

FATIGA

Ciencias y tecnología de materiales

Dr. Ing. Mauro Grioni

Facultad de Ingeniería-UNCuyo

"La fatiga es la causa de aproximadamente el 90 % de las fracturas de componentes metálicos"

¿Qué es la Fatiga?

Definición

Rotura bajo esfuerzos dinámicos y fluctuantes

(puentes, aviones, componentes de maquinaria)

- Ocurre a tensiones MUY por debajo del límite elástico
- Proceso progresivo de iniciación y propagación de grietas
- Fractura de naturaleza frágil, incluso en metales dúctiles
- Fallo súbito, sin deformación plástica visible previa

Relevancia Industrial

~90%

de las fracturas en componentes metálicos

Catastrófica · Insidiosa · Sin previo aviso

Polímeros y cerámicos también susceptibles
(aunque en menor grado que metales)

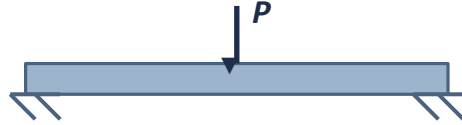
P A R T E 1

Tensiones Cíclicas

Parámetros y tipos de ciclos de carga

Tipos de sollicitaciones cíclicas en Ensayos de Fatiga

Flexión Lateral



Flexión Lateral

Una carga transversal P aplicada sobre una viga genera flexión. La fibra superior se comprime y la inferior se tracciona. Si la carga es cíclica, se producen tensiones alternantes de flexión.

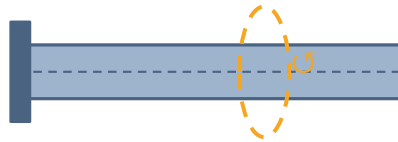
Flexión Rotativa



Flexión Rotativa

Se aplica una carga transversal constante mientras el eje gira. Cada punto de la superficie experimenta ciclos alternados de tracción y compresión en cada revolución. Es el ensayo clásico para determinar curvas S-N.

Torsión



Torsión

Se aplica un par torsor alternante sobre el eje. Se generan tensiones tangenciales τ que varían durante el ciclo. Permite estudiar fatiga por corte.

Tracción-Compresión



Tracción-Compresión

Carga axial alternante (push-pull). El material experimenta ciclos de tracción y compresión en la dirección del eje. Permite estudiar fatiga uniaxial pura.

Parámetros del Ciclo de Tensión

Tensión media

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$$

Ciclo invertido: $R = -1$ | Ciclo pulsante: $R = 0$ | Carga estática: $R = +1$

Intervalo de tensión

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Ciclo invertido: $R = -1$ | Ciclo pulsante: $R = 0$ | Carga estática: $R = +1$

Amplitud de tensión

$$\sigma_a = \sigma_r / 2 = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$$

Ciclo invertido: $R = -1$ | Ciclo pulsante: $R = 0$ | Carga estática: $R = +1$

Relación de tensiones

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

Ciclo invertido: $R = -1$ | Ciclo pulsante: $R = 0$ | Carga estática: $R = +1$

Nota: Para ciclo invertido $R = -1 \rightarrow$ Tracción positiva, Compresión negativa (convenio)

Tipos de Solicitaciones

Solicitaciones	Diagrama	Tensión Media (σ_m)	Amplitud (σ_a)
Pulsatorio entre σ_1 y σ_2		$(\sigma_1 + \sigma_2)/2$	$(\sigma_1 - \sigma_2)/2$
Pulsatorio Intermitente entre 0 y σ_1		$\sigma_1/2$	$\sigma_1/2$
Alternativo asimétrico $\sigma_1 > \sigma_2$		$(\sigma_1 - \sigma_2)/2$	$(\sigma_1 + \sigma_2)/2$
Alternativo simétrico $ \sigma_1 = \sigma_2 $		0	σ_1

Los primeros ensayos

Ensayo de Flexión Rotativa

- Ciclo de tensión invertida ($R = -1$)
- Se varía la tensión máxima entre probetas
- Se registran ciclos hasta rotura N
- Tensiones = $\sigma_{\text{máx}}$ o σ_a vs. $\log(N)$

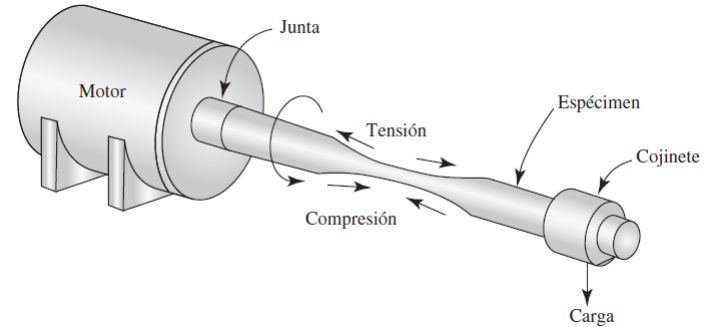
Dos comportamientos distintos:

Con límite de fatiga (aceros, Ti)

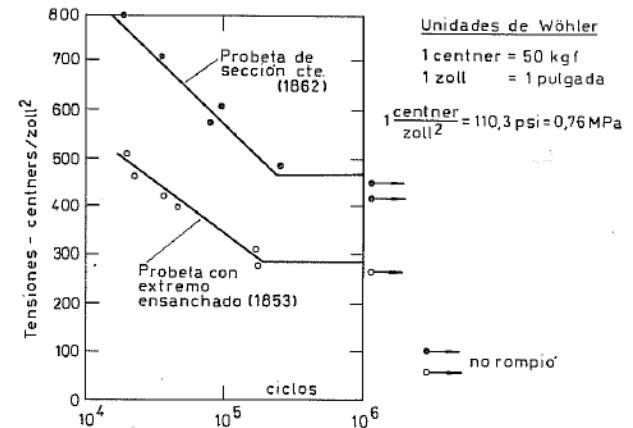
La curva se hace horizontal $\rightarrow$ existe σ que no produce rotura

Sin límite de fatiga (Al, Cu, latón)

Curva continúa descendiendo $\rightarrow$ se usa resistencia a fatiga a N ciclos

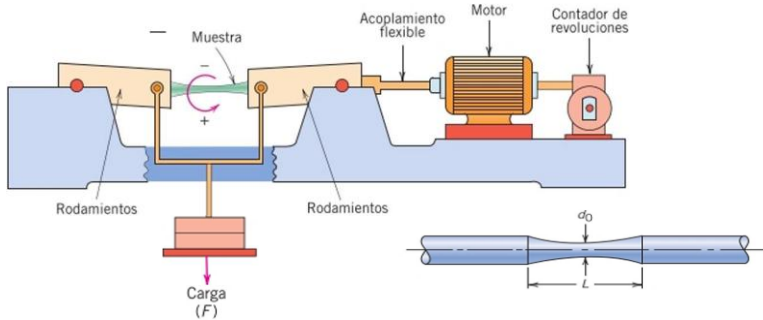


Curvas de Wöhler



La Curva S-N

Ensayo de Flexión Rotativa



Dos comportamientos distintos:

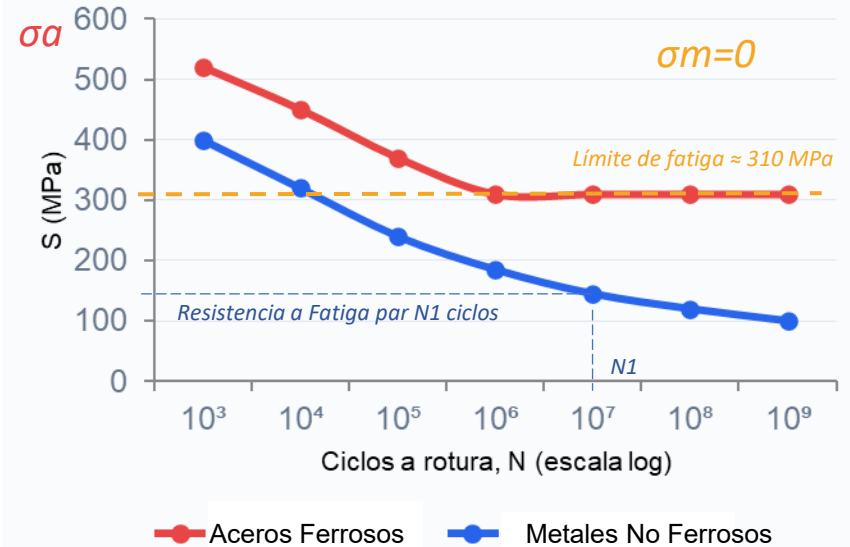
Con límite de fatiga (aceros, Ti)

La curva se hace horizontal $\rightarrow$ existe σ que no produce rotura

Sin límite de fatiga (Al, Cu, latón)

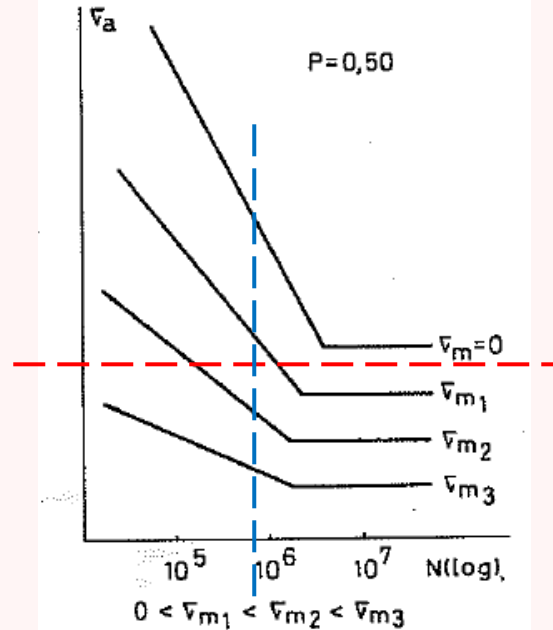
Curva continúa descendiendo $\rightarrow$ se usa resistencia a fatiga a N ciclos

Amplitud S vs. Ciclos a Rotura (N)

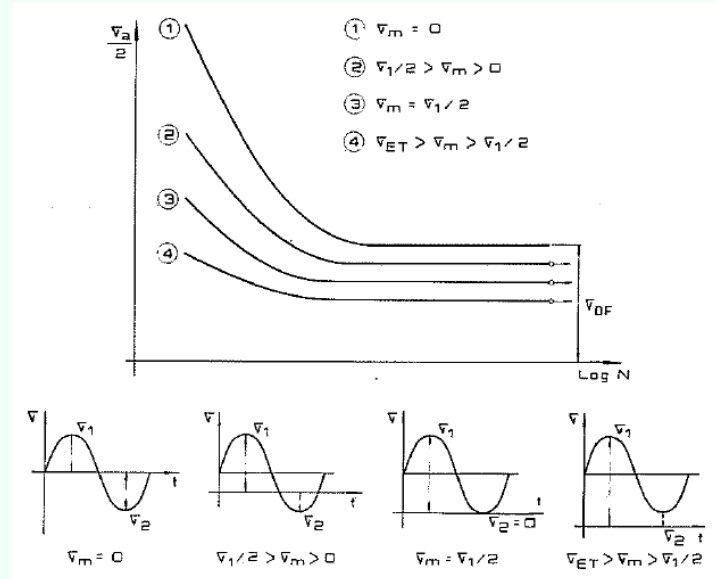


Curvas en función de tensión media

Tensión media variable



Tensión media variable



P A R T E 2

Diagramas de Fatiga

Goodman · Smith

Diagrama de Goodman

¿Qué muestra?

Relaciona tensión media (σ_m) y amplitud de tensión (σ_a) en un solo gráfico para vida ilimitada.

Criterio de Goodman:

- Tensión mínima recta a 45 grados
- Tensión máxima entre A y B

Zona segura: Región rayada

Zona de fallo: Fuera de la región rayada

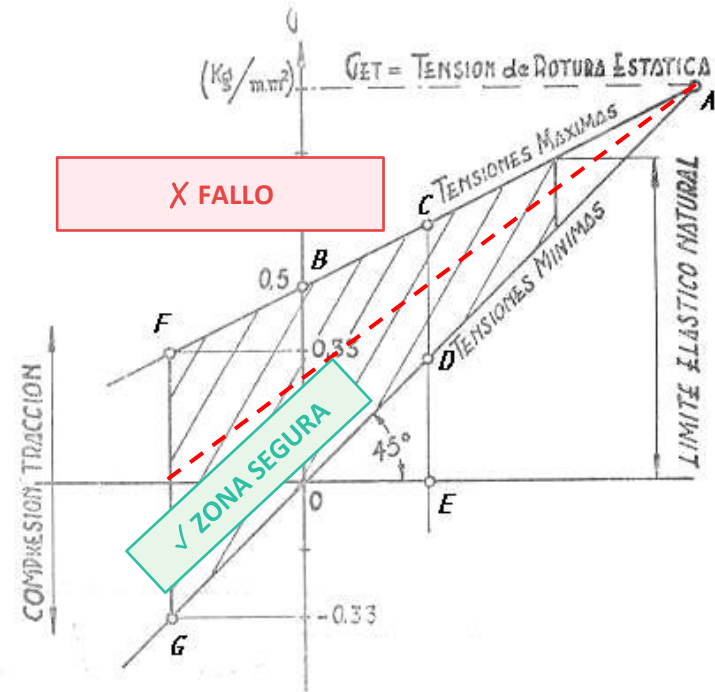


Diagrama de Smith

¿Qué muestra?

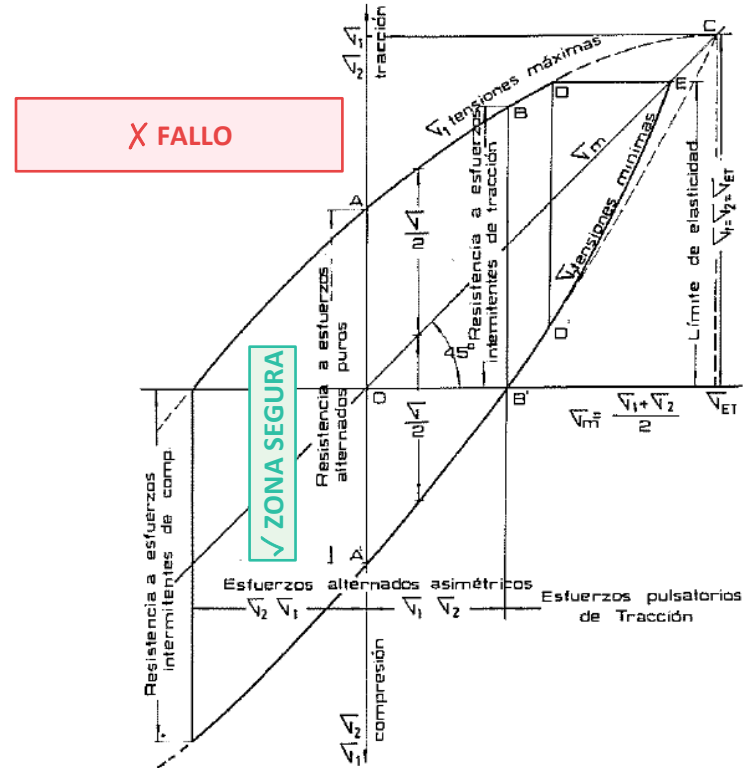
Representa $\sigma_{\max}$ y $\sigma_{\min}$ en función de σ_m para vida ilimitada.

Construcción:

- Eje X: Tensión media σ_m
- Eje Y: Tensiones máx y mín
- Dos curvas definen la envolvente segura

La forma que toma:

- $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \rightarrow$ curva superior
- $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \rightarrow$ curva inferior



Ejemplo Resuelto – Fatiga

Problema

Problema: Un eje de acero está sometido a una carga variable con los siguientes valores:

Esfuerzo mínimo = 50 MPa | Esfuerzo máximo = 300 MPa

Datos:

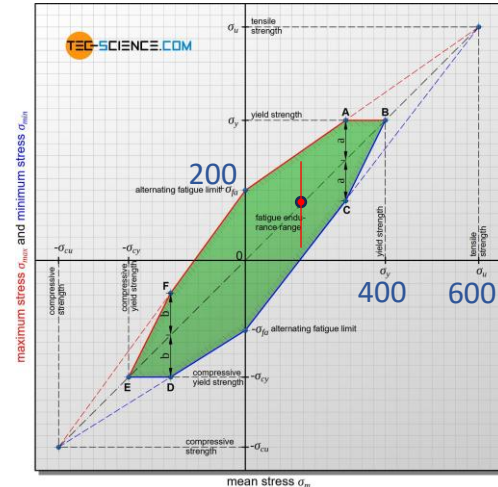
Límite elástico: $\sigma_y = 400$ MPa | Resistencia a la tracción: $\sigma_{ET} = 600$ MPa | Límite de fatiga ($\sigma_m = 0$) = 200 MPa

Fórmula para Tensión media:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 175 \text{ MPa}$$

Fórmula para Tensión amplitud:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = 125 \text{ MPa}$$



P A R T E 3

Mecanismo de Fatiga

Iniciación · Propagación · Fractura final

Etapas del Proceso de Fatiga

1

Iniciación de Grietas

Formación de pequeñas grietas en puntos de alta concentración de tensiones. Nuclean en la SUPERFICIE: rayas, cantos, entallas, roscas, ranuras.

2

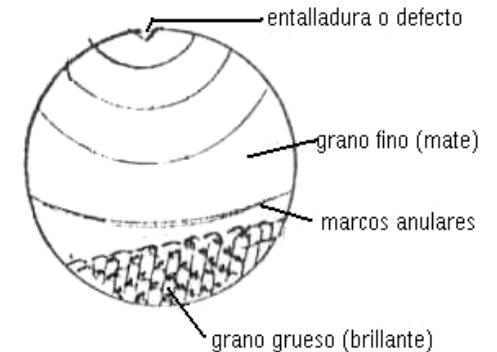
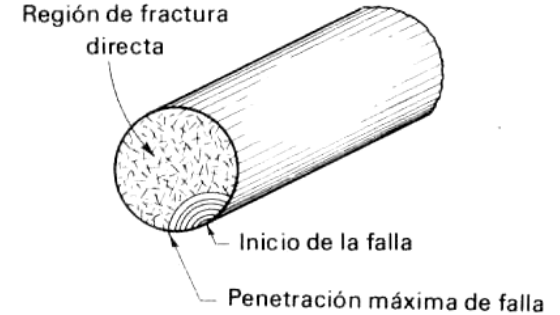
Propagación de Grietas

La grieta avanza gradualmente con cada ciclo. Formación de marcas de playa (macroscópicas) y estrías (microscópicas). Deformación plástica localizada en la punta de la grieta.

3

Fractura Final

Ocurre muy rápidamente cuando la grieta alcanza tamaño crítico. Puede ser dúctil o frágil. No hay marcas de playa en esta región.



P A R T E 4

Factores que Afectan la Vida a Fatiga

Factores que afectan la Vida a Fatiga

Tensión Media (σ_m)

A mayor σ_m de tracción $\rightarrow$ menor vida a fatiga.

En las curvas S-N, un aumento en σ_m hace que disminuya el límite de fatiga.

Pretensado compresivo introduce tensiones residuales de compresión $\rightarrow$ mejora la vida en fatiga.

Pretensado traccional aumenta la tensión media $\rightarrow$ reduce la vida a fatiga.

Factores de Diseño

Entallas, agujeros, ranuras, roscas generan concentración de tensiones.

La iniciación de grietas suele ocurrir en estas zonas.

Solución: radios de curvatura amplios, superficies lisas.

Regla: evitar cambios bruscos de sección.

Tratamientos de Superficie

Pulido fino: reduce micro-entallas $\rightarrow$ mejora la vida a fatiga.

Granallado (shot-peening): introduce tensiones residuales compresivas en la superficie.

Endurecimiento superficial (cementación/nitruración): genera una capa superficial dura y resistente a la iniciación de grietas.

Factores Ambientales

Fatiga térmica: ciclos de Temperatura $\rightarrow$ tensiones por expansión y contracción.

Fatiga por corrosión: ataque químico + ciclos $\rightarrow$ formación de picaduras que actúan como concentradores de tensión.

Estrategias: recubrimientos protectores y control del ambiente.