de esfuerzo.
- ▶ **Entorno:** corrosión, temperatura, etc.
- ▶ **Diseño:** tamaño, forma, vida, estado de esfuerzos, concentración de esfuerzo, velocidad, rozamiento



Ciclos Altos Vida infinita

Fórmula de Marín

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

k_a = factor de modificación por la condición superficial

k_b = factor de modificación por el tamaño

k_c = factor de modificación por la carga

k_d = factor de modificación por la temperatura

k_e = factor de confiabilidad¹³

k_f = factor de modificación por efectos varios

S'_e = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.



Ciclos Altos Vida infinita

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

Fórmula de Marin

$$k_a = a S_{ut}^b$$

Coeficiente de Superficie:

Acabado superficial	Factor a		Exponente <i>b</i>
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Coeficiente de tamaño:

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Para carga axial

$$k_b = 1$$

pero Véase k_c .

$A_{0.95\sigma} = 0.01046d^2$
 $d_e = 0.370d$

$A_{0.95\sigma} = 0.05hb$
 $d_e = 0.808\sqrt{hb}$

$A_{0.95\sigma} = \begin{cases} 0.10at_f & \text{eje 1-1} \\ 0.05ba & t_f > 0.025a \text{ eje 2-2} \end{cases}$

$A_{0.95\sigma} = \begin{cases} 0.05ab & \text{eje 1-1} \\ 0.052xa + 0.1t_f(b-x) & \text{eje 2-2} \end{cases}$

$$d_e = 0.808(hb)^{1/2}$$

Coeficiente de carga:

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión}^{17} \end{cases}$$

Coeficiente de temperatura:

$$k_d = 0.975 + 0.432(10^{-3})T_F - 0.115(10^{-5})T_F^2 + 0.104(10^{-8})T_F^3 - 0.595(10^{-12})T_F^4$$

donde $70 \leq T_F \leq 1\,000^\circ\text{F}$.

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}}$$

S_{RT} : resistencia a la tensión a la temperatura del lugar de Trabajo

S_T : resistencia a la tensión a la temperatura de operación

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Factor de Confiabilidad K_e

$$k_e = 1 - 0.08 z_\alpha$$

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_α	Factor de confiabilidadr k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

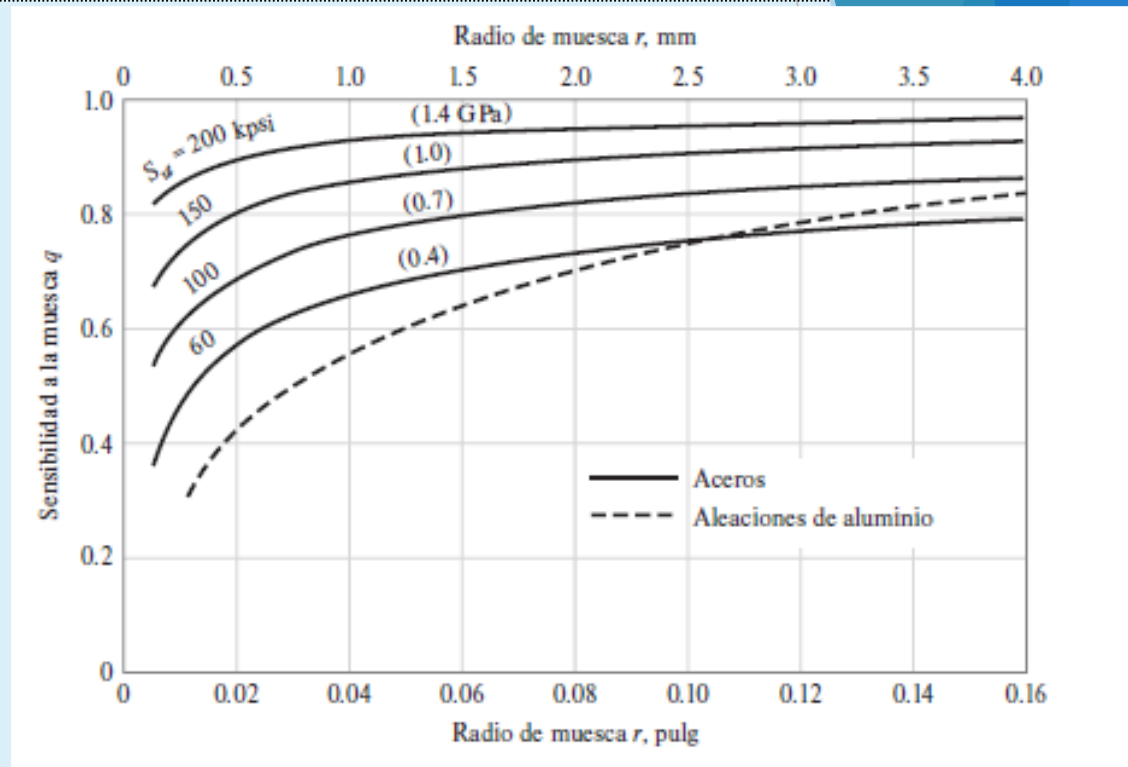
Coeficiente de efectos varios:

Para piezas sometidas a cargas de flexión y cargas axiales

$$K_f = \frac{\text{esfuerzo máximo en probeta con muesca}}{\text{esfuerzo en probeta libre de muesca}}$$

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1}$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$



El K_t se obtiene de figuras

K_f : factor de concentración de esfuerzo por fatiga

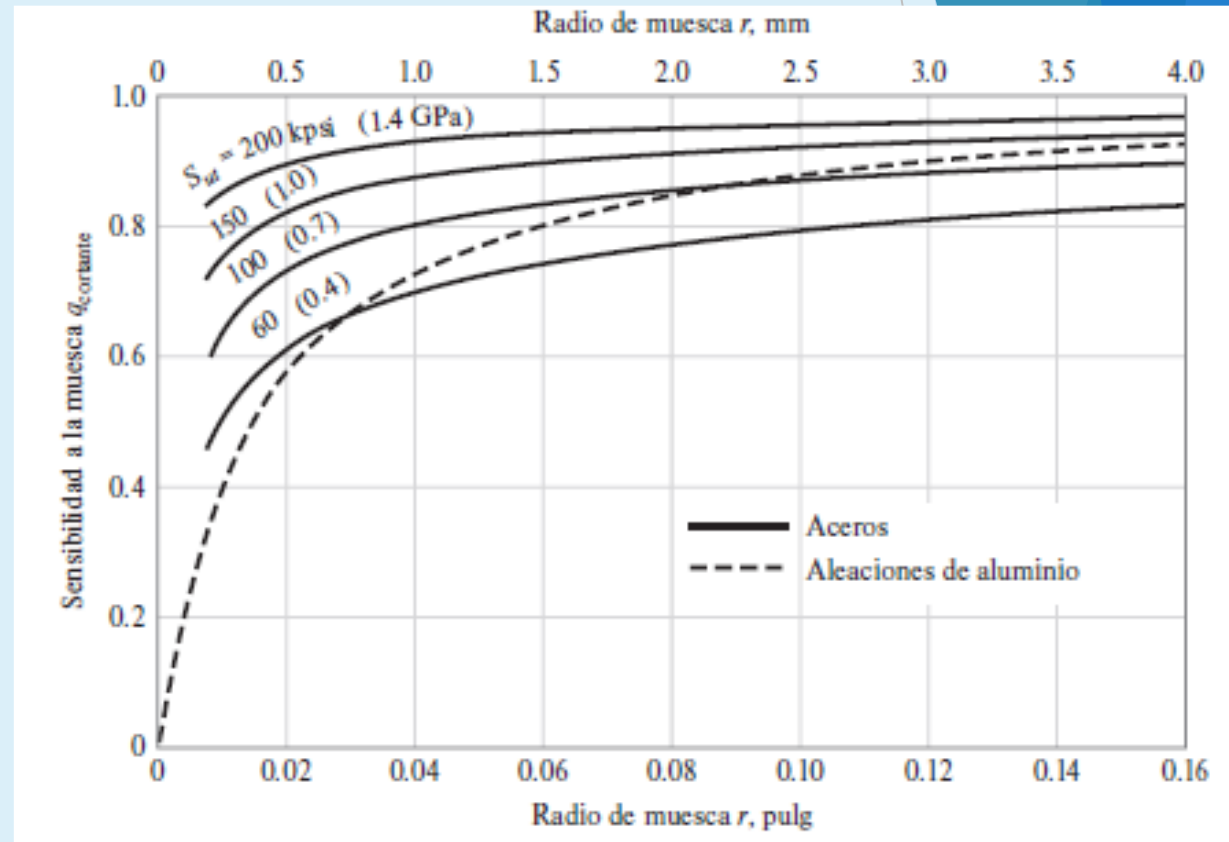
Coeficiente de efectos diversos:

Para materiales en torsión con inversión

$$\tau_{\text{máx}} = K_{fs} \tau_0$$

$$q_{\text{cortante}} = \frac{K_{fs} - 1}{K_{ts} - 1}$$

$$K_{fs} = 1 + q_{\text{cortante}}(K_{ts} - 1)$$

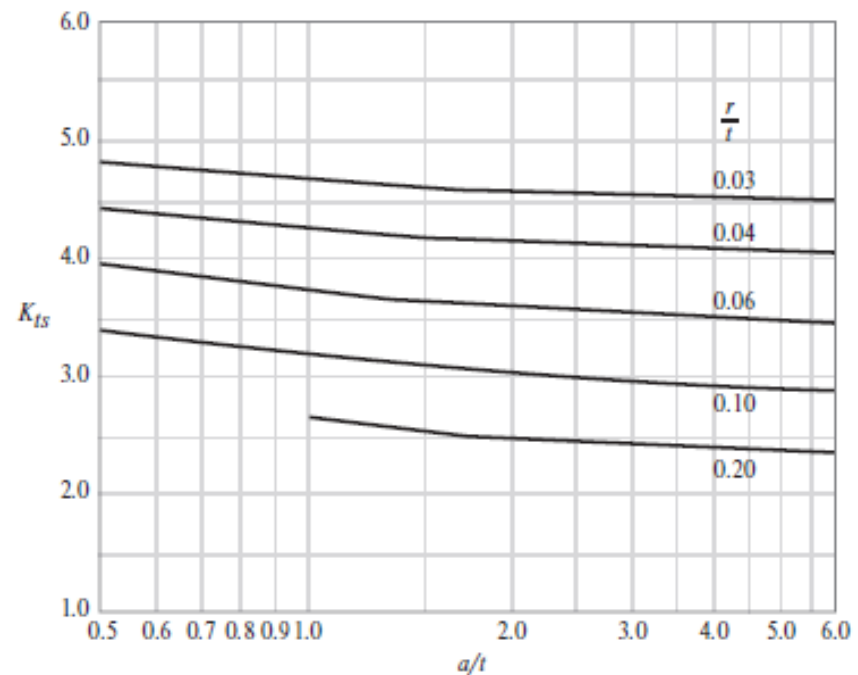
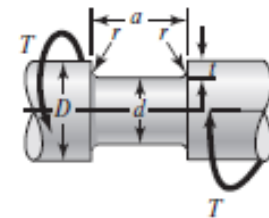


Coeficiente de efectos varios:

Para materiales en torsión con inversión

$$q = \frac{k_{fs} - 1}{k_{ts} - 1}$$

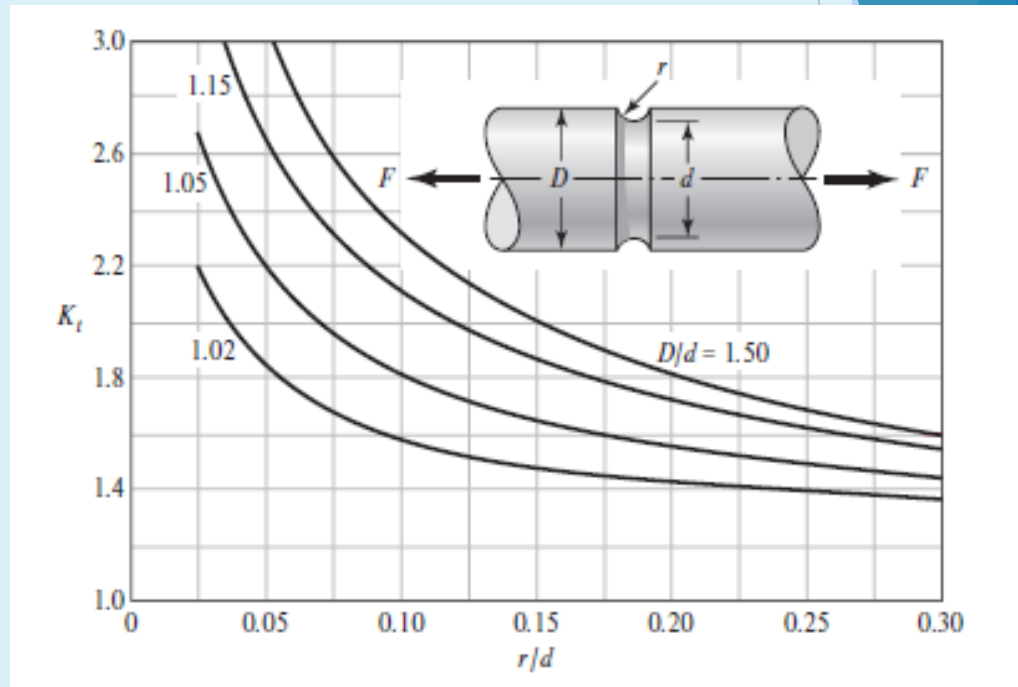
$$K_{fs} = 1 + q(K_{ts} - 1)$$



Coeficiente de efectos varios:

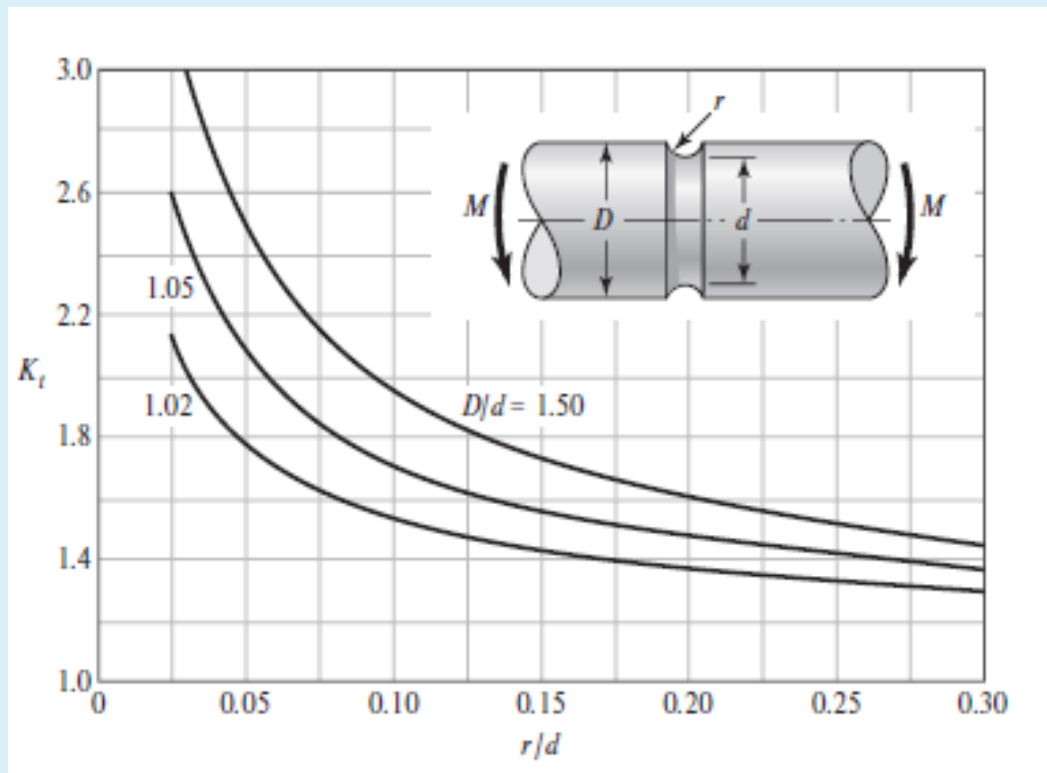
Para materiales en torsión con inversión

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$



Coeficiente de efectos diversos:

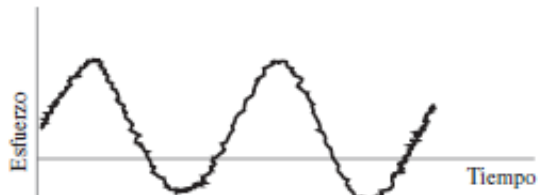
Barra redonda ranurada en flexión.



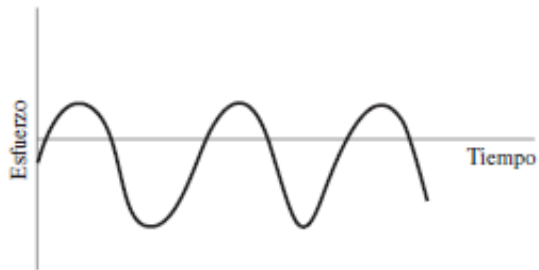
Caracterización de esfuerzos fluctuantes

$$F_m = \frac{F_{\text{máx}} + F_{\text{mín}}}{2} \quad F_a = \left| \frac{F_{\text{máx}} - F_{\text{mín}}}{2} \right|$$

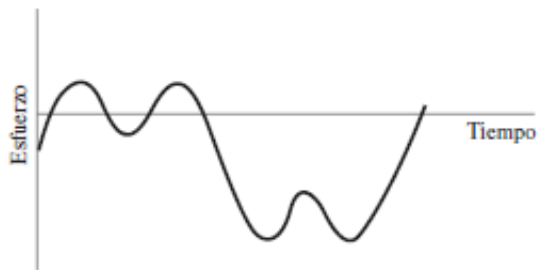
Esfuerzos Fluctuantes



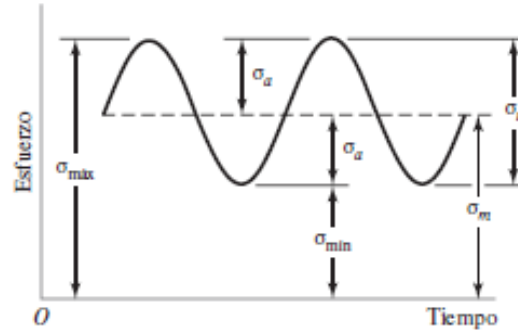
a)



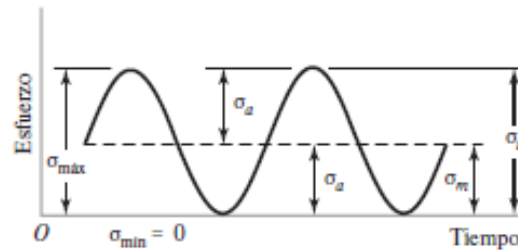
b)



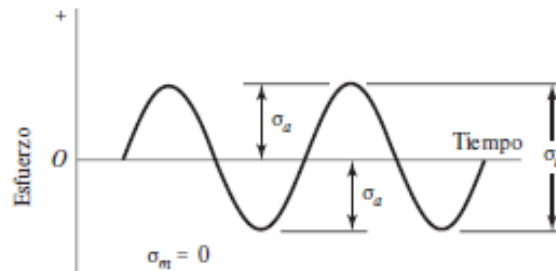
c)



d)



e)



f)

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

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

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

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$



Resistencia a la Fatiga Para Esfuerzos Fluctuantes.

Línea de Goodman.

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$$

Línea de Soderberg.

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{yt}} = 1$$

Relación parabólica de Gerber

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1$$



Resistencia A La Fatiga Para Esfuerzos Fluctuantes.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

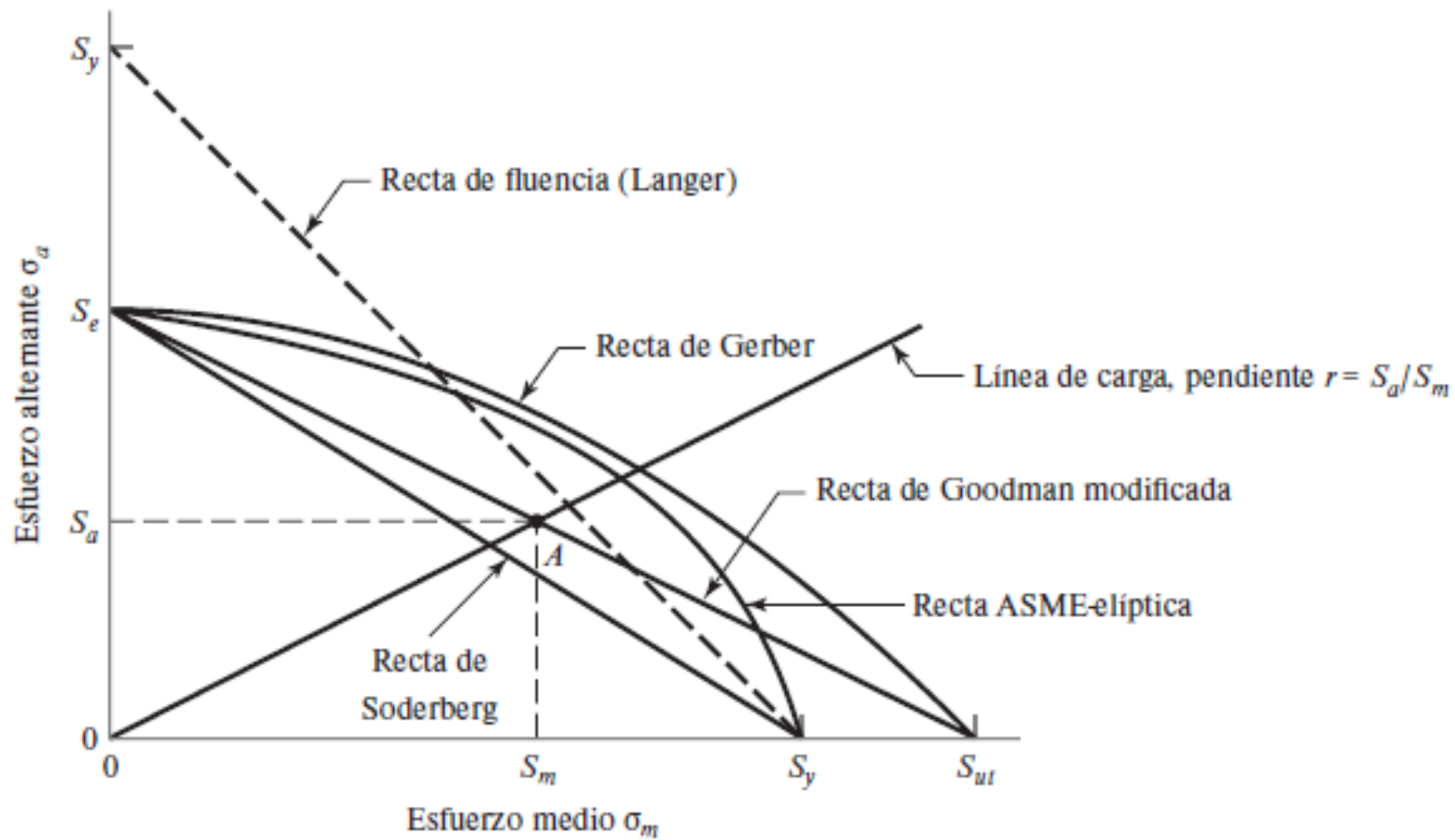
Línea de Goodman.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{yt}} = \frac{1}{n}$$

Línea de Soderberg.

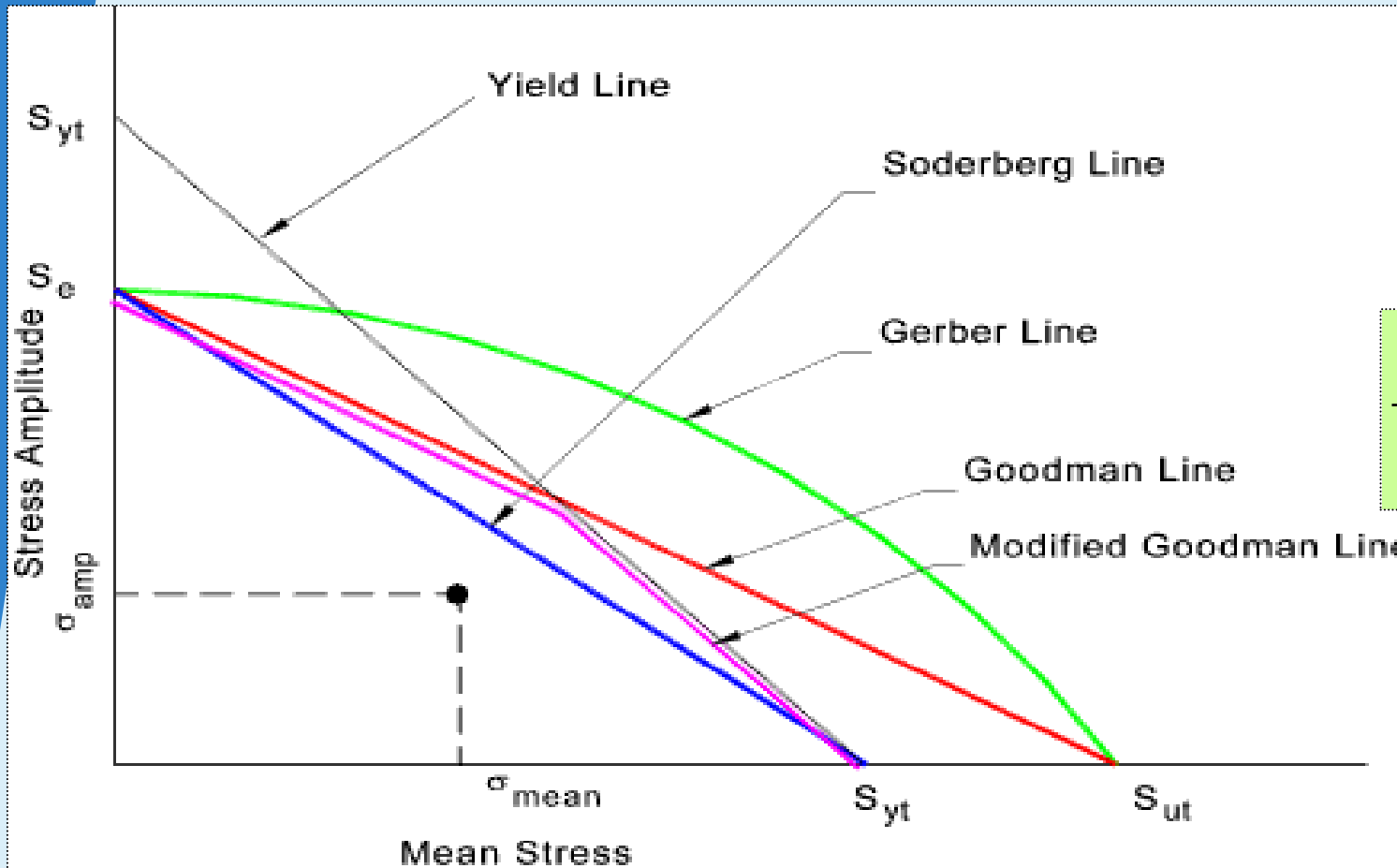
Relación parabólica de Gerber

$$\frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1$$





Resistencia A La Fatiga Para Esfuerzos Fluctuantes.



$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

Von Mises es

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B + \sigma_B^2)^{1/2}$$

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2}$$

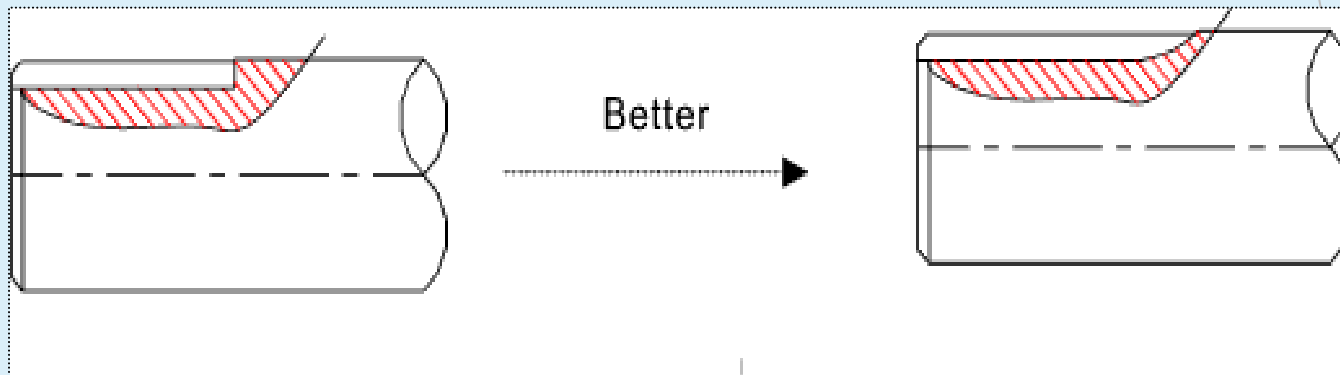
$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2}$$

$$\sigma'_a = \left\{ \left[(K_f)_{\text{flexión}} (\sigma_a)_{\text{flexión}} + (K_f)_{\text{axial}} \frac{(\sigma_a)_{\text{axial}}}{0.85} \right]^2 + 3 \left[(K_{fs})_{\text{torsión}} (\tau_a)_{\text{torsión}} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$$\sigma'_m = \left\{ \left[(K_f)_{\text{flexión}} (\sigma_m)_{\text{flexión}} + (K_f)_{\text{axial}} (\sigma_m)_{\text{axial}} \right]^2 + 3 \left[(K_{fs})_{\text{torsión}} (\tau_m)_{\text{torsión}} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

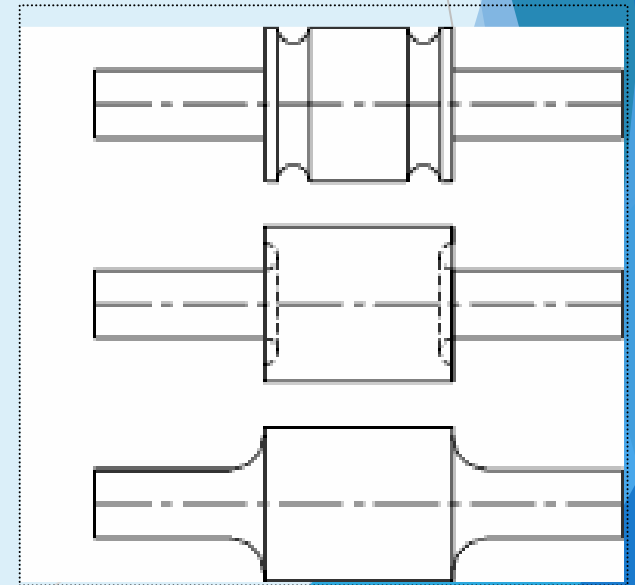
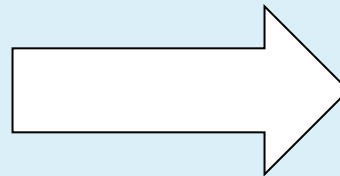
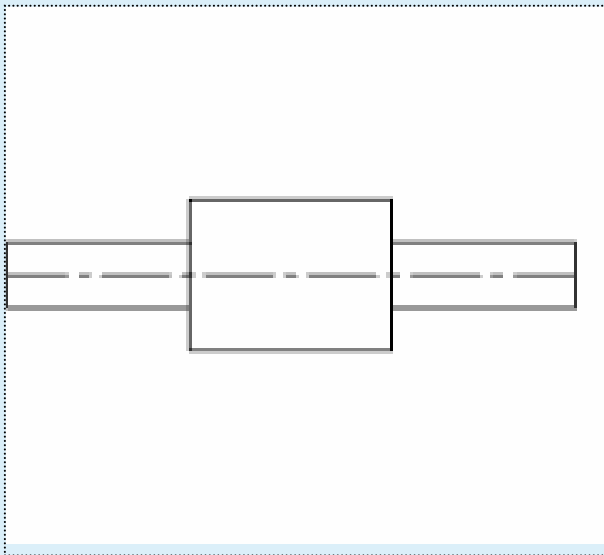
Resistencia A La Fatiga Para Esfuerzos Fluctuantes.

Consideraciones para mejorar comportamiento



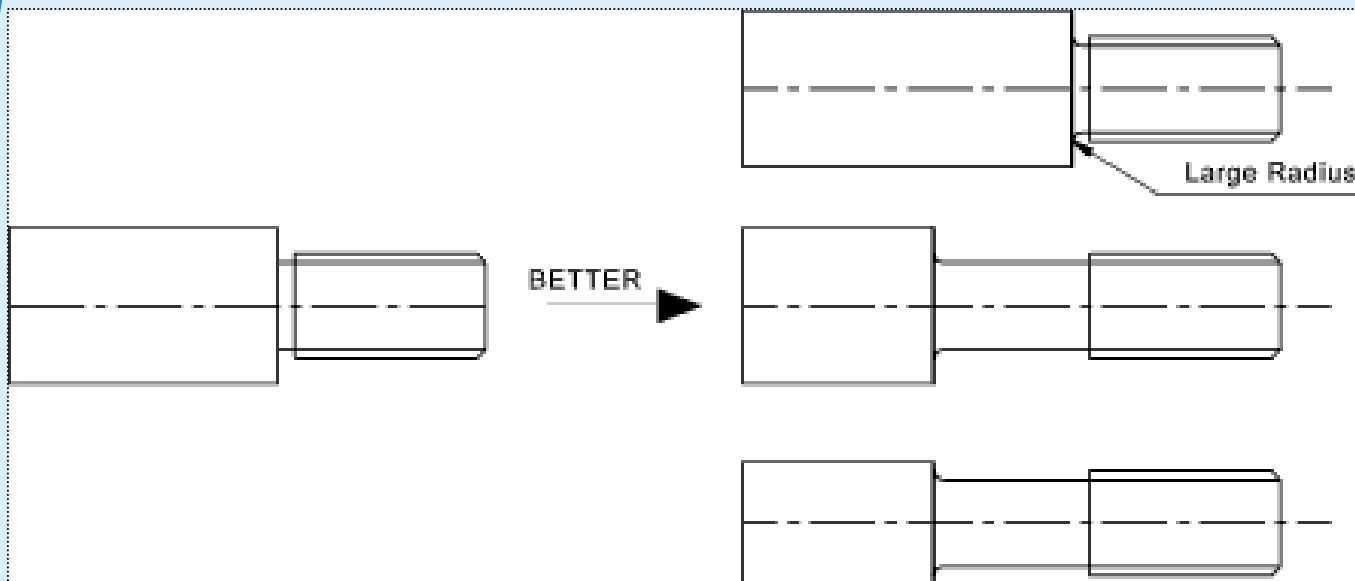
Resistencia A La Fatiga Para Esfuerzos Fluctuantes.

Consideraciones para mejorar comportamiento



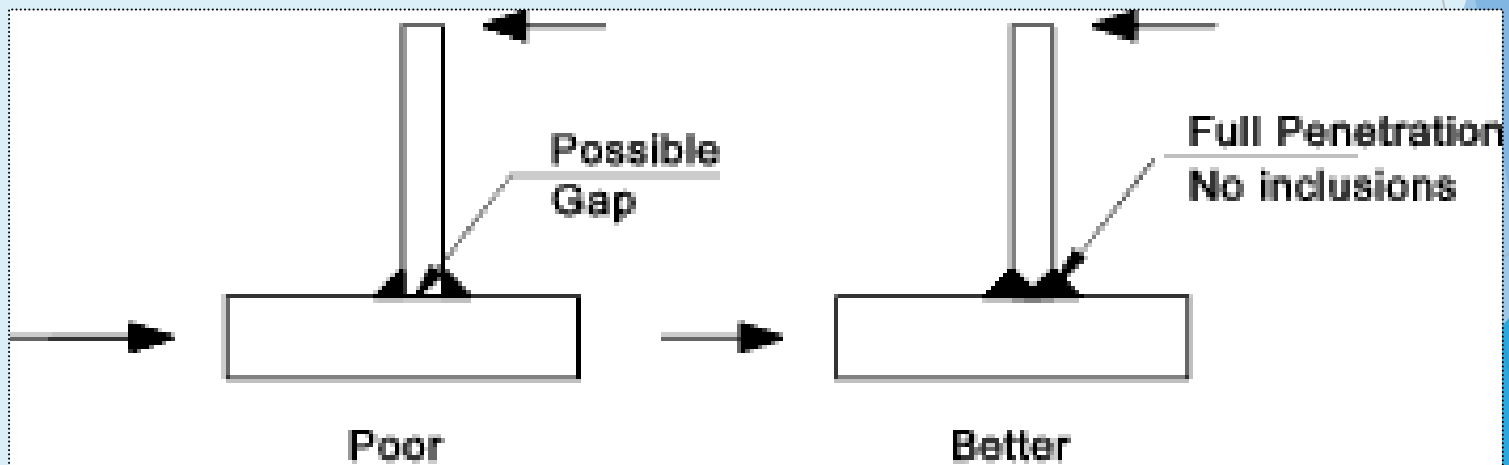
Resistencia A La Fatiga Para Esfuerzos Fluctuantes.

Consideraciones para mejorar comportamiento



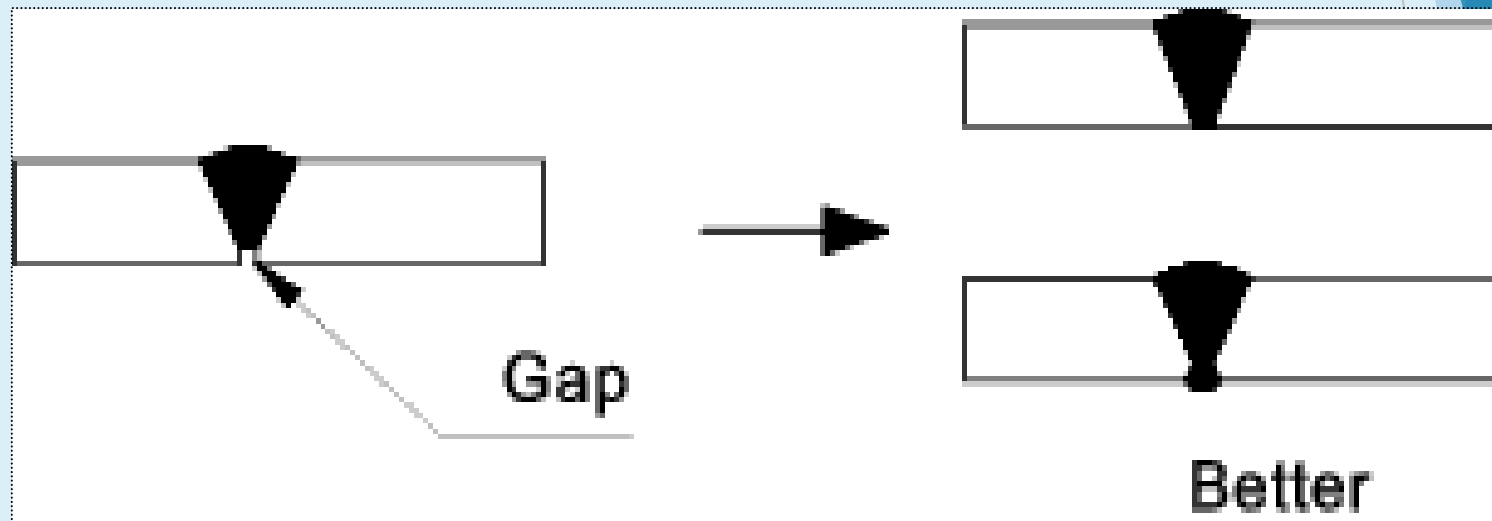
Resistencia A La Fatiga Para Esfuerzos Fluctuantes.

Consideraciones para mejorar comportamiento



Resistencia A La Fatiga Para Esfuerzos Fluctuantes.

Consideraciones para mejorar comportamiento



ELEMENTOS DE MÁQUINAS

BIBLIOGRAFÍA

- RICHARD G. BUDYNAS y J. KEITH NISBETT. -DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA. 10ª Ed. Mc grawhill.
- SHIGLEY-MISCHE. -“DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA”-Ed. Mc-Graw hill.
- MOTT, Robert L. -“DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS”.-Ed. Prentice-Hall.
- JUVINALL, Robert c. -“FUNDAMENTOS DE DISEÑO PARA INGENIERÍA MECÁNICA”.-Ed. LIMUSA.
- Gráficos de: Shigley’sMechanicalEngineeringDesign, EighthEdition