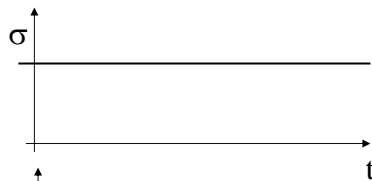
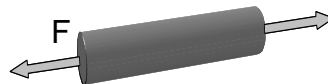
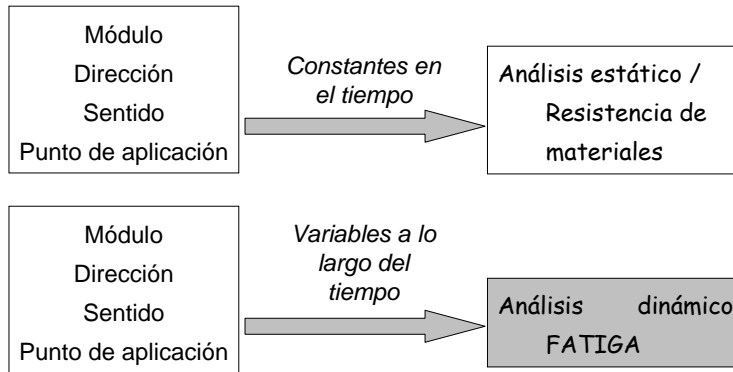
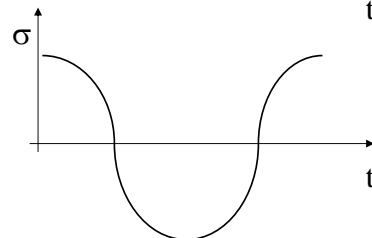


TIPOS DE ESTUDIOS



Falla
 F constante $\rightarrow \sigma_{\max} = S_y$

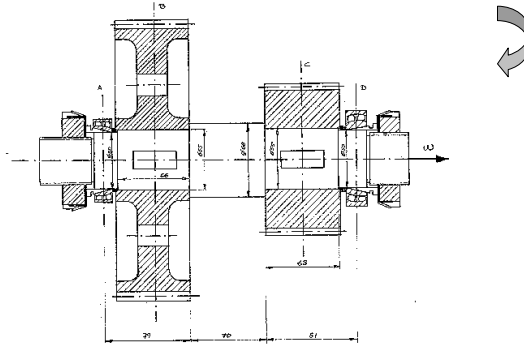


F variable $\rightarrow \sigma_{\max} \ll S_y$



CARACTERÍSTICAS DE LA ROTURA POR FATIGA

- Origen** →
- Defecto del material
 - Punto de concentración de tensiones



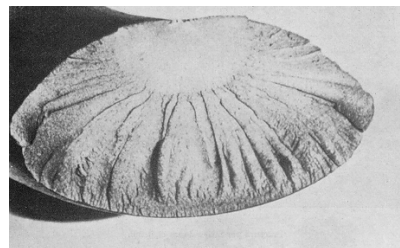
ASPECTO DE UNA ROTURA POR FATIGA

- Información** →
- Condiciones de trabajo del elemento
 - Forma de rotura del elemento

Eje de transmisión



Muelle

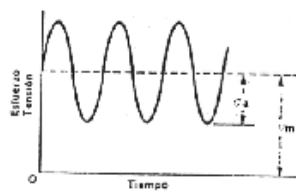


CARACTERÍSTICAS DE LA ROTURA POR FATIGA

- Rotura repentina sin deformación
- Límite muy por debajo del límite de fluencia

MÉTODOS DE DETECCIÓN DE MICROGRIETAS

- Líquidos penetrantes
- Isótopos radioactivos
- Ultrasonidos
- Propiedades magnéticas de los elementos
- Otros métodos

**CARGAS VARIABLES. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS**

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

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

σ_{min} = tensión mínima.

σ_{max} = tensión máxima.

σ_a = amplitud de la tensión. Tensión alternante.

σ_m = tensión media



TIPOS DE CARGAS VARIABLES

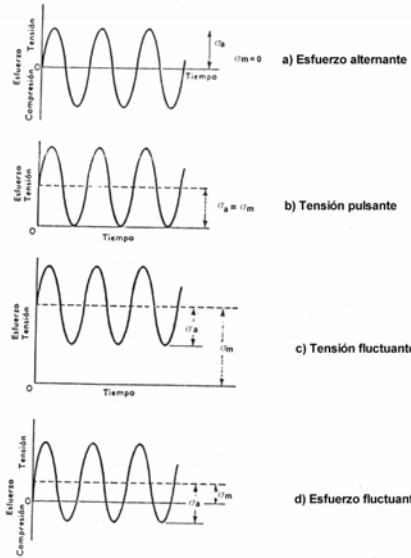


DIAGRAMA DE FATIGA (S - N)

- Rotura del elemento para tensiones máximas muy por debajo de la resistencia última o de fluencia

¿Cuál es la resistencia real del elemento sometido a cargas variables?

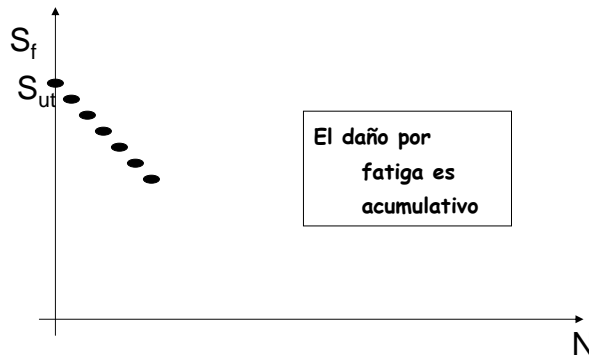


ENSAYO DE VIGA ROTATORIA

- Probeta que gira con carga constante de flexión (Tensiones alternantes)
- Relación entre carga límite y número de ciclos

DIAGRAMA DE FATIGA (S - N)



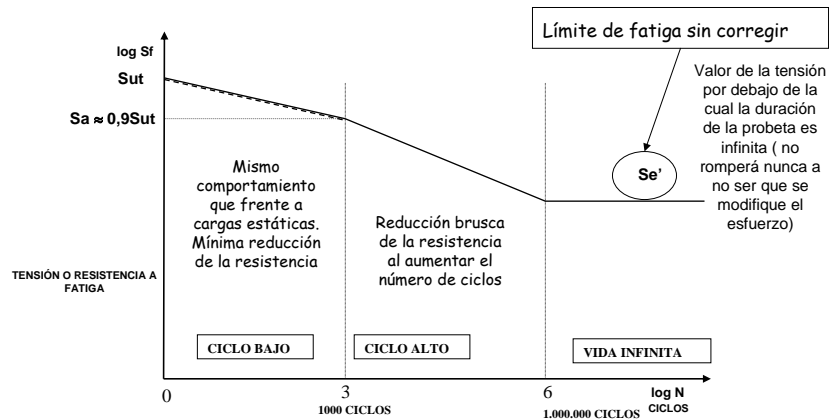


1. Esfuerzo de flexión que origine una tensión igual a la resistencia última del material
2. Se disminuye el esfuerzo y se apunta N del fallo
3. Se repite el proceso al menos 8 veces

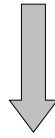
DIAGRAMA DE FATIGA (S - N)



DIAGRAMA DE FATIGA (S - N) PARA MATERIALES FÉRREOS (ENSAYO DE VIGA ROTATORIA)



Límite de resistencia a fatiga sin corregir (S_e')



FUNCIÓN DE

Tipo de material
Número de ciclos transcurridos

El daño por fatiga es acumulativo



¿Cómo se obtiene el valor de S_e' ?

⇒ Bibliografía, Ensayos anteriores, etc.

⇒ Aproximaciones:

Hierros y aceros forjados.

$$S_e' = 0.5 S_{ut}$$

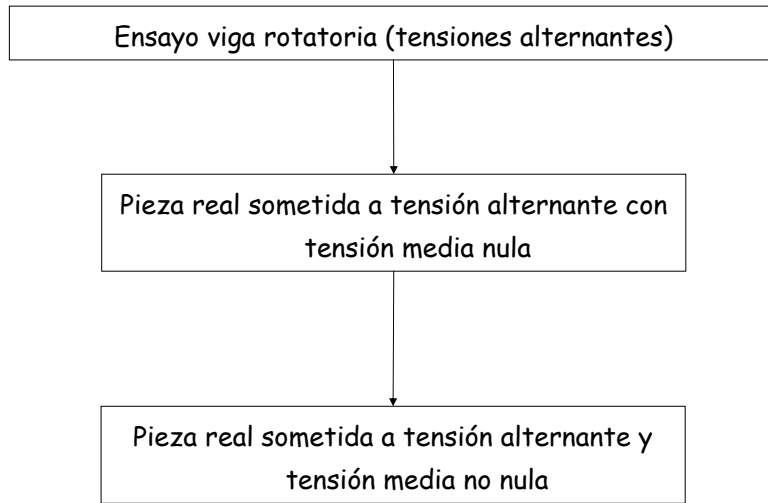
$$S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$$

$$S_e' = 700 \text{ MPa}$$

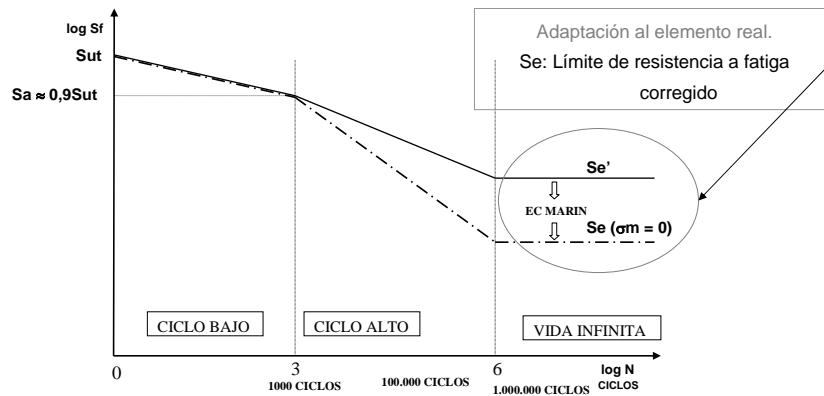
$$S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa}$$

Aceros colados.





Pieza real sometida a tensión alternante con tensión media nula



ECUACIÓN DE MARIN. FACTORES MODIFICATIVOS DEL LÍMITE DE FATIGA

$$S_e = \prod_i K_i \cdot S_e'$$

Coeficientes de Marin (*Obtenidos experimentalmente*)

- Ka:** Factor de acabado superficial
- Kb:** Factor de tamaño
- Kc:** Factor de confiabilidad
- Kd:** Factor de temperatura
- Ke:** Factor de concentración de tensiones
- Kf:** Factor de efectos diversos



Ka: FACTOR DE ACABADO SUPERFICIAL

- Ensayo de viga rotatoria



Probeta pulida con pulimento fino en dirección axial

- Pieza real



Peor acabado superficial $\Rightarrow \downarrow S_e$

Mayor rugosidad en la superficie que produce un fenómeno de concentración de tensiones



Ka: FACTOR DE ACABADO SUPERFICIAL

- Ka es función de**
- Calidad del acabado superficial
 - Resistencia última del material ($\uparrow S_u \Rightarrow \downarrow S_e$)

$$K_a = a \cdot S_{ut}^b$$

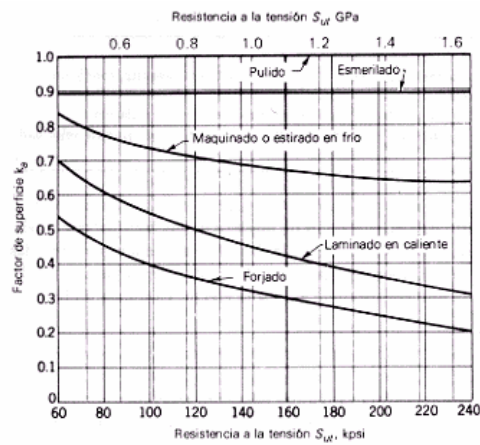
iiiSut en MPa !!!

Acabado superficial	Coficiente a (MPa)	Exponente b
Pulido	1	0
Acabado fino (esmerilado, rectificado,)	1.58	-0.085
Mecanizado sin acabar/estirado en frío	4.51	-0.265
Laminado en caliente	57.7	-0.718
Forjado	272	-0.995



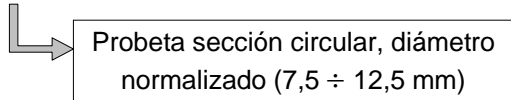
Ka: FACTOR DE ACABADO SUPERFICIAL

Ka para el ACERO



K_b: FACTOR DE TAMAÑO

- Ensayo de viga rotatoria



- Pieza real



Flexión / Torsión

$$K_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133} \quad 2.79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$$

$$K_b = 1.189 \cdot d^{-0.097} \quad 52 \leq d \text{ (mm)} \leq 250$$

Carga axial

$$K_b = 1$$



K_b: FACTOR DE TAMAÑO

- Pieza real



Mismas ecuaciones
d = d_e (Diámetro efectivo)

"Diámetro de una probeta de sección circular sometida a flexión rotatoria, que tenga un área de 95% del esfuerzo igual al área de 95% del esfuerzo de la sección considerada"



Kb: FACTOR DE TAMAÑO

SECCIÓN NO CIRCULAR (Ejemplo: Sección rectangular)

"Diámetro de una probeta de sección circular sometida a flexión rotatoria, que tenga un área de 95% del esfuerzo igual al área de 95% del esfuerzo de la sección considerada"

- *Sección de viga rotatoria*

$$A_{0,95} = \frac{\pi}{4} [d^2 - (0,95 \cdot d)^2] = 0,0766 \cdot d^2 \quad (I)$$



- *Sección rectangular h x b*

$$A_{0,95} = 0,05 \cdot h \cdot b \quad (II)$$



$$(I) = (II) \implies d_e = 0,808 \cdot (h \cdot b)^{1/2}$$



Kc: FACTOR DE CONFIABILIDAD

Datos según una distribución normal

Confiabilidad	Factor de confiabilidad K_c
0.5	1
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659
0.999999	0.620
0.9999999	0.584
0.99999999	0.551
0.999999999	0.520



K_d: FACTOR DE TEMPERATURA

- ✓ La temperatura modifica las propiedades mecánicas de los materiales
- ✓ Algunos materiales a altas temperaturas no tienen límite de fatiga (aleaciones de aluminio)

$$K_d = 1$$

$$T \leq 450 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$K_d = 1 - 5.8 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 450)$$

$$450 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 550 \text{ } ^\circ\text{C}$$



K_e: FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

- Agujeros
- Ranuras
- Chavetas ←
- Muecas
- Discontinuidades
- Otros

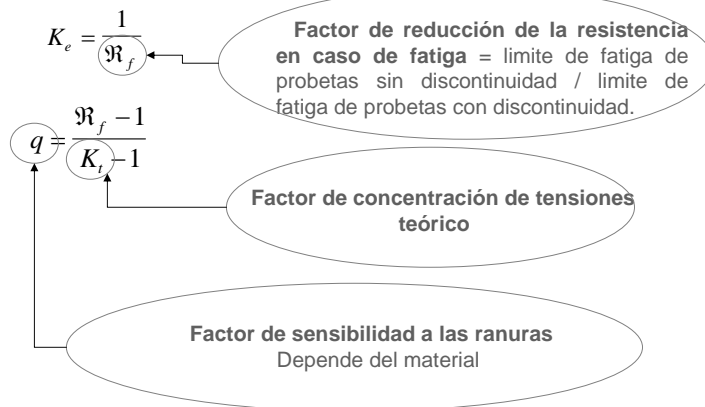
Concentración de tensiones

- ✓ **Materiales dúctiles: Estudios de fatiga**
- ✓ **Materiales frágiles: Fatiga y estudios estáticos**



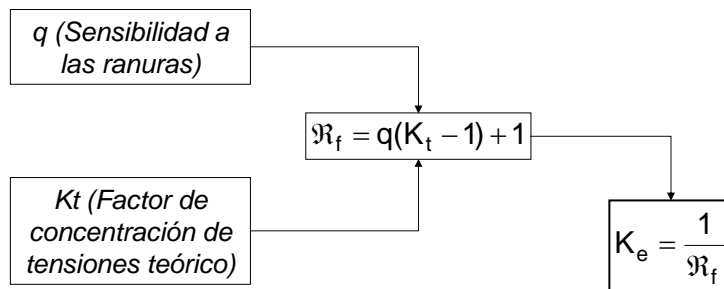
Ke: FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

Cálculo de Ke

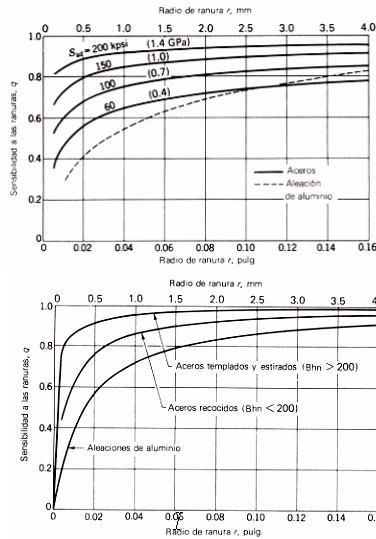


Ke: FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

Cálculo de Ke



q (Factor de sensibilidad a las ranuras)

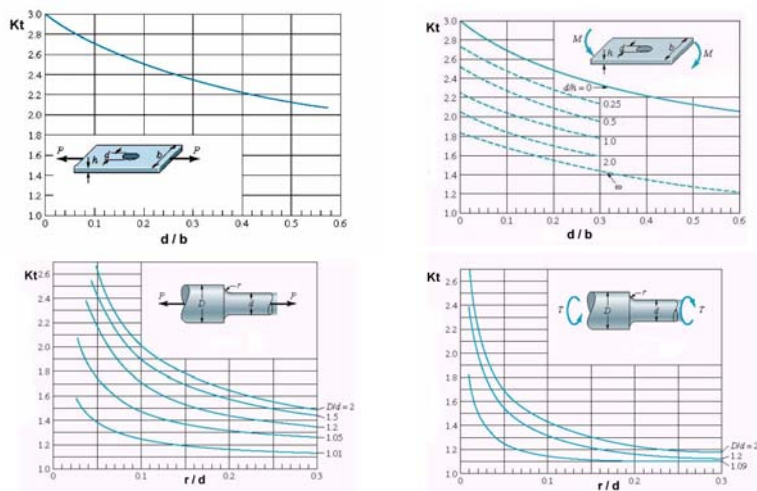


Sensibilidad a las ranuras. Cargas de **flexión y axiales alternantes**.
 Para radios de ranura mayores usar valores de q correspondientes a $r = 4$ mm.

Sensibilidad a las ranuras. Cargas de **torsión alternantes**.
 Para radios de ranura mayores usar valores de q correspondientes a $r = 4$ mm.



Kt (Factor de concentración de tensiones teórico)



Kf: FACTOR DE EFECTOS DIVERSOS

Datos experimentales. Los efectos más frecuentes:

1. **Efectos residuales o remanentes**

Operaciones de manipulación (arena, martillado, etc)

↑ Esfuerzos de compresión en la superficie ⇒ ↑ S_e

2. **Características direccionales operacionales**

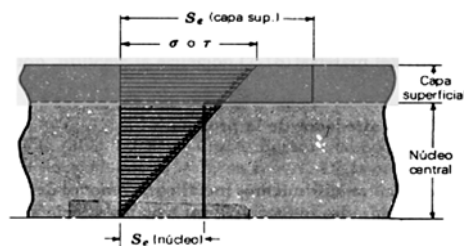
Estirado, laminación, forja ⇒

Se transversal 10% menor que *Se longitudinal*



Kf: FACTOR DE EFECTOS DIVERSOS

3. **Temple superficial**



4. **Efectos de corrosión**

La corrosión disminuye S_e (Concentración de esfuerzos)



Kf: FACTOR DE EFECTOS DIVERSOS

5. Recubrimiento electrolítico

En general disminuyen S_e (cromado, niquelado, etc.)

6. Corrosión por apriete (fretage)

Movimiento microscópico en la superficie de piezas mecánicas ó estructuras estrechamente ajustadas (juntas atornilladas, cojinetes, etc...).

Cambio de color en la superficie, picadura y, eventualmente, fatiga.



Efecto del esfuerzo medio en la resistencia a la fatiga. Tensiones fluctuantes

$$\sigma_a \neq 0 \quad \sigma_m \neq 0$$

$\sigma_m > 0$ \longrightarrow Disminución de la resistencia a fatiga (S_e)
(Tracción)

$\sigma_m < 0$ \longrightarrow Se prácticamente no varía
(Compresión)



Efecto del esfuerzo medio en la resistencia a la fatiga.
Tensiones fluctuantes

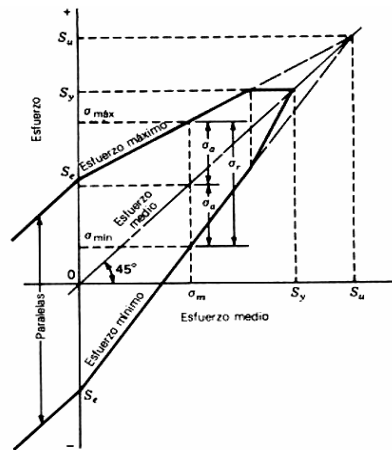


Diagrama de Goodman

Un gráfico diferente para cada N ciclos



Efecto del esfuerzo medio en la resistencia a la fatiga.
Tensiones fluctuantes

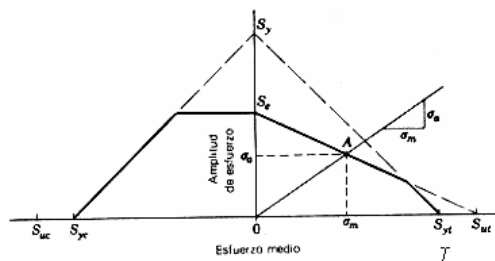


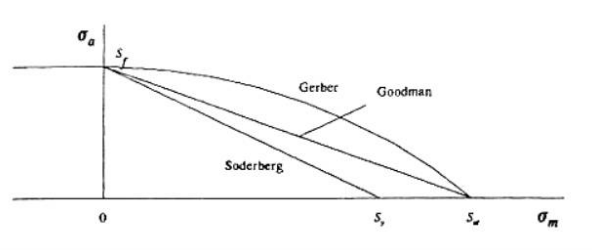
Diagrama de Goodman modificado

Un gráfico diferente para cada N ciclos



Criterios de fallo para Tensiones Fluctuantes

Un gráfico diferente para cada N ciclos



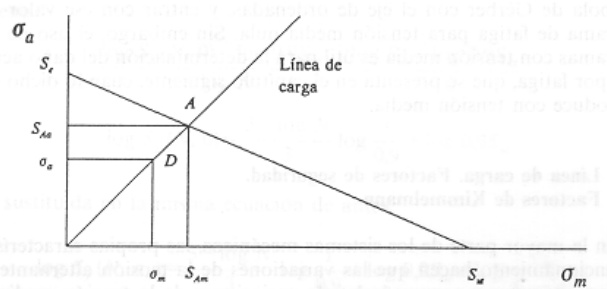
$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = 1 \leftarrow \text{Goodman}$$

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{S_{yt}} = 1 \leftarrow \text{Soderberg} \quad (n = 1)$$

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \leftarrow \text{Gerber}$$



Línea de carga



$$S_{Aa} = n \cdot \sigma_a$$

$$S_{Am} = n \cdot \sigma_m$$



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



Límite de fatiga para Tensiones Fluctuantes. Duración

Elemento sometido a estado tensional σ_m y σ_a .

Se y S_u conocidos.

ANALÍTICAMENTE

(Goodman)

GRÁFICAMENTE

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



$$S_f = \frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m} \cdot \sigma_a$$

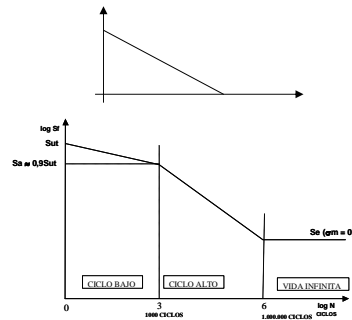
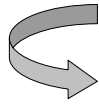
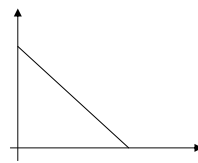


Diagrama representativo de N en función de σ_a , dada una σ_m

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



$$\frac{S_f(N, \sigma_m)}{S_f(N, \sigma_m = 0)} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = 1 \implies \frac{S_f(N, \sigma_m)}{S_f(N, \sigma_m = 0)} = 1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{S_{ut} - \sigma_m}{S_{ut}}$$

$$\log S_f(N, \sigma_m) - \log S_f(N, \sigma_m = 0) = \log \frac{S_{ut} - \sigma_m}{S_{ut}}$$



$$\log S_f(N, \sigma_m) = \log S_f(N, \sigma_m = 0) - \log \frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m}$$



Diagrama representativo de N en función de σ_a , dada una σ_m

$$\log S_f(N, \sigma_m) = \log S_f(N, \sigma_m = 0) - \log \frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m}$$

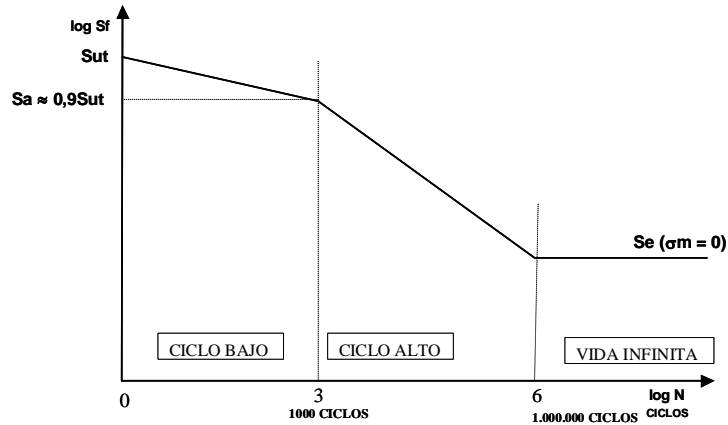
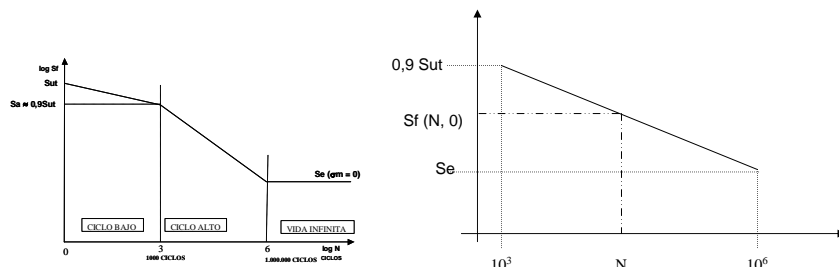


Diagrama representativo de N en función de σ_a , dada una σ_m

$$\log S_f(N, \sigma_m) = \log S_f(N, \sigma_m = 0) - \log \frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m}$$

Ciclo Alto

Ecuación de la recta para tensión media nula



$$\frac{\log(0,9 \cdot S_{ut}) - \log S_e}{6 - 3} = \frac{\log S_f(N, 0) - \log S_e}{6 - n} \implies \log S_f(N, 0) = \frac{6 - n}{6 - 3} [\log(0,9 S_{ut}) - \log S_e] + \log S_e$$



Diagrama representativo de N en función de σ_a , dada una σ_m

$$\log S_f(N, \sigma_m) = \log S_f(N, \sigma_m = 0) - \log \frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m}$$

$$\log S_f(N, 0) = \frac{6-n}{6-3} [\log(0,9S_{ut}) - \log S_e] + \log S_e$$

$$\log S_f(N, \sigma_m) = \frac{6-n}{6-3} [\log(0,9S_{ut}) - \log S_e] + \log S_e - \log \frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m}$$

N = 1000 ciclos

$$\log S_f(10^3, \sigma_m) = \log 0,9(S_{ut} - \sigma_m)$$

N = 1000000 ciclos

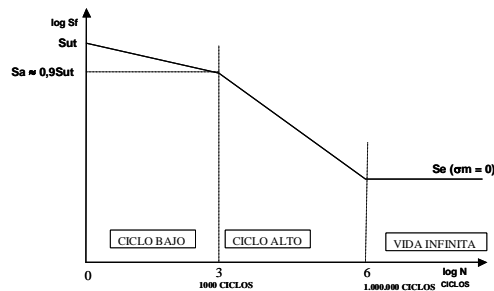
$$\log S_f(10^6, \sigma_m) = \log \frac{S_{ut} - \sigma_m}{S_{ut}} \cdot S_e$$



Diagrama representativo de N en función de σ_a , dada una σ_m

$$\log S_f(N, \sigma_m) = \log S_f(N, \sigma_m = 0) - \log \frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m}$$

Ciclo Bajo
N = 0 ciclos



$$\log S_f(N = 0, \sigma_m) = \log S_{ut} - \log \frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m}$$

$$\log S_f(N = 0, \sigma_m) = \log(S_{ut} - \sigma_m)$$



Diagrama representativo de N en función de σ_a , dada una σ_m

