

Etapas de la falla por fatiga

- **Etapa I:** es el inicio de una o más microgrietas debido a la deformación plástica cíclica seguida de propagación cristalográfica que se extiende de dos a cinco granos alrededor del origen. Normalmente, las grietas de la etapa I no pueden verse a simple vista.
- **Etapa II:** las microgrietas se convierten en macrogrietas y forman superficies paralelas en forma de mesetas separadas por crestas longitudinales.
- **Etapa III:** ocurre durante el ciclo de esfuerzo final cuando el material restante no puede soportar las cargas, lo que resulta en una fractura súbita y rápida Una fractura en la etapa III puede ser frágil, dúctil o una combinación de ambas.

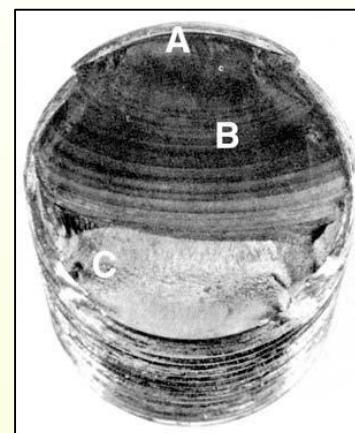
Ejemplos de piezas que han fallado por fatiga:



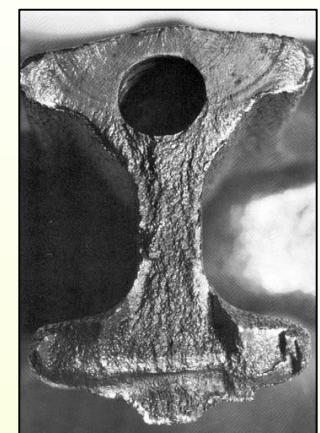
a) Falla en eje



b) Falla en eje



c) Falla en bulón



d) Falla en biela

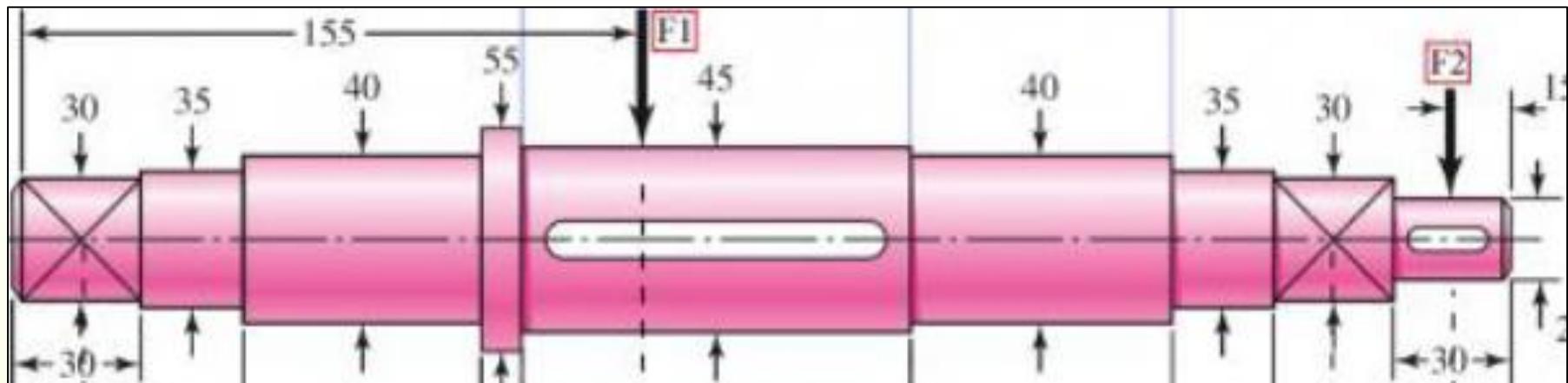
¿Dónde se inicia una falla por fatiga?

Por lo general, una grieta de fractura se inicia en una discontinuidad del material donde el esfuerzo cílico es máximo.

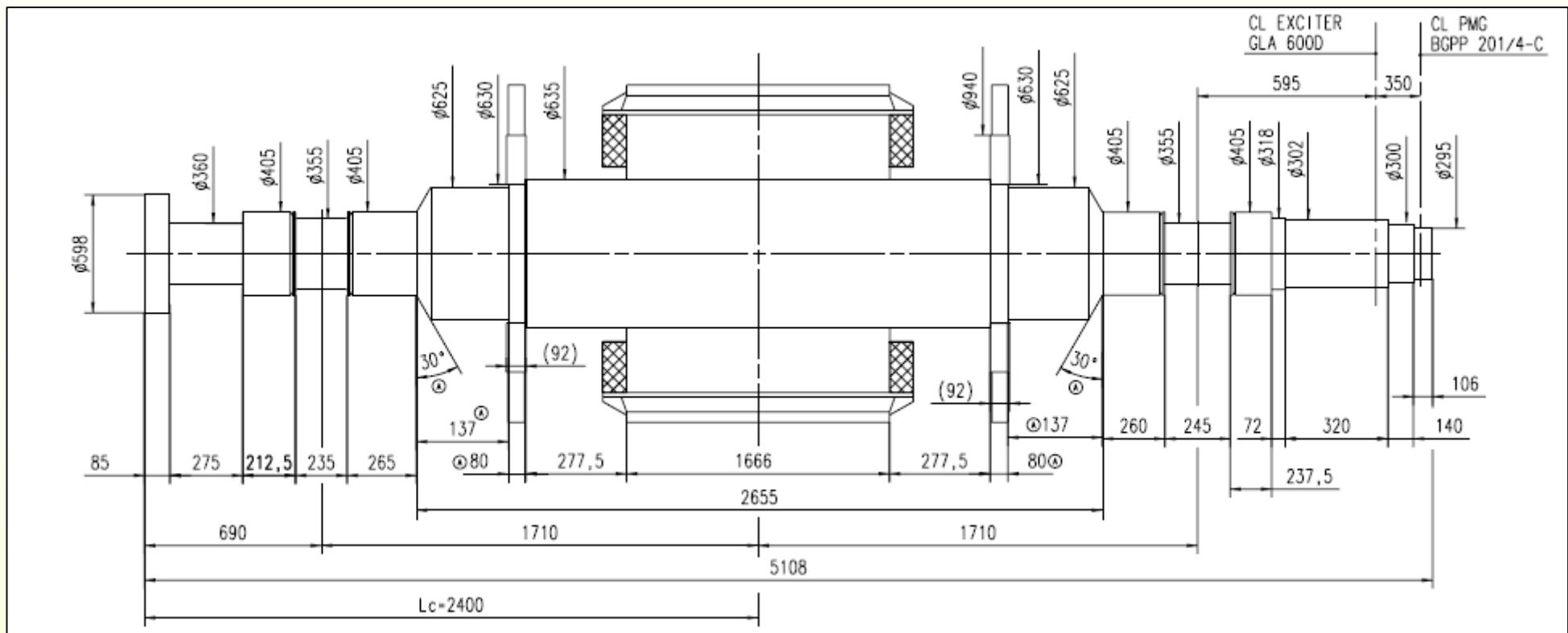
Las discontinuidades pueden surgir debido a:

- **El diseño de cambios rápidos en la sección** transversal, chaveteros, orificios, etc., donde ocurren concentraciones del esfuerzo.
- **Elementos que giran y/o se deslizan entre sí** (rodamientos, engranes, levas, etc.) **bajo presión alta constante**, lo que desarrolla esfuerzos de contacto concentrados por debajo de la superficie, los cuales pueden causar picaduras o astilladuras después de muchos ciclos de carga.
- **Falta de cuidado** en las ubicaciones de estampados, marcas de herramienta, raspaduras y rebabas; diseño defectuoso de juntas; ensamble inapropiado; y otros errores de fabricación.
- **La propia composición del material después de su proceso de laminado, forjado, fundido, estirado, calentado, etc.** Surgen discontinuidades microscópicas y submicroscópicas, en la superficie o por debajo de ella, así como inclusiones de material extraño, segregaciones de aleación, huecos, precipitaciones de partículas duras y discontinuidades cristalinas.

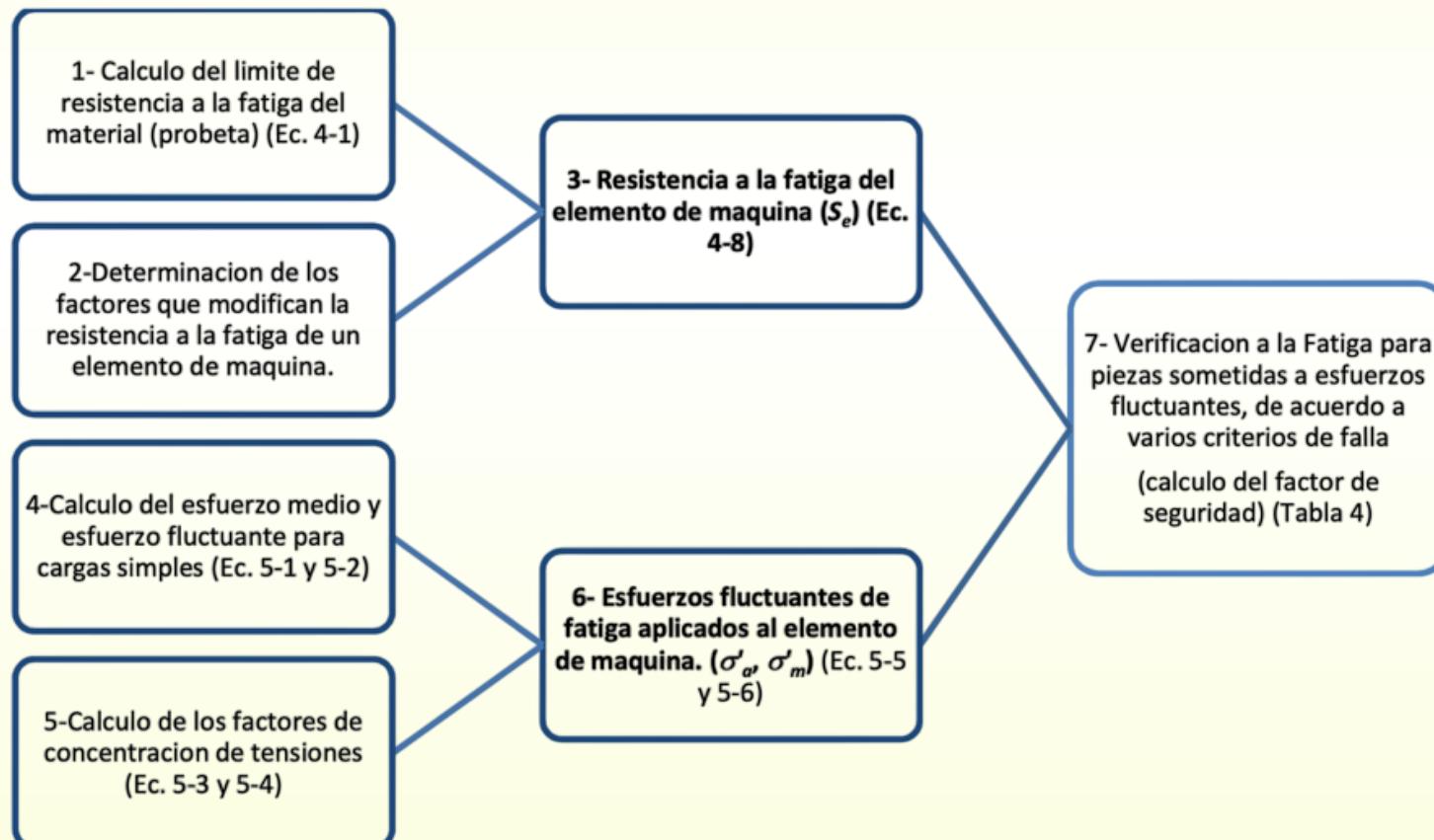
En la siguiente imagen, ¿dónde pueden originarse fallas por fatiga?



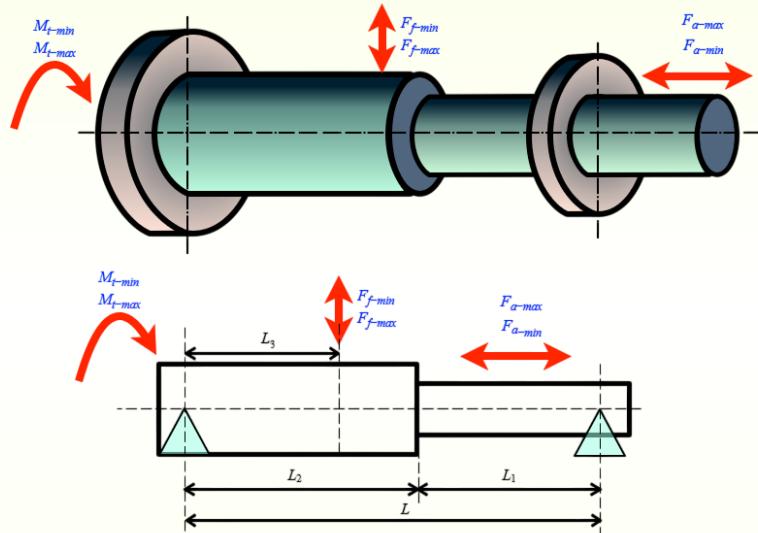
En la siguiente imagen, ¿dónde pueden originarse fallas por fatiga?



Procedimiento de cálculo



1- Simplificación de la pieza, e identificación de solicitudes



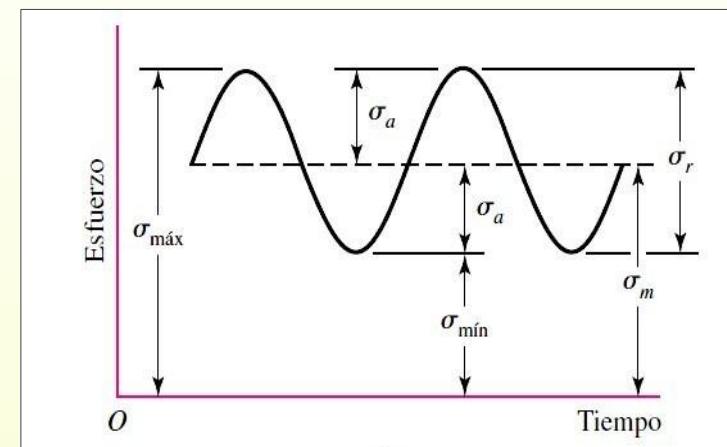
2- Cálculo de los esfuerzos simples

- **El esfuerzo medio:** Representa el valor medio entre la tensión máxima y la mínima

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

- **Amplitud del esfuerzo:** Representa el semicírculo de la pulsación.

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$



3- Tipos de Esfuerzos según la dirección de la fuerza

- **Solicitud AXIAL:** Provoca tensiones normales;
- **Solicitud transversal (FLEXION):** Provoca tensiones normales;
- **Solicitud de torsión:** Provoca tensiones cortantes.

Ya que los 3 esfuerzos anteriores pueden ser variables todos o alguno de ellos, el total de esfuerzos a considerar en el caso mas general son 6:

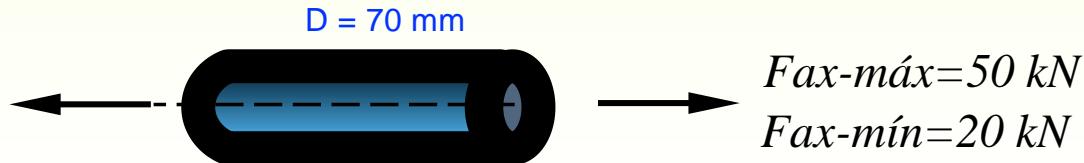
	AXIAL	FLEXION	TORSION
Mínimo	$F_{ax-min} \rightarrow \sigma_{ax-min}$	$F_{f-min} \rightarrow M_{f-min} \rightarrow \sigma_{f-min}$	$M_{t-min} \rightarrow \tau_{min}$
Máximo	$F_{ax-max} \rightarrow \sigma_{ax-max}$	$F_{f-max} \rightarrow M_{f-max} \rightarrow \sigma_{f-max}$	$M_{t-max} \rightarrow \tau_{max}$

Los esfuerzos a considerar para la verificación son los **MEDIOS** y **ALTERNANTES**, entonces:

	AXIAL	FLEXION	TORSION
Medio	σ_{ax-m}	σ_{f-m}	τ_m
Alternante	σ_{ax-a}	σ_{f-a}	τ_a

Ejemplo 1

Calculo de los esfuerzos simples



Tensiones PARA TRACCION y COMPRESION en una barra cilíndrica:

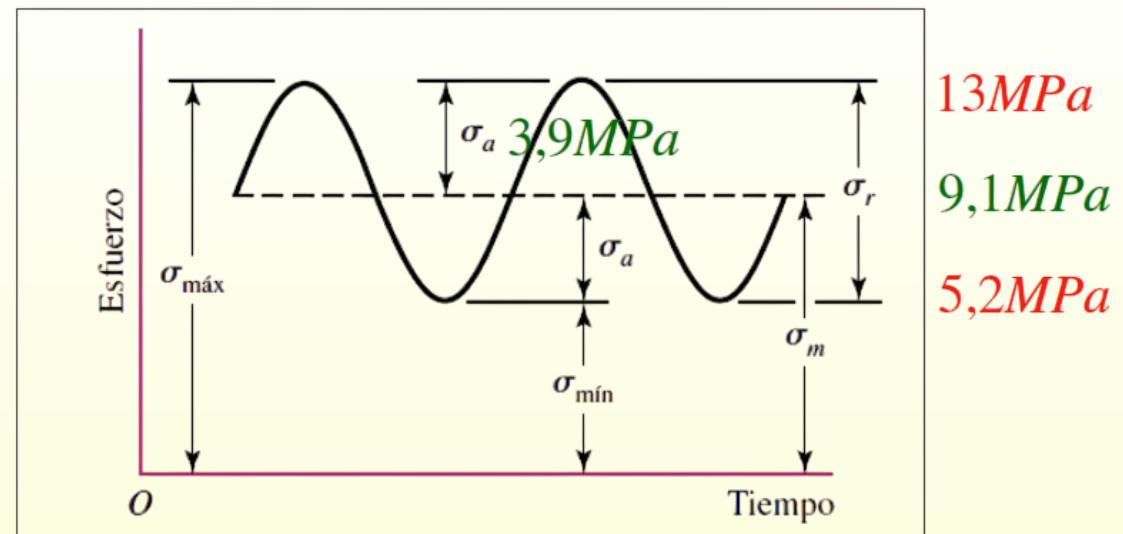
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad A = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * 70^2}{4} = 3848 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{ax\text{-max}} = \frac{F_{ax\text{-max}}}{A} = \frac{50000 \text{ N}}{3848 \text{ mm}^2} = 13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ax\text{-mín}} = \frac{F_{ax\text{-mín}}}{A} = \frac{20000 \text{ N}}{3848 \text{ mm}^2} = 5,2 \text{ MPa}$$

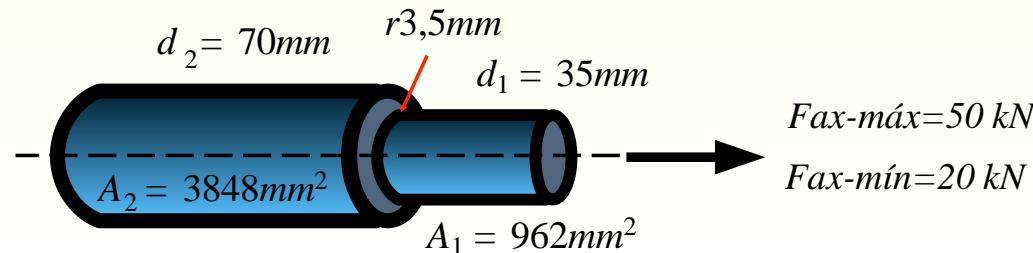
$$\sigma_{ax\text{-m}} = \frac{13 \text{ MPa} + 5,2 \text{ MPa}}{2} = 9,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ax\text{-a}} = \left| \frac{13 \text{ MPa} - 5,2 \text{ MPa}}{2} \right| = 3,9 \text{ MPa}$$



Ejemplo 2

Cálculo de los esfuerzos simples



Tensiones PARA TRACCION y COMPRESION en una barra cilíndrica:

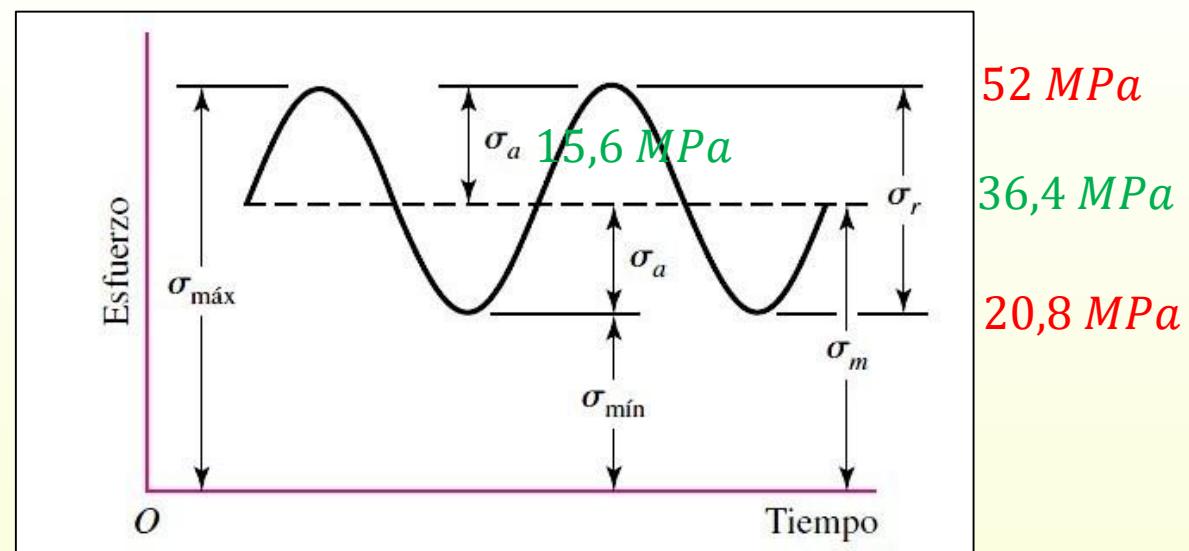
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad A = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * 35^2}{4} = 962 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{ax-\text{max}} = \frac{F_{ax-\text{max}}}{A} = \frac{50000 \text{ N}}{962 \text{ mm}^2} = 52 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ax-\text{mín}} = \frac{F_{ax-\text{mín}}}{A} = \frac{20000 \text{ N}}{962 \text{ mm}^2} = 20,8 \text{ MPa}$$

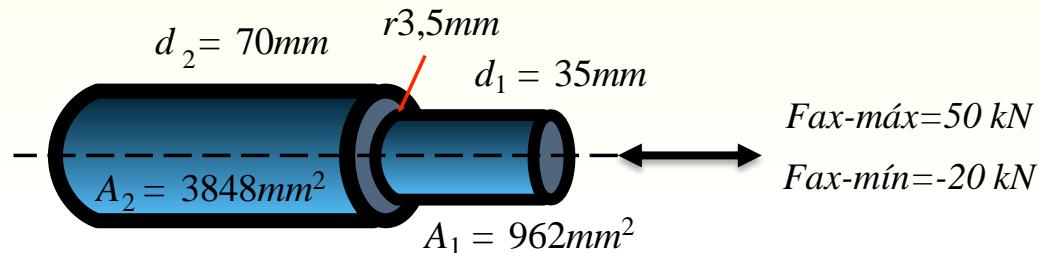
$$\sigma_{ax-m} = \frac{52 \text{ MPa} + 20,8 \text{ MPa}}{2} = 36,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ax-a} = \left| \frac{52 \text{ MPa} - 20,8 \text{ MPa}}{2} \right| = 15,6 \text{ MPa}$$



Ejemplo 3

Cálculo de los esfuerzos simples



Tensiones PARA TRACCION y COMPRESION en una barra cilíndrica:

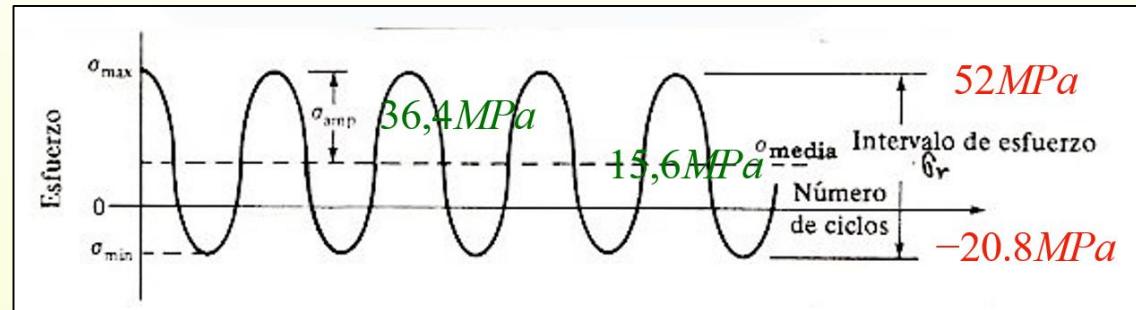
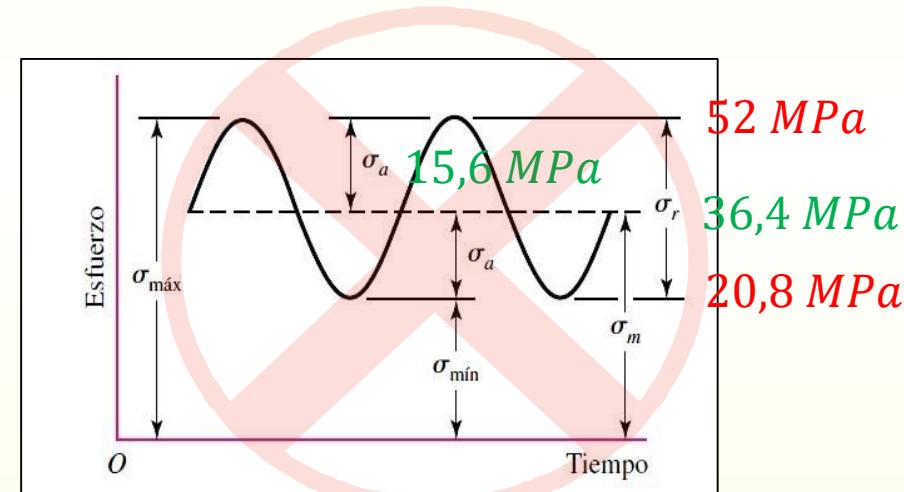
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad A = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * 35^2}{4} = 962 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{ax-\text{max}} = \frac{F_{ax-\text{max}}}{A} = \frac{50000 \text{ N}}{962 \text{ mm}^2} = 52 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ax-\text{mín}} = \frac{F_{ax-\text{mín}}}{A} = \frac{-20000 \text{ N}}{962 \text{ mm}^2} = -20,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ax-m} = \frac{52 \text{ MPa} - 20,8 \text{ MPa}}{2} = 15,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ax-a} = \left| \frac{52 \text{ MPa} - (-20,8 \text{ MPa})}{2} \right| = 36,4 \text{ MPa}$$

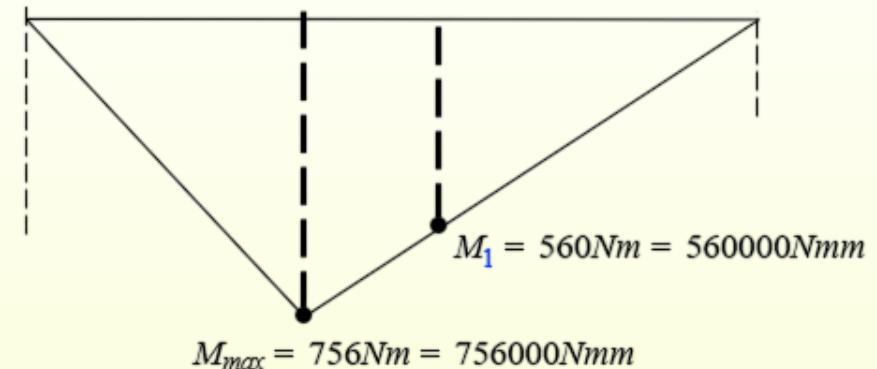
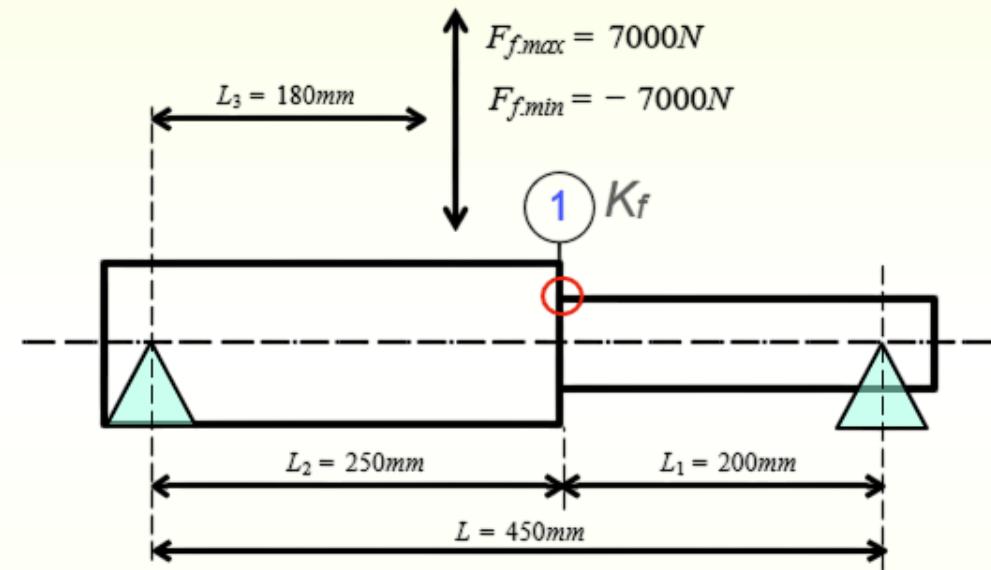
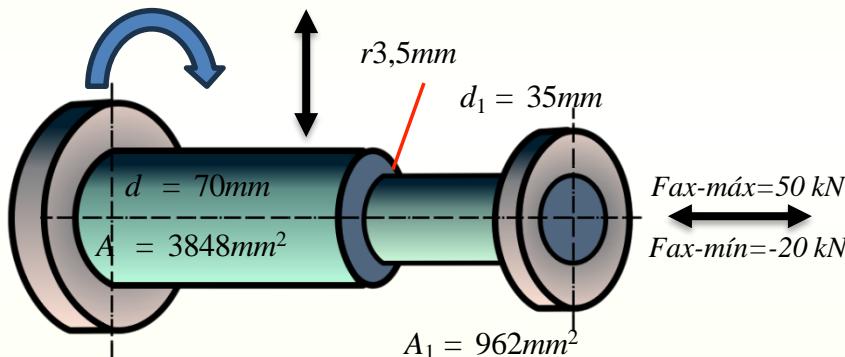


Ejemplo 4

$M_t = 600 \text{ N.m}$

$F_f\text{-máx} = 7 \text{ kN}$

$F_f\text{-mín} = -7 \text{ kN}$



Ejemplo 4

Cálculo de los esfuerzos simples

Tensiones PARA TRACCION y COMPRESION en una barra cilíndrica:

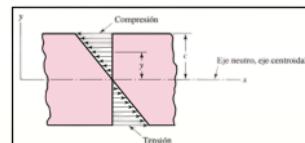
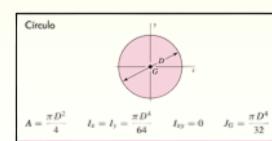
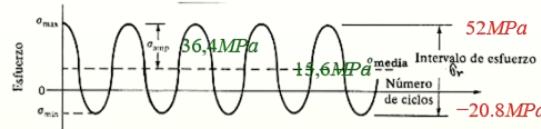
AXIAL

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad A = \frac{\pi * d^2}{4} \quad A_1 = \frac{\pi * (35mm)^2}{4} \quad A_1 = 962mm^2$$

$$\sigma_{ax\text{-}max} = \frac{F_{ax\text{-}max}}{A_1} = \frac{50000N}{962mm^2} = 52MPa$$

$$\sigma_{ax\text{-}m} = \frac{52MPa + (-20,8MPa)}{2} = 15,6MPa$$

$$\sigma_{ax\text{-}min} = \frac{F_{ax\text{-}min}}{A_1} = \frac{-20000N}{962mm^2} = -20,8MPa$$



Tensiones normales PARA FLEXION en una barra cilíndrica:

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_F}{I_{xx}} * c$$

$$I_{xx} = \frac{\pi * d^4}{64}$$

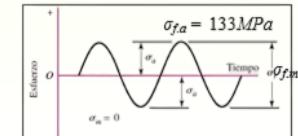
$$I_{xx} = \frac{\pi * (35mm)^4}{64} = 73661mm^4$$

$$d_1 = 35mm \quad c = d_1/2 = 35mm/2 = 17,5mm$$

$$\sigma_{f\text{-}max} = \frac{560000Nmm}{73661mm^4} * 17,5mm = 133MPa$$

$$\sigma_{f\text{-}min} = \frac{-560000Nmm}{73661mm^4} * 17,5mm = -133MPa$$

FLEXION



$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{f\text{-}a} = 133MPa$$

$$\sigma_{f\text{-}m} = 0MPa$$

1- Calculo del límite de resistencia a la fatiga del material (probeta) (Ec. 4-1)

2-Determinación de los factores que modifican la resistencia a la fatiga de un elemento de maquina.

4-Cálculo del esfuerzo medio y esfuerzo fluctuante para cargas simples (Ec. 5-1 y 5-2)

5-Cálculo de los factores de concentración de tensiones (Ec. 5-3 y 5-4)

3- Resistencia a la fatiga del elemento de maquina (S_e) (Ec. 4-8)

6- Esfuerzos fluctuantes de fatiga aplicados al elemento de maquina. (σ'_a, σ'_m) (Ec. 5-5 y 5-6)

7- Verificación a la Fatiga para piezas sometidas a esfuerzos fluctuantes, de acuerdo a varios criterios de falla (cálculo del factor de seguridad) (Tabla 4)

Tensiones normales PARA TORSION en una barra cilíndrica:

$$\tau = \frac{M_T}{J} * c$$

$$J = \frac{\pi * d^4}{32} \quad J = \frac{\pi * (35mm)^4}{32} = 147323mm^4$$

$$d_1 = 35mm \quad c = d_1/2 = 35mm/2 = 17,5mm$$

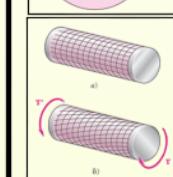
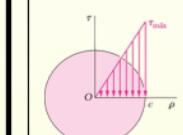
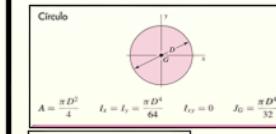
$$\tau_{max} = \frac{600000Nmm}{147323mm^4} * 17,5mm = 71,3MPa$$

$$\tau_{min} = \frac{600000Nmm}{147323mm^4} * 17,5mm = 71,3MPa$$

$$\tau_a = 71,3MPa$$

$$\tau_m = 0MPa$$

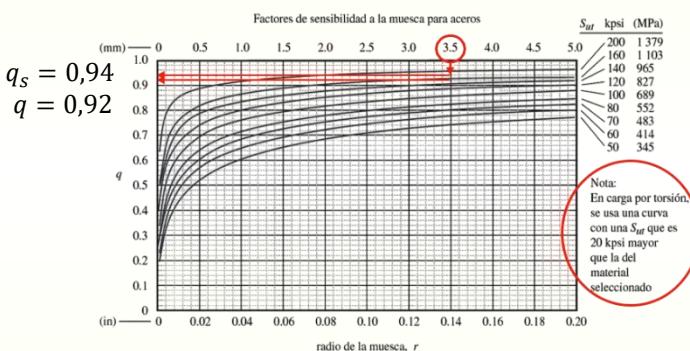
TORSION



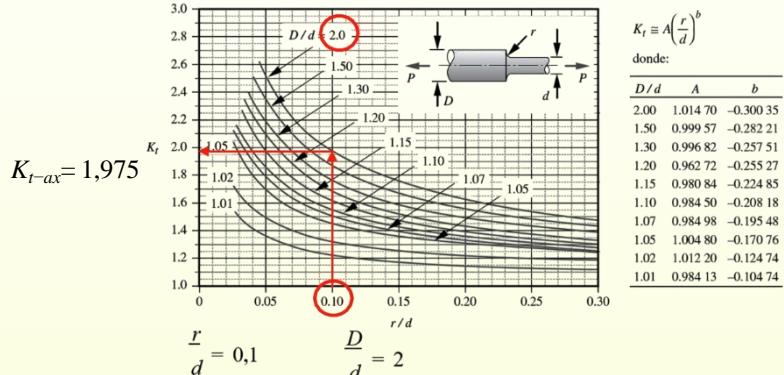
Ejemplo 4

Selección de los factores de concentración de tensiones

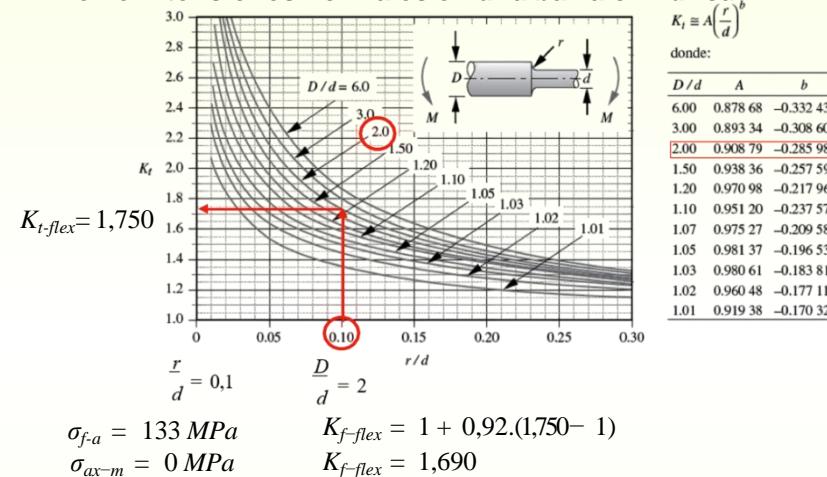
AISI númer.	Tratamiento	Temperatura, °C (°F)	Resistencia a la tensión MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación, %	Reducción del área, %	Dureza Brinell
4130	TyR*	205 [400]	1 630 [236]	1 460 [212]	10	41	467



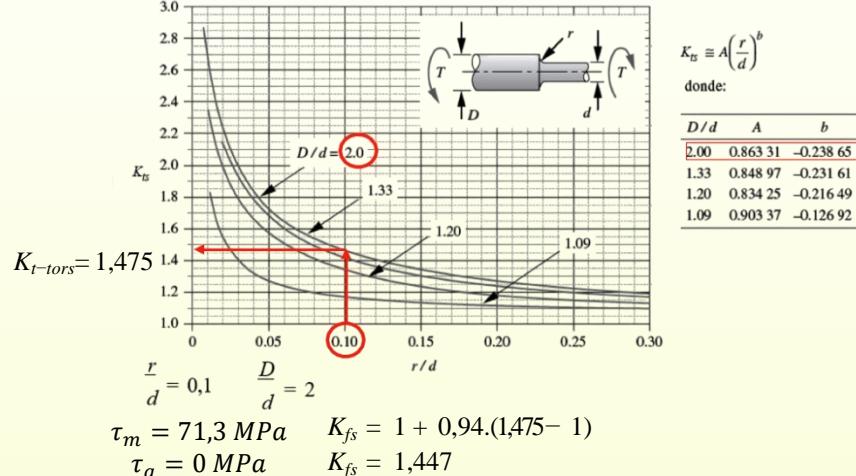
• Axial: tensiones de tracción y compresión en una barra cilíndrica.



• Flexión: tensiones normales en una barra cilíndrica



• Torsión: tensiones de corte en una barra cilíndrica.



Ejemplo 4

Cálculo de los esfuerzos combinados

$$\sigma'_m = \sqrt{[(K_{f-flex} \times \sigma'_{f-m}) + (K_{f-ax} \times \sigma'_{ax-m})]^2 + 3 \times (K_{fs} \times \tau'_m)}$$

$$\sigma'_m = 181,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{[(K_{f-flex} \times \sigma'_{f-a}) + (K_{f-ax} \times \sigma'_{ax-a})]^2 + 3 \times (K_{fs} \times \tau'_a)}$$

$$\sigma'_a = 306 \text{ MPa}$$

Resistencia a la fatiga para el elemento de máquina

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e$$

k_a : factor de modificación de la condición superficial

k_b : factor de modificación del tamaño

k_c : factor de modificación de la carga

$k_c = 1$

k_d : factor de modificación de la temperatura

$k_d = 1$

k_e : factor de confiabilidad

k_f : factor de efectos diversos

$k_f = 1$

S'_e : tensión límite de fatiga de la probeta

S_e : tensión límite de fatiga de la pieza o elemento de máquina

Factor de superficie $K_a = a \times (S_{ut})^b$

Terminación Superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} en ksi	S_{ut} en MPa	
Rectificado	1,34	1,58	-0,085
Mecanizado o laminado en frío	2,70	4,51	-0,265
Laminado en caliente	14,4	57,7	-0,718
Forjado (en bruto)	39,9	272	-0,995

$$K_a = 1,58 \times (1030)^{-0,085} = 0,876$$

Factor de tamaño

$$k_b = \begin{cases} (d/0,3)^{-0,107} = 0,879d^{-0,107} & 0,11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0,91d^{-0,157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7,62)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51d^{-0,157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

$$K_b = 1,51 \times (70)^{-0,157} = 0,775$$

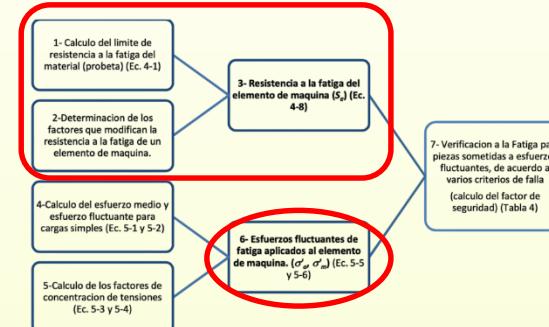
Factor de confiabilidad

Confiabilidad %	Factor de Confiabilidad k_e
50	1
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659
99,9999	0,62

$$K_e = 0,897$$

$$S'_e = S_{ut} \times 0,5 = 1030 \text{ MPa} \times 0,5 = 515 \text{ MPa}$$

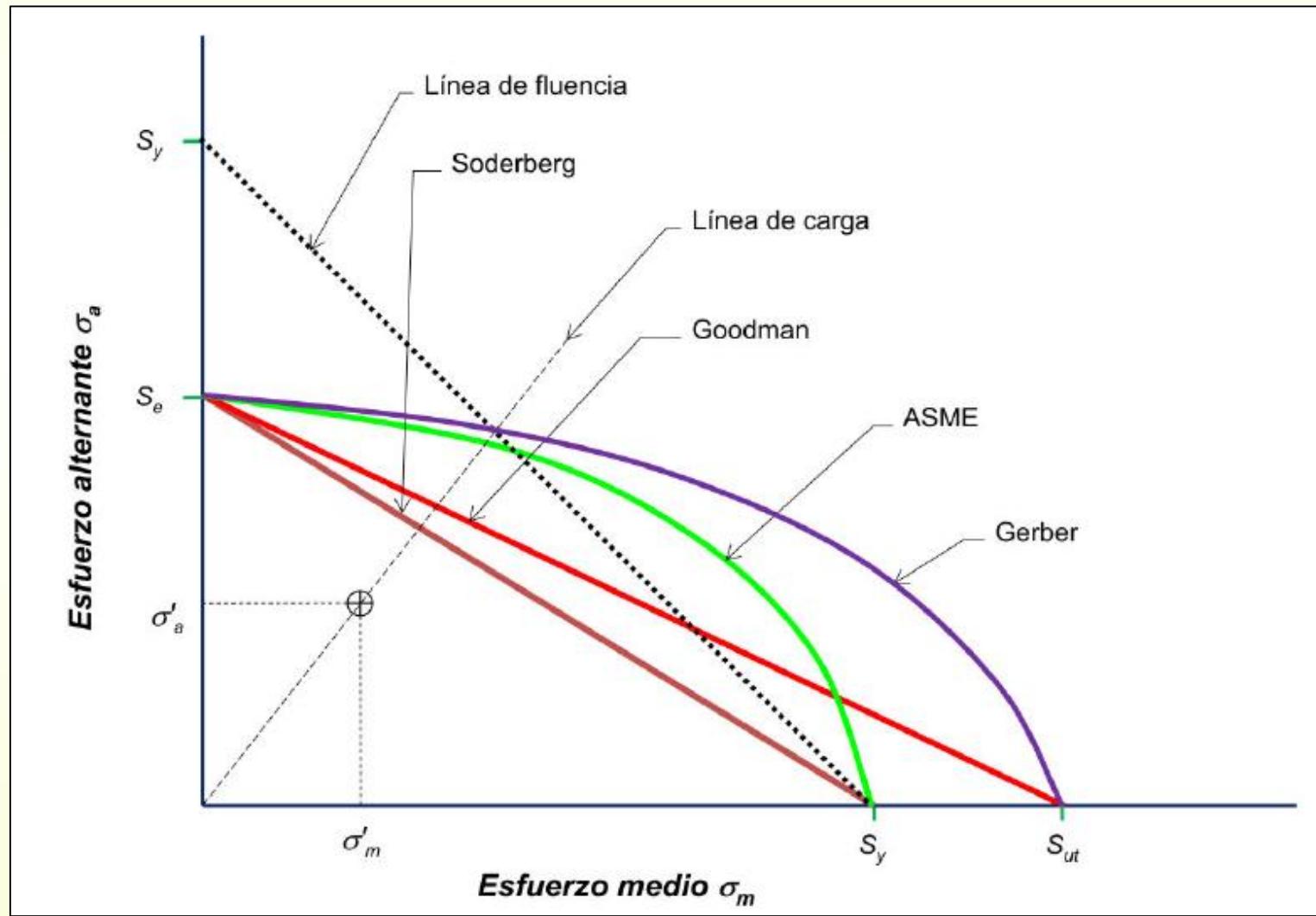
$$S_e = S'_e K_a K_b K_e = 515 \text{ MPa} \times 0,876 \times 0,775 \times 0,897 = 314 \text{ MPa}$$



CRITERIOS PARA VERIFICACIÓN Y CÁLCULO DE COEFICIENTE DE SEGURIDAD

<i>Criterio</i>	<i>Ec. de la recta</i>	<i>Factor de seguridad</i>	<i>Para graficar</i>
Soderberg	$\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_y} = \frac{1}{n_{so}}$	$n_{so} = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_y}}$	$\sigma'_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma'_m}{S_y} \right)$
Goodman	$\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n_{go}}$	$n_{go} = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}}$	$\sigma'_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \right)$
ASME Eliptica	$\left(\frac{n_{as} \cdot \sigma'_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{n_{as} \cdot \sigma'_m}{S_y} \right)^2 = 1$	$n_{as} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma'_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{\sigma'_m}{S_y} \right)^2}}$	$\sigma'_a = S_e \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma'_m}{S_y} \right)^2}$
Gerber	$\frac{n_{ge} \cdot \sigma'_a}{S_e} + \left(\frac{n_{ge} \cdot \sigma'_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1$	$n_{ge} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{S_{ut}}{\sigma'_m} \right)^2 \cdot \frac{\sigma'_a}{S_e} \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \sigma'_m \cdot S_e}{S_{ut} \cdot \sigma'_a} \right)^2} \right]$	$\sigma'_a = S_e \left(1 - \left(\frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \right)^2 \right)$
Fluencia	$\sigma'_a + \sigma'_m = \frac{S_y}{n_{fl}}$	$n_{fl} = \frac{S_y}{\sigma'_a + \sigma'_m}$	$\sigma'_a = S_y - \sigma'_m$

CRITERIOS PARA VERIFICACIÓN Y CÁLCULO DE COEFICIENTE DE SEGURIDAD



Ejemplo 4

Cálculo de los coeficientes de seguridad

Datos para el cálculo y trazado de curvas:

$$\sigma'_m = 181,1 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 1030 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_a = 306 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 515 \text{ MPa}$$

$$S_y = 910 \text{ MPa}$$

$$S_e = 314 \text{ MPa}$$

Soderberg:

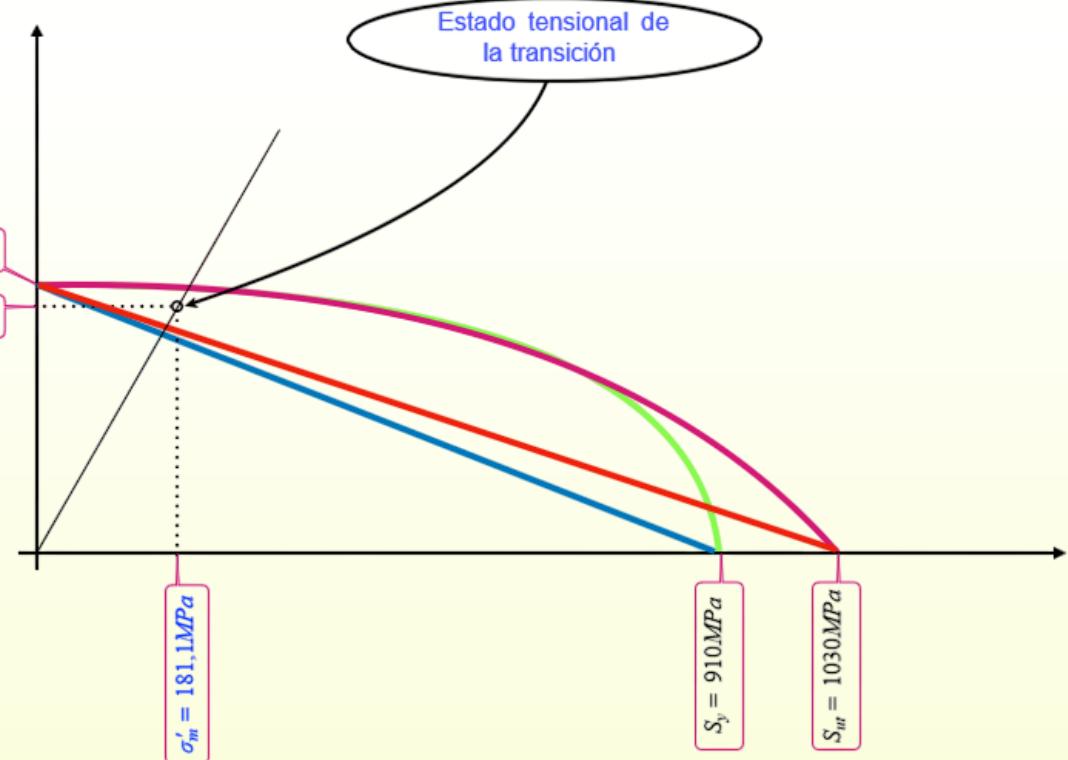
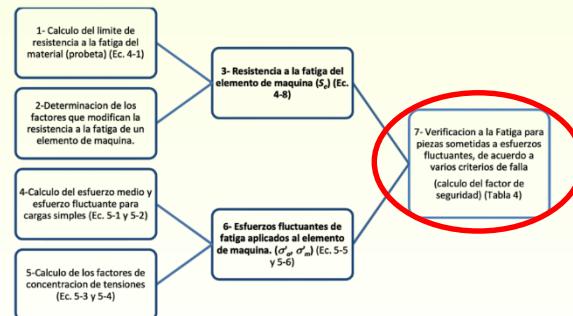
$$n_{so} = \frac{1}{\frac{306 \text{ MPa}}{314 \text{ MPa}} + \frac{181,1 \text{ MPa}}{910 \text{ MPa}}} = 0,852 \quad \text{No verifica}$$

Goodman:

$$n_{go} = \frac{1}{\frac{306 \text{ MPa}}{314 \text{ MPa}} + \frac{181,1 \text{ MPa}}{1030 \text{ MPa}}} = 0,869 \quad \text{No verifica}$$

ASME

$$n_{as} = \sqrt{\left(\frac{1}{\left(\frac{306 \text{ MPa}}{314 \text{ MPa}}\right)^2} + \left(\frac{181,1 \text{ MPa}}{910 \text{ MPa}}\right)^2\right)} = 1,005 \quad \text{Verifica}$$



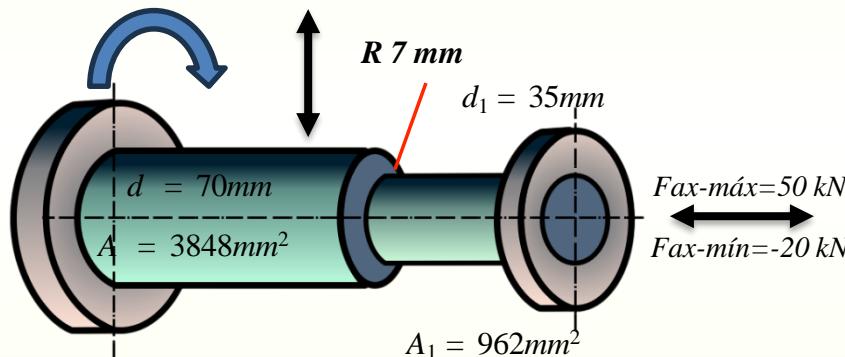
Ejemplo 4

Adoptamos un radio de acuerdo de 7 mm para disminuir la concentración de tensiones.

$$Ff\text{-máx}=7 \text{ kN}$$

$$Mt=600 \text{ N.m}$$

$$Ff\text{-mín}=-7 \text{ kN}$$



Pasos a seguir:

1. Selección de los factores de concentración de tensiones.
2. Cálculo de los esfuerzos combinados.
3. Resistencia a la fatiga para el elemento de máquina “Se”
4. Cálculo de los coeficientes de seguridad
5. Graficar curvas.

Ejemplo 5

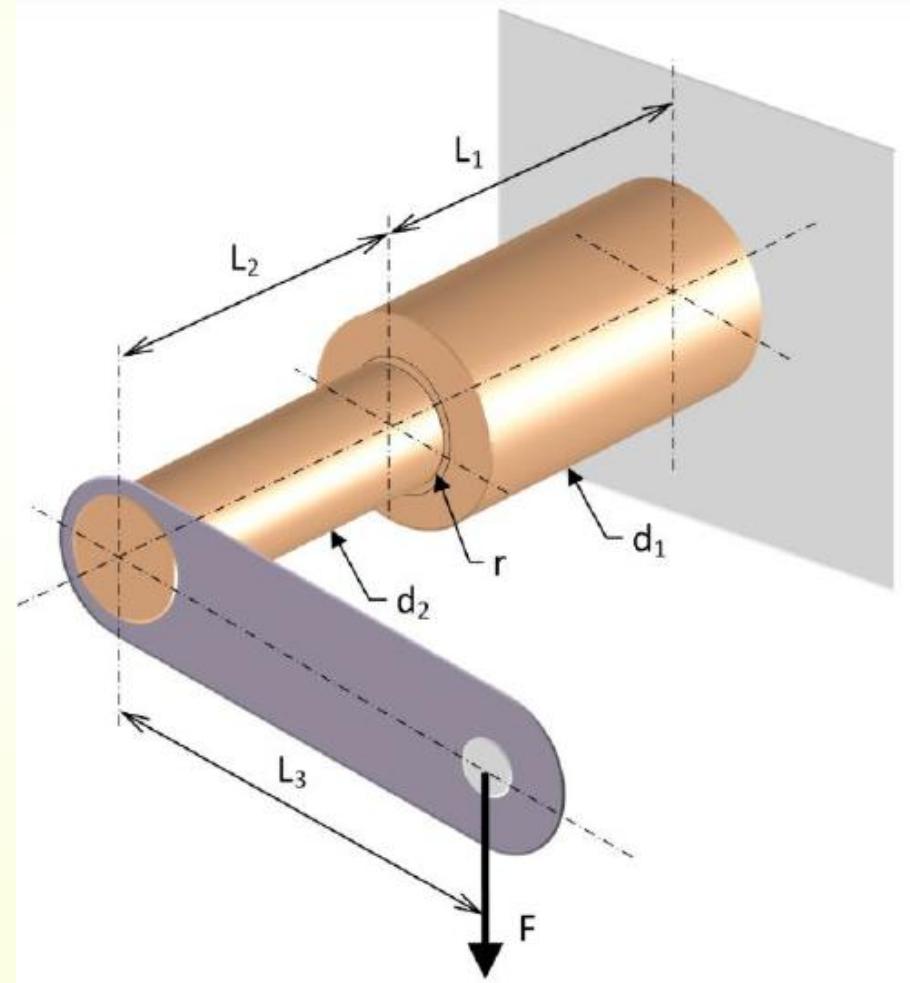
Texto informativo

Se requiere verificar la transición de la ménsula montada en voladizo, entre la zona de la parte cilíndrica de diámetro 1 y la zona cilíndrica de diámetro 2. La pieza tiene las siguientes características:

$$d_1 = 53 \text{ mm} \quad d_2 = 40 \text{ mm} \quad L_1 = 100 \text{ mm} \quad L_2 = 320 \text{ mm} \quad L_3 = 200 \text{ mm} \quad r = 5 \text{ mm}$$

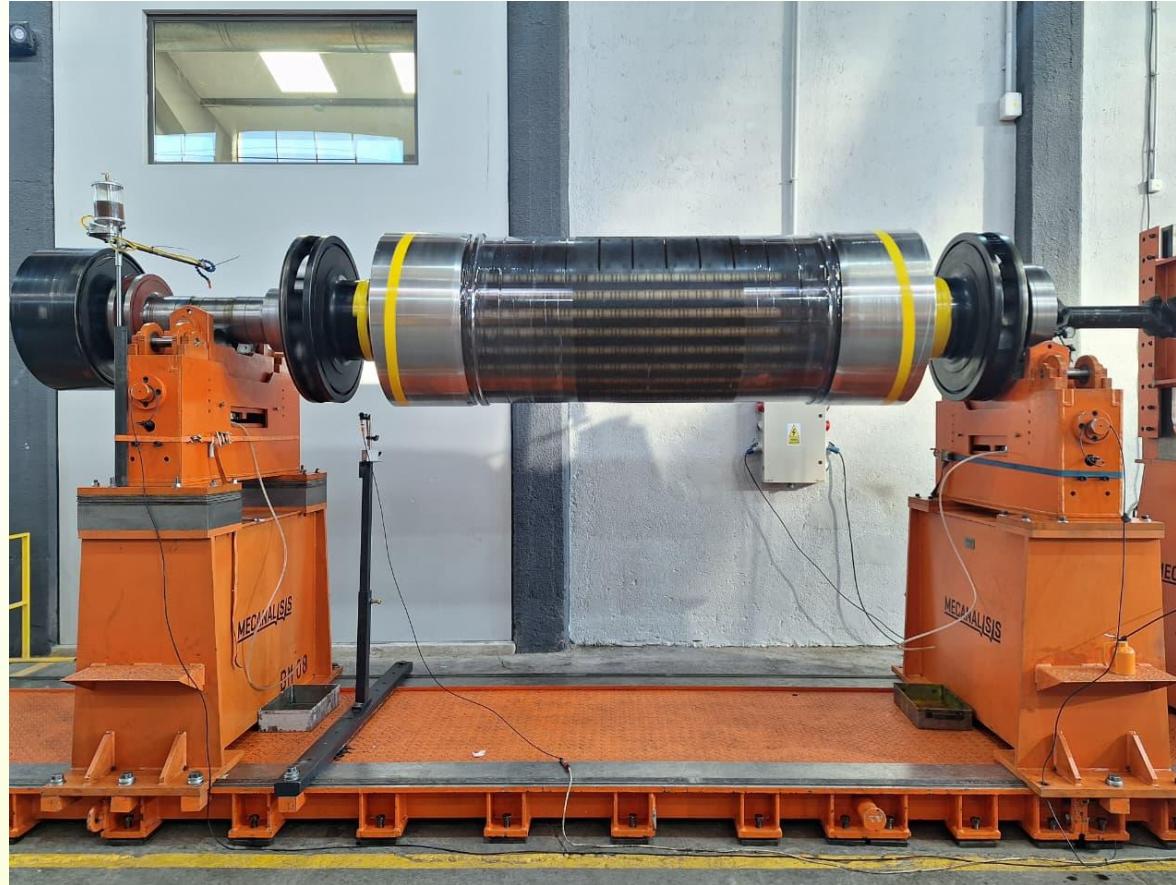
F = Fuerza variable aplicada en el extremo de la ménsula: $F_{\max} = 3500 \text{ N}$ $F_{\min} = -600 \text{ N}$

Material de la pieza cilíndrica: SAE 4140 TyR a 540°C , "mecanizado", probabilidad 99,9%



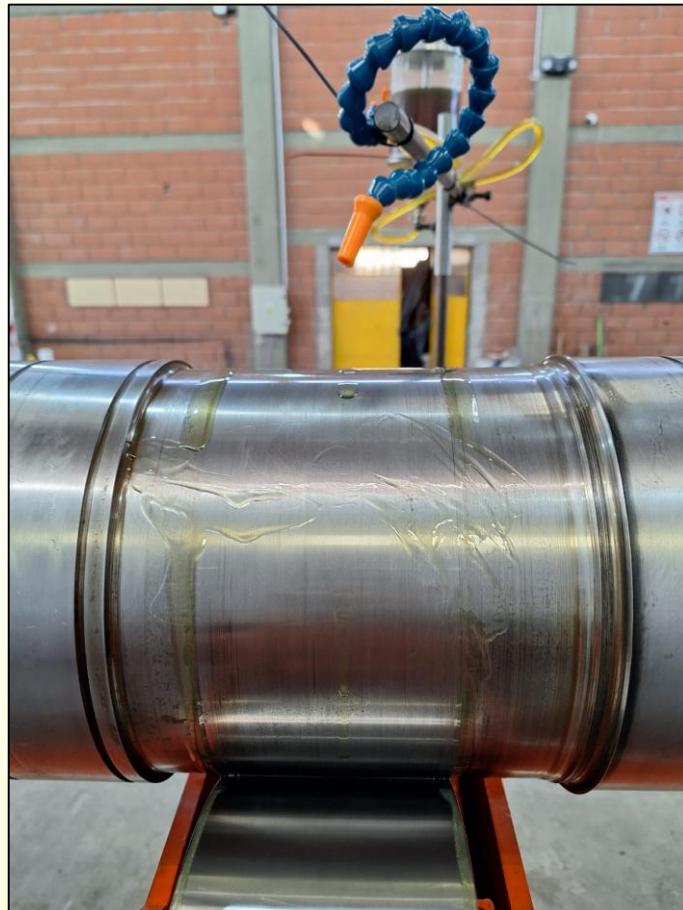
Rotor de generador

Daño en zona de “muñon” del rotor, donde trabaja el cojinete debido a desplazamiento axial proveniente por el derribo del cojinete axial de la turbina.



Rotor de generador

Daño en zona de “muñon” del rotor, donde trabaja el cojinete debido a desplazamiento axial proveniente por el derribo del cojinete axial de la turbina.



Rotor de generador

Daño en zona de “muñon” del rotor, donde trabaja el cojinete debido a desplazamiento axial proveniente por el derribo del cojinete axial de la turbina.

