



UNIVERSIDAD

NEBRIJA

MABH IME 108 – CÁLCULO, DISEÑO Y ENSAYO DE MÁQUINAS

1

TEMA 3. RESISTENCIA A LA FATIGA

Prof. Dr. José Luis Olazagoitia. MABH

RESISTENCIA A LA FATIGA

1. Introducción.
2. Mecanismo de propagación
3. Enfoques para el análisis a fatiga
4. Cargas cíclicas
5. Diagrama S-N
6. Ecuación de Marin
7. Análisis con tensiones medias no nulas
8. Daño acumulado por fatiga
9. Tensiones multiaxiales
10. Ejemplos

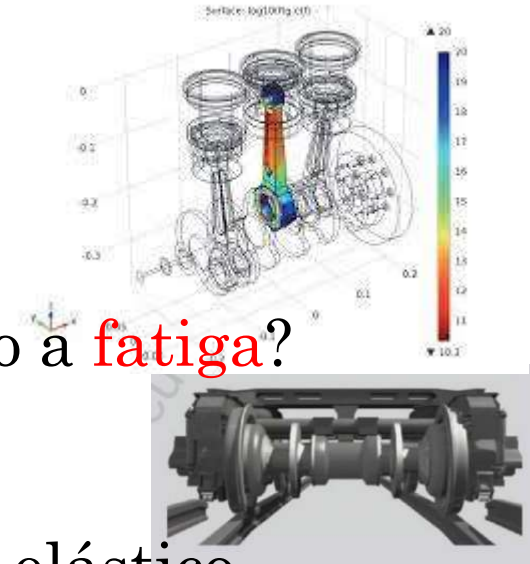
RESISTENCIA A LA FATIGA

1. INTRODUCCIÓN

- Tipos de cargas
 - Fuerzas
 - Momentos
- - Estáticas
 - Invariables con el tiempo
 - CRITERIOS ESTÁTICOS (TEMA 2)
- - Dinámicas
 - Variables con el tiempo
 - FATIGA (TEMA 3 - ACTUAL)

RESISTENCIA A LA FATIGA

1. INTRODUCCIÓN

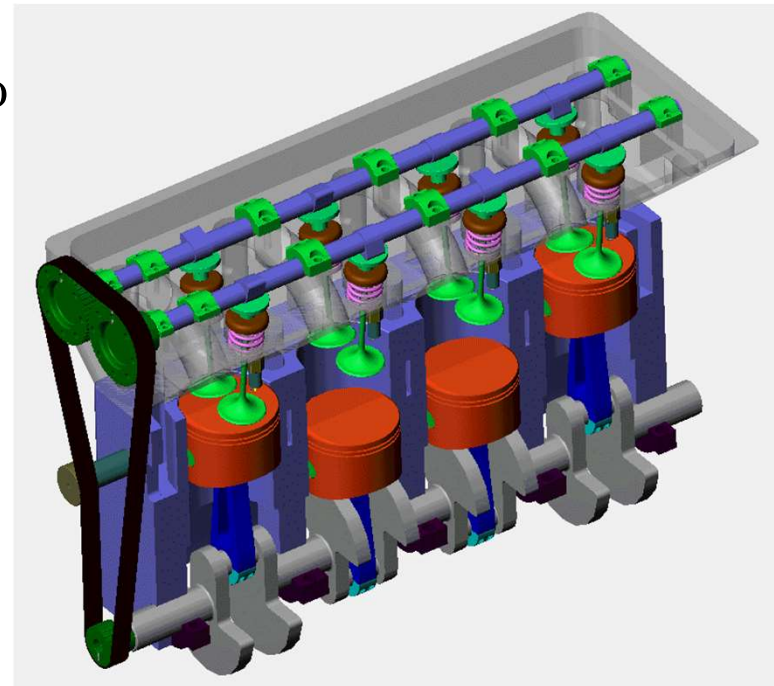
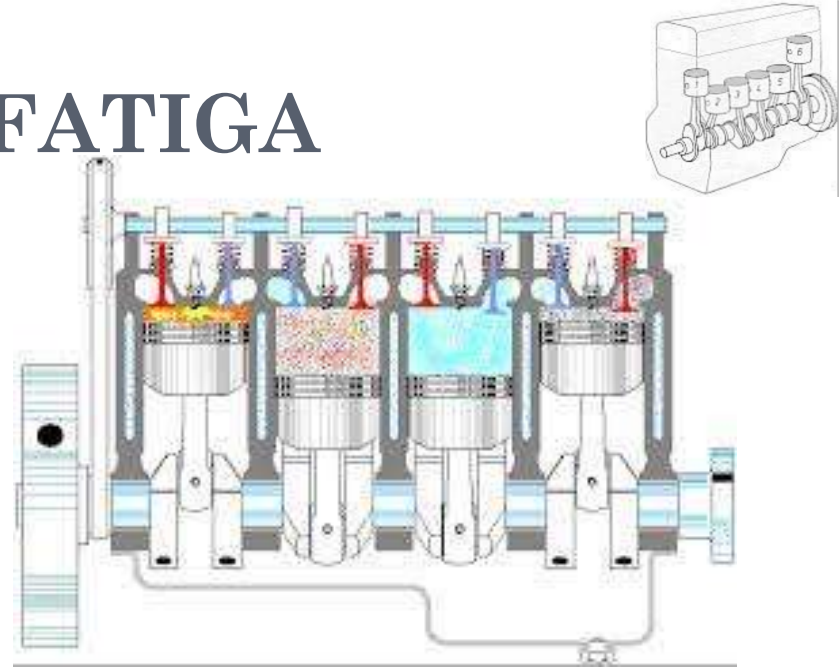


- ¿Cuándo un componente se ve sometido a **fatiga**?
 - Cuando soporta **cargas alternadas**
 - Ej. **Rueda ferrocarril, biela de un motor**, etc.
- Si diseño siempre por debajo del límite elástico
¿Estará mi diseño seguro?
 - **¡¡NO!!**. Las piezas se rompen por debajo de su límite elástico cuando están sometidas a **cargas alternadas**.
- ¿Qué porcentaje de piezas fallan a fatiga en servicio?
 - El **¡¡90%!!** **August Wöhler** (1920). Ing. Ferrocarriles.
 - Propuso **límites a las tensiones en función del número de ciclos** que se quieran para una pieza.
 - Se llaman curvas de **Wöhler o S-N** (tensión vs ciclos)

RESISTENCIA A LA FATIGA

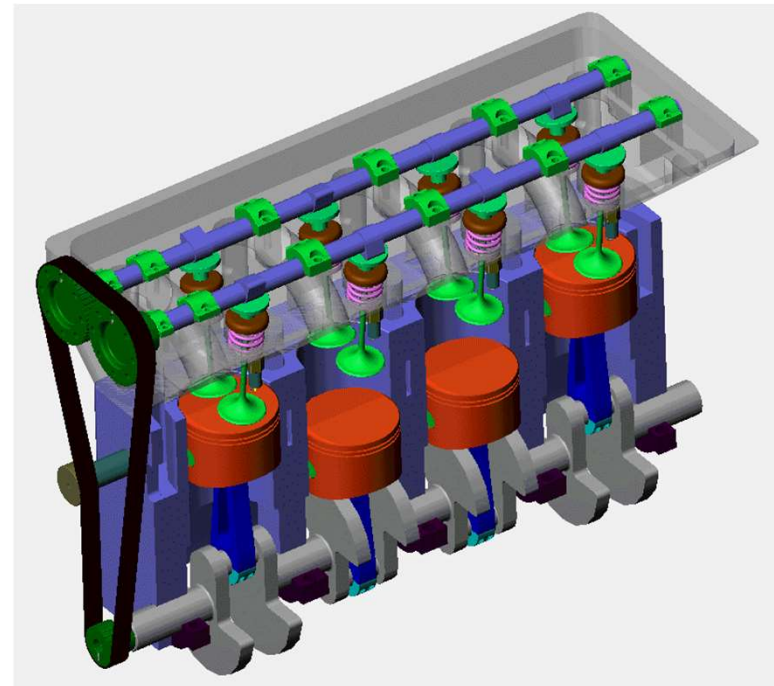
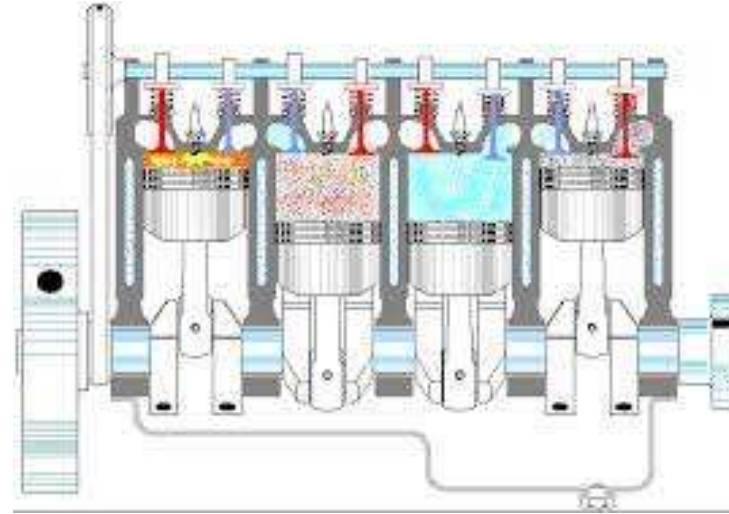
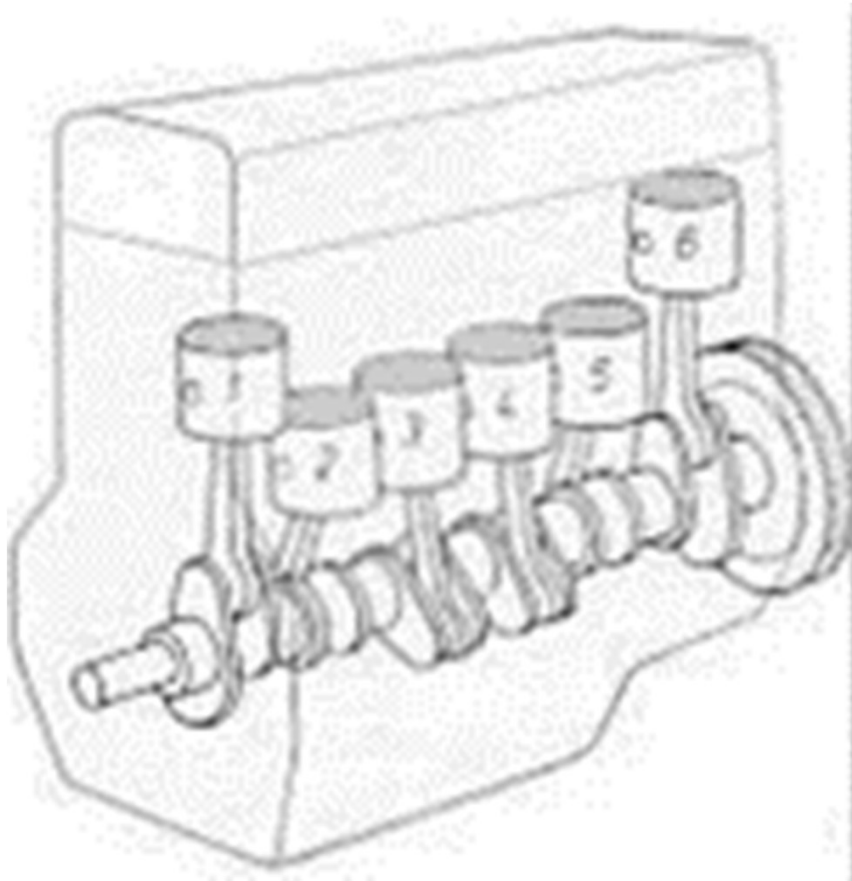
1. INTRODUCCIÓN

- En máquinas las cargas suelen ser repetitivas, fluctuantes y/o rápidamente aplicadas
- Tensiones fluctuantes (incluso inferiores al límite elástico del material) pueden provocar fallo por FATIGA.
- Primeras investigaciones:
Ensayos de cadenas del Ingeniero de Minas alemán Albert (1829)
- Se desarrollan las teorías básicas a partir de la utilización masiva del ferrocarril (siglo XIX).
Ingeniero de ferrocarriles alemán Whöler.



RESISTENCIA A LA FATIGA

1. INTRODUCCIÓN



RESISTENCIA A LA FATIGA

1. INTRODUCCIÓN

- Cuando las partes de máquinas fallan estáticamente, por lo general desarrollan una deflexión muy grande, puesto que el esfuerzo sobrepasó el límite elástico; por ello la parte se reemplaza antes de que en realidad suceda la fractura. De esta manera la falla estática proporciona una advertencia visible.
- Pero una **falla por fatiga NO proporciona ninguna advertencia**. Es repentina y total y, por ende, peligrosa.
- Es relativamente simple diseñar contra la falla estática porque el conocimiento que se tiene de este tipo de fallo es muy completo.

RESISTENCIA A LA FATIGA

1. INTRODUCCIÓN

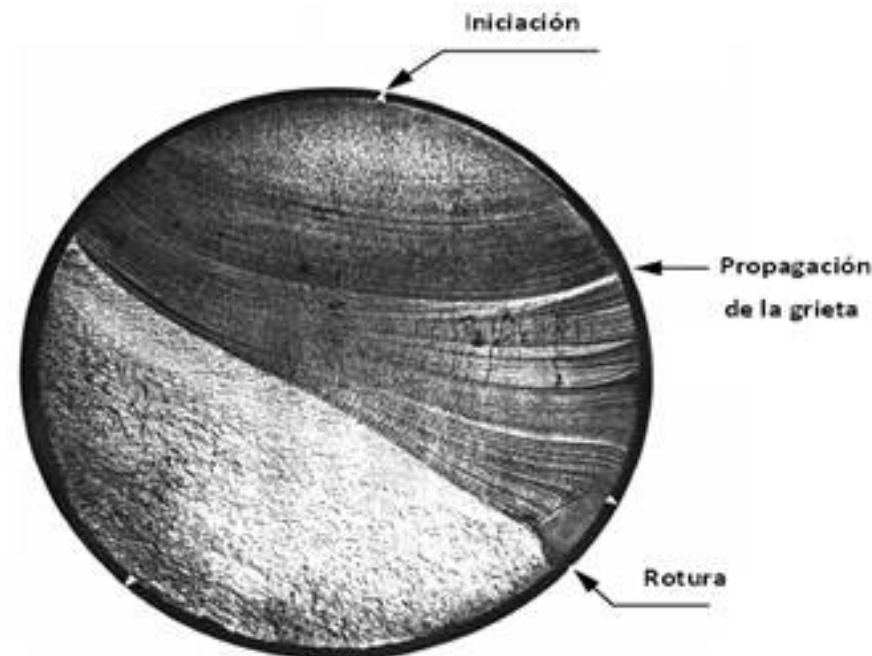
- En la rotura por fatiga aparece una microgrieta, que crece a medida que se realizan ciclos de carga.
- Cuando la grieta crece tanto que la sección residual no puede soportar la carga máxima del ciclo, el material de esa sección rompe de forma frágil o dúctil.



RESISTENCIA A LA FATIGA

1. INTRODUCCIÓN

- El fallo puede ser **localizado** (en zonas con tensiones o deformaciones elevadas)
- O **progresivo** (inicio y propagación de grietas hasta la fractura final **rápida**)



RESISTENCIA A LA FATIGA

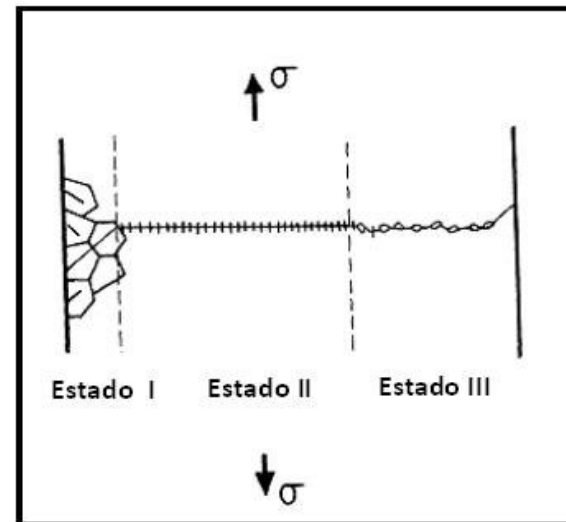
1. INTRODUCCIÓN

○ Definición fatiga:

- (ASTM Y 1150-87-1993) “proceso de **cambio estructural permanente, progresivo y localizado**, producido por tensiones o deformaciones **fluctuantes** en algún punto o puntos del material, y que puede culminar en **grietas o fractura completa** después de un número suficiente de ciclos de carga.”

○ Etapas (estadios) de la fatiga

- I. Nucleación (iniciación)
- II. Propagación
- III. Rotura



RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

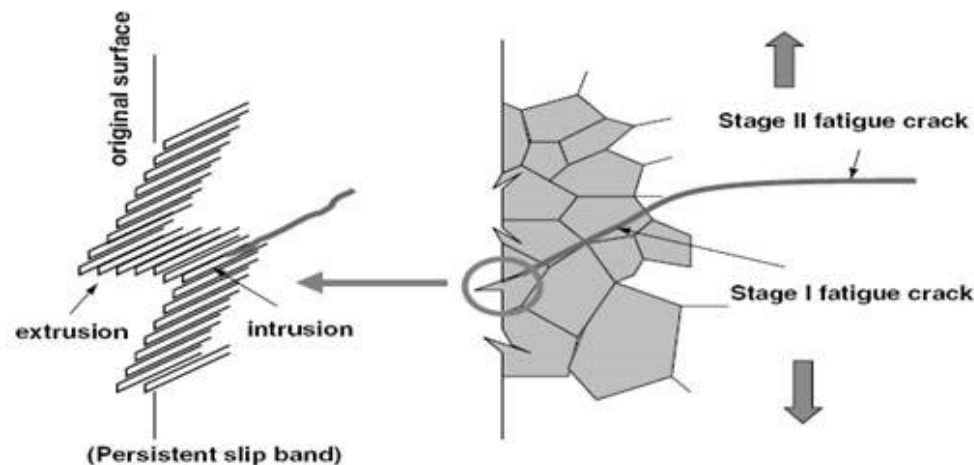
- INICIO DE LA GRIETA (NUCLEACIÓN)
 - El proceso de iniciación es “esencialmente” **superficial** (en la superficie del sólido). Raramente ocurre en el interior del mismo. ¿Por qué?
 1. La **concentración de tensiones** es mayor.
 2. La **deformación plástica** es más amplia en esa región.
 3. Los **cristales** están menos soportados (**es más fácil el deslizamiento**)
 4. Acción de las **condiciones ambientales**.
 - Evidencias experimentales revelan que las grietas de fatiga se inician en una región extremadamente pequeña (**$<0.5 \mu\text{m}$**)
 - Esta etapa es la que consume la **mayor parte de la vida de la estructura** o del elemento mecánico (propagación lenta)

RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

○ INICIO DE LA GRIETA (NUCLEACIÓN)

- En material **frágil** se inicia en un defecto o discontinuidad (microgrietas, inclusiones)
- En material **dúctil** sin concentrador de tensiones, la secuencia es:
 1. Formación de bandas de deslizamiento
 2. Formación de extrusiones e intrusiones
 3. Desarrollo de grietas en intrusiones

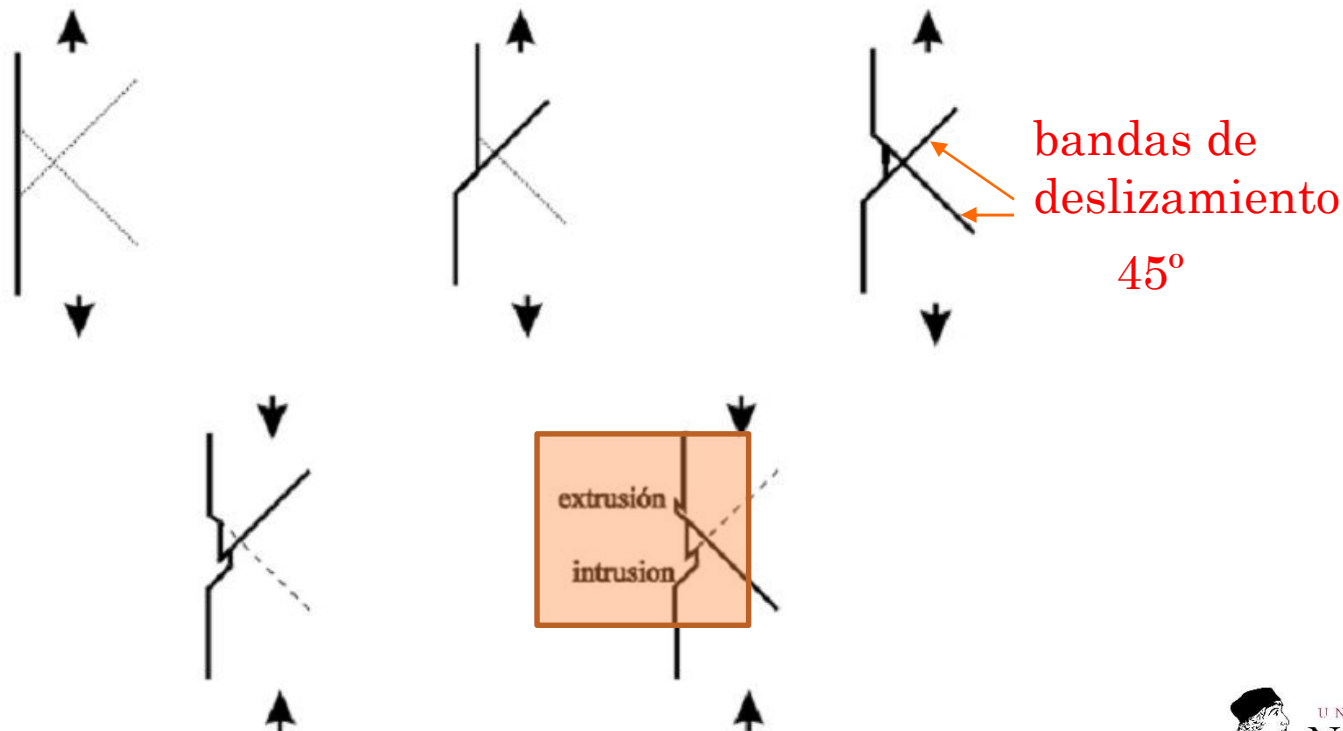


RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

- Intrusiones y extrusiones

- La formación de intrusiones y extrusiones parece ser una extensión de formación de bandas de deslizamiento, requiriendo irreversibilidad del proceso.



RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

○ En metales dúctiles:

- Etapa I: Crecimiento de banda de deslizamiento (plano de τ elevada 45°)
- Etapa II: Unión de grietas y crecimiento en plano (perpendicular a la σ máxima plano de la dirección principal)

○ En metales frágiles crece directamente en planos perpendiculares a la máx No Deslizamiento.

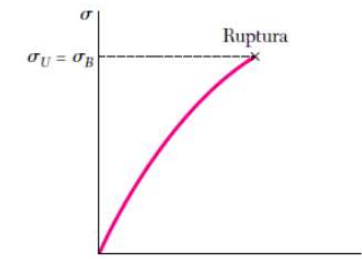
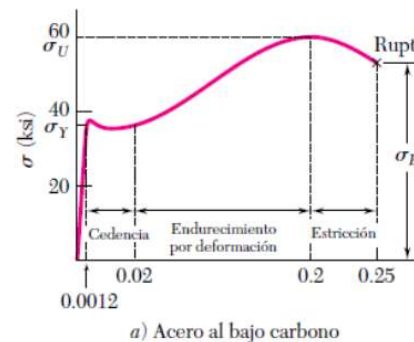
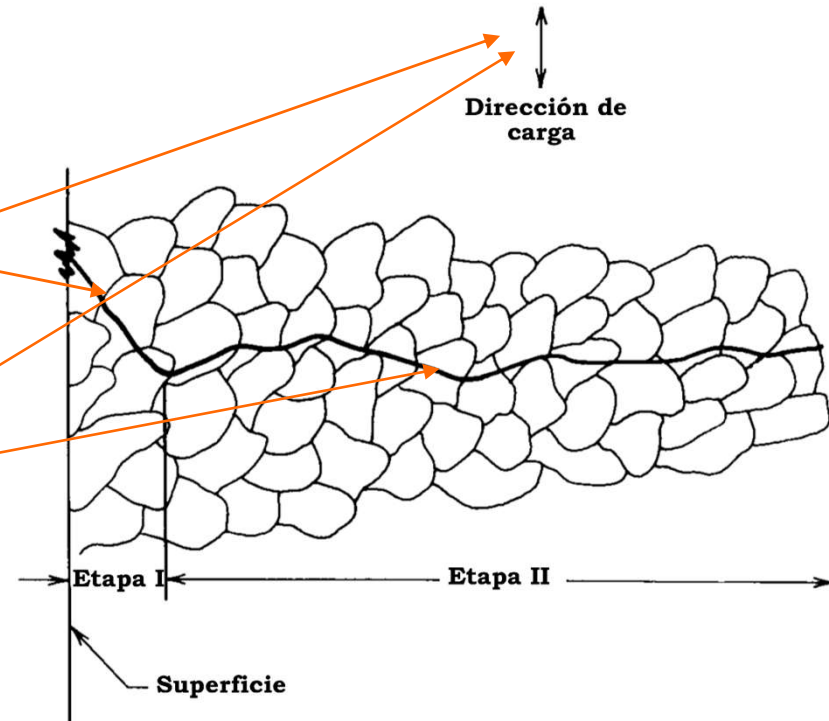
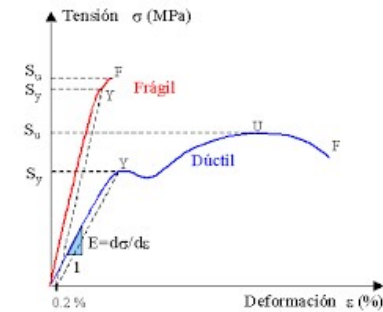


Figura 2.11 Diagrama esfuerzo-deformación para un material frágil típico.

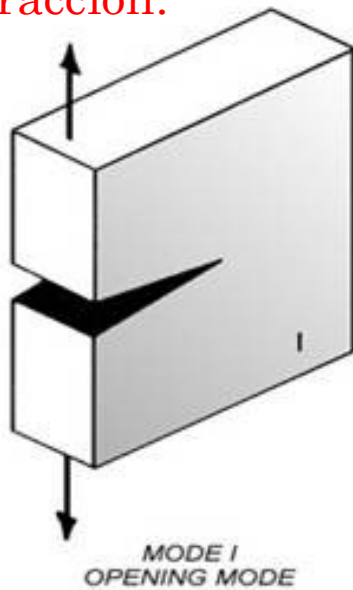
RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

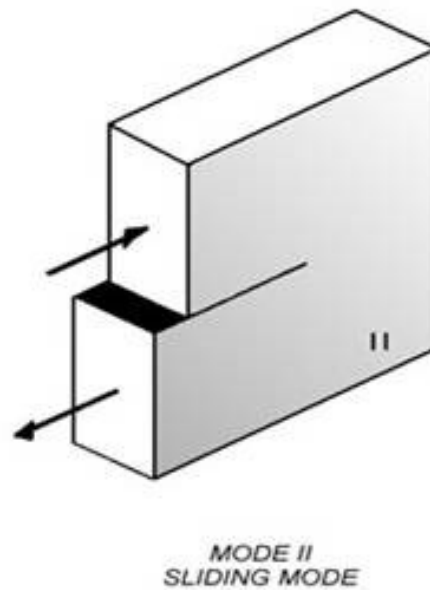
◦ Modos de carga (Broek 1989) :

- La mayoría de las grietas resultan del modo I
- Los otros dos modos no ocurren individualmente, pero pueden ocurrir en combinación con el modo I.

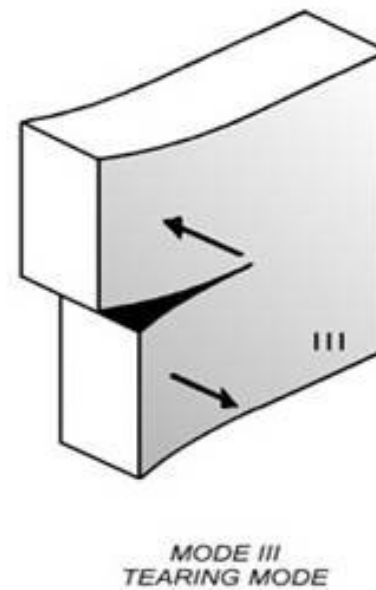
Tracción.



Cortante-cizalladura



Deslizamiento



Rasgado.
Hoja de papel.

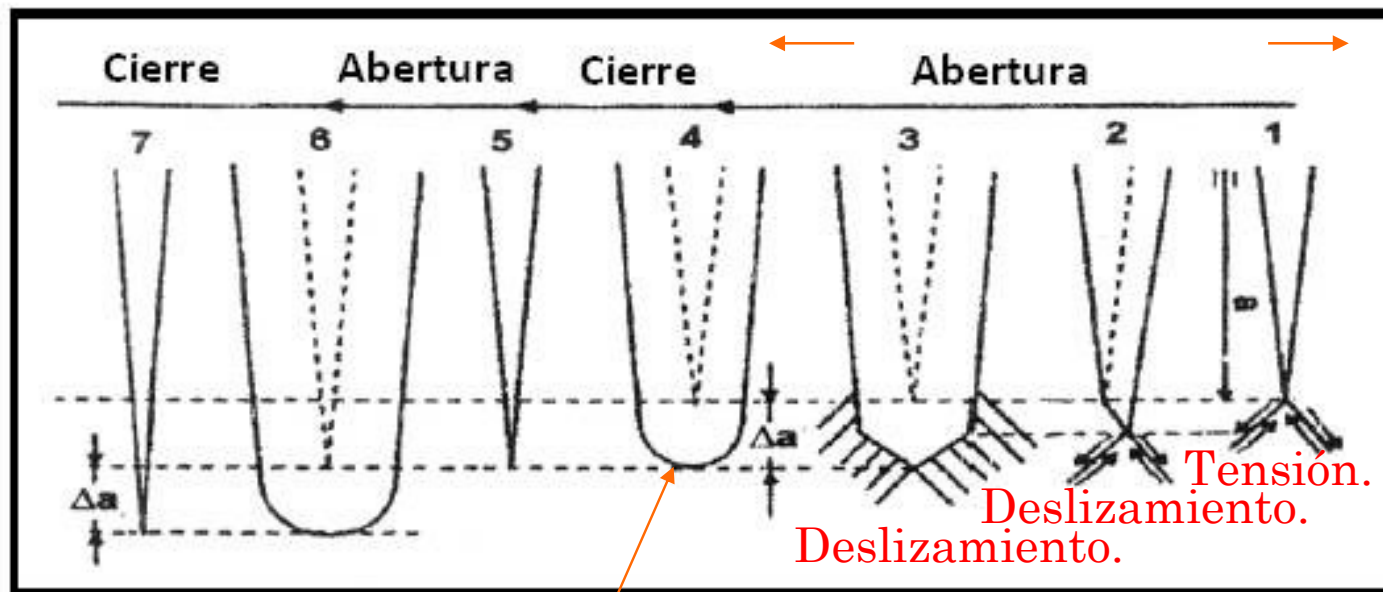


UNIVERSIDAD
NEBRIJA

RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

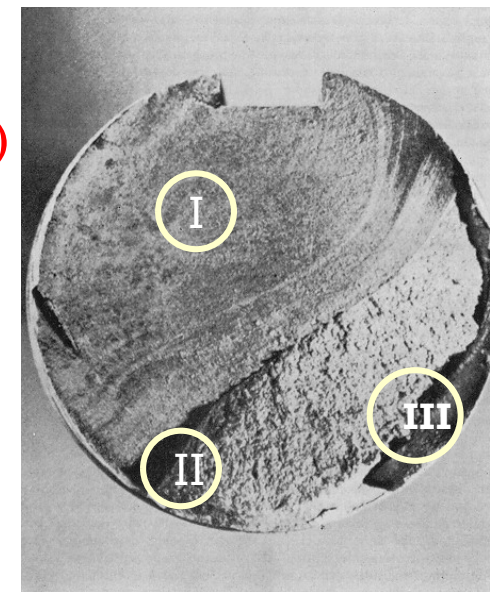
- Ciclos de carga (Broek 1986) :
 - Crecimiento de la grieta por proceso de deslizamiento reverso
 - Tras la **nucleación**, en la **propagación**, la grieta crece **rápidamente** (Fase II de la Fatiga)



RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

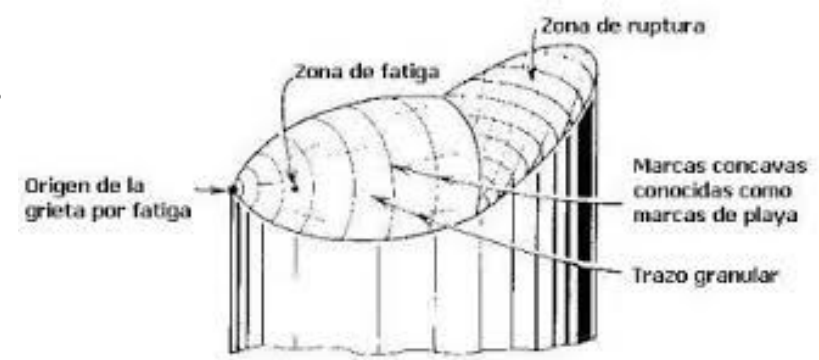
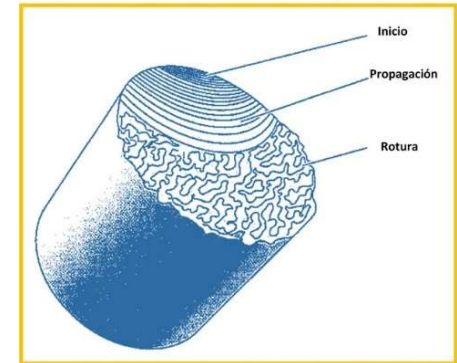
- Se producen grietas hasta producir la rotura
- Generalmente grietas finas y de difícil detección
- Rotura sin previo aviso, con pequeñas deformaciones estructurales para **tensiones por debajo de la resistencia estática**
 1. I. Iniciación (propagación lenta)
 2. II. Propagación (crecimiento rápido)
 3. III. Rotura



RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

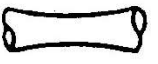
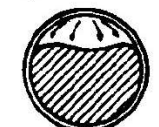
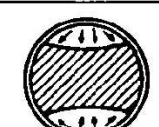
- Una falla por fatiga tiene una apariencia similar a la fractura frágil. Las superficies de la fractura son planas y perpendiculares al eje del esfuerzo con la ausencia de adelgazamientos.
- Sin embargo las características de la fractura por fatiga son muy diferentes a la fractura frágil estática y surgen a partir de **tres etapas de desarrollo**.
 - Etapla I. Inicio de una o más micro grietas debido a la deformación plástica cíclica seguida de propagación cristalográfica que se extiende de dos a cinco grados del origen. Normalmente las grietas de esta etapa no pueden verse a simple vista.
 - Etapla II. Las micro grietas se convierten en macro y forman superficies paralelas en forma de meseta separadas por crestas longitudinales. Las mesetas son suaves y normales a la dirección del esfuerzo máximo en tensión. Estas superficies pueden tener marcas oscuras y claras conocidas como “marcas de playa”. Durante las cargas cíclicas estas superficies se abren y cierran, frotándose entre sí.
 - Etapla III. Ocurre durante el ciclo del esfuerzo final, cuando el material restante no puede soportar las cargas, lo que resulta en una fractura súbita y rápida.
- Las marcas de playa apuntan hacia los orígenes de las grietas iniciales.

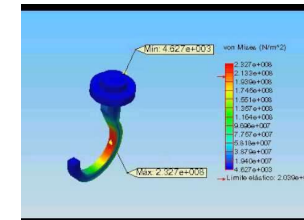


RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

- Aspecto macroscópico de las roturas por fatiga

Tensión nominal alta			Tensión nominal baja		
Lisa	Entalla media	Entalla fuerte	Lisa	Entalla media	Entalla fuerte
					
Carga axial					
					
Flexión unidireccional					
					
Flexión bidireccional					
					
Flexión rotativa					
					

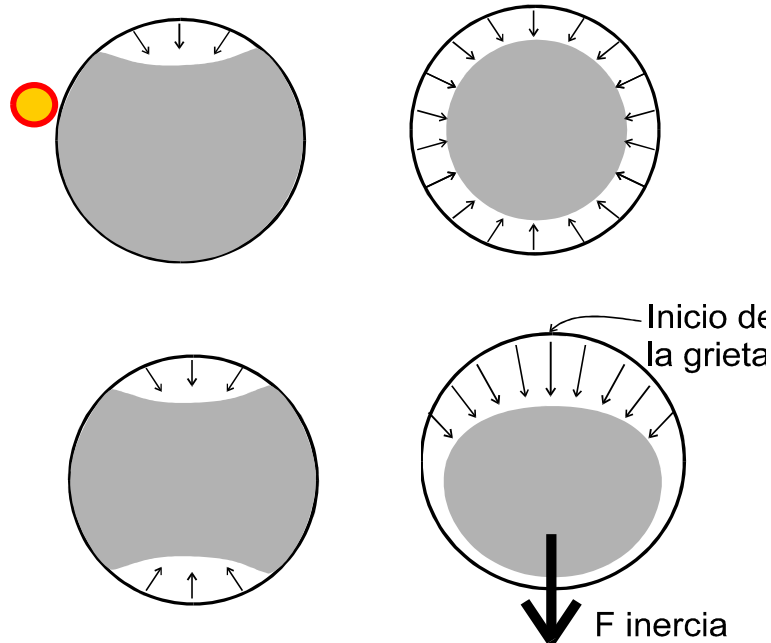
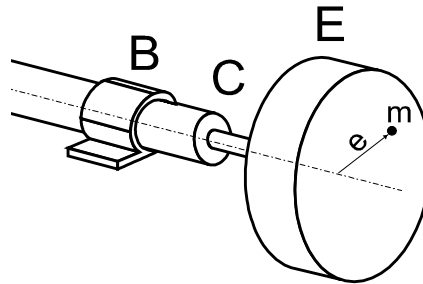


RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACI

○ Ejemplo eje rotativo desequilibrado

La figura siguiente muestra un eje, apoyado en los rodamientos A y B que gira a velocidad angular constante. En su extremo derecho E tiene un volante de inercia de **gran masa**, de valor **M** . En el volante existe una masa descentrada **m** . Debido a que el diámetro en C es **excesivamente pequeño**, el componente falla por dicha sección. ¿Cuál de las siguientes figuras representa mejor el aspecto que tendría la superficie fractura de la sección C?



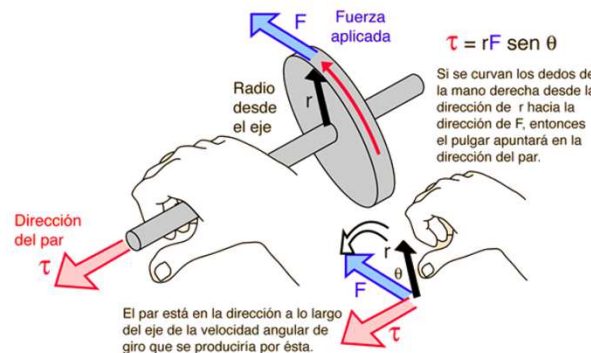
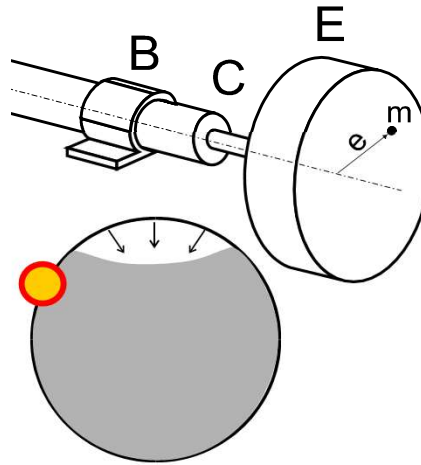
Tensión nominal alta			Tensión nominal baja		
Lisa	Entalla media	Entalla fuerte	Lisa	Entalla media	Entalla fuerte
Carga axial					
Flexión unidireccional					
Flexión bidireccional					
Flexión rotativa					

RESISTENCIA A LA FATIGA

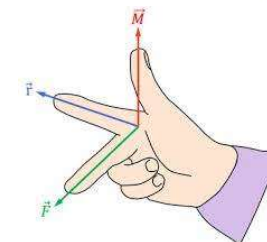
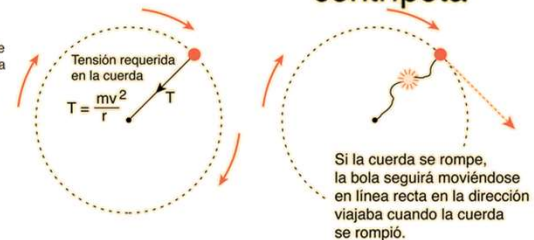
2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

○ Ejemplo eje rotativo desequilibrado

La figura siguiente muestra un eje, apoyado en los rodamientos A y B que gira a velocidad angular constante. En su extremo derecho E tiene un volante de inercia de **gran masa**, de valor **M** . En el volante existe una **masa descentrada m** . Debido a que el diámetro en C es **excesivamente pequeño**, el componente falla por dicha sección. ¿Cuál de las siguientes figuras representa mejor el aspecto que tendría la superficie fractura de la sección C?



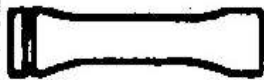
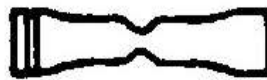
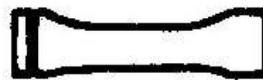
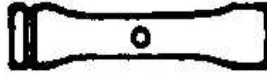
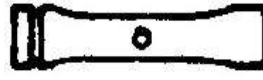
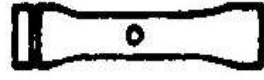
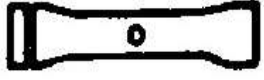
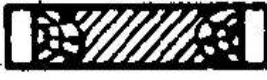
Tensión nominal alta			Tensión nominal baja		
Lisa	Entalla media	Entalla fuerte	Lisa	Entalla media	Entalla fuerte
Carga axial					
Flexión unidireccional					
Flexión bidireccional					
Flexión rotativa					



RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

- Aspecto macroscópico de las roturas por fatiga

Tensiones nominales altas			Tensión nominal baja		
Lisa	Entalla media	Entalla fuerte	Lisa	Entalla media	Entalla fuerte
Entallas exteriores					
					
Entallas interiores					
					
Carga axial					
					
					

RESISTENCIA A LA FATIGA

2. MECANISMO DE PROPAGACIÓN

- Aspecto macroscópico de las roturas por fatiga
 - Marcas concoidales (**concha**) en la zona de crecimiento de grieta (apertura y cierre de grieta e interacción de superficies, variación de velocidad de crecimiento de grieta, interacción con el ambiente).
 - Deformación permanente global reducida
 - Deformación plástica localizada en nucleación y crecimiento (no observable directamente)



RESISTENCIA A LA FATIGA

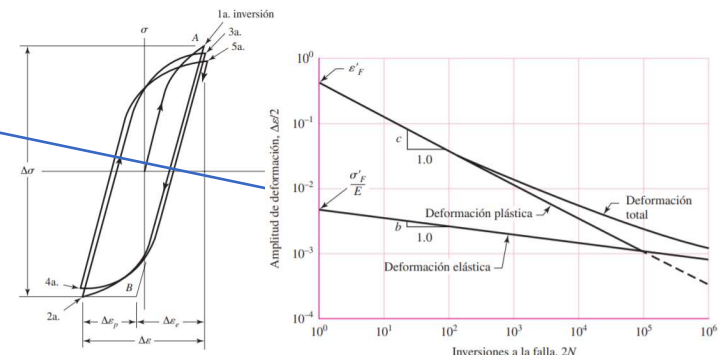
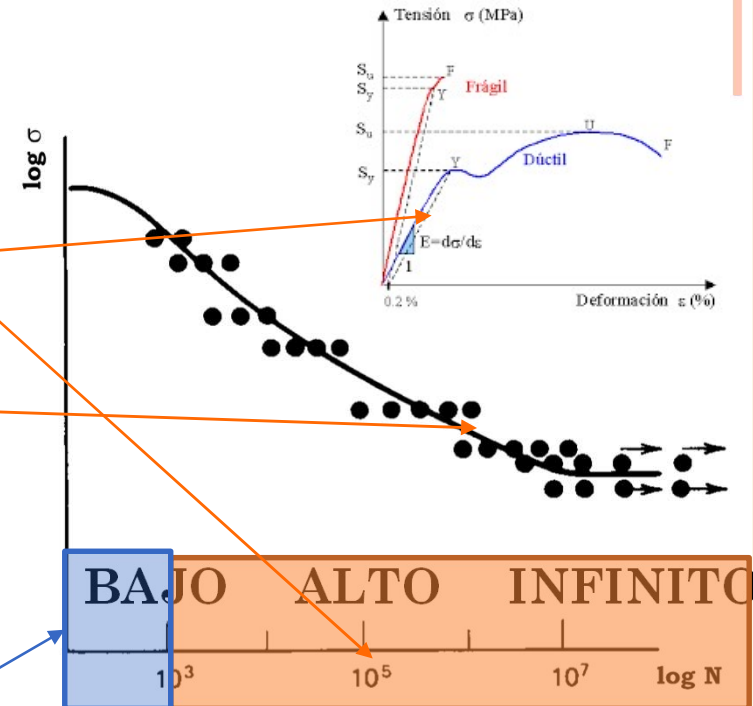
3. ENFOQUES PARA EL ANÁLISIS A FATIGA

○ ALTO CICLO

- Miles de ciclos para el fallo ($N > 10^3$)
- Tensiones bajas sin fluencia
- σ y ϵ son proporcionales
- Enfoque en tensiones.
- Gráficas S-N
 - Gráfica de vida de una probeta vs rango de tensiones + correcciones.

○ BAJO CICLO

- Tensiones elevadas y vidas cortas
- Existe plasticidad $\Rightarrow \sigma$ vs ϵ no lineal $\Rightarrow$ enfoque deformaciones
- Gráficas ϵ -N
- Gráfica de vida vs ciclo de deformaciones de probeta + rango de deformaciones en la entalla



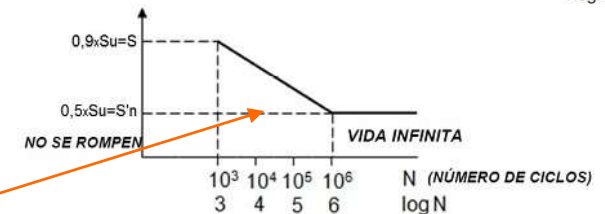
<https://www.youtube.com/watch?v=OgcfGRDo-tE>

RESISTENCIA A LA FATIGA

3. ENFOQUES PARA EL ANÁLISIS A FATIGA

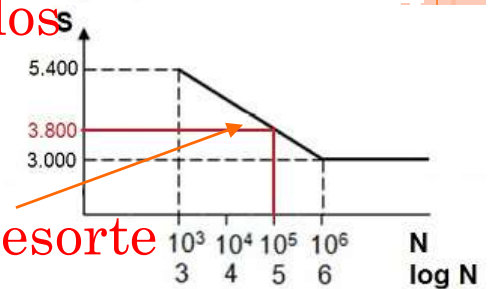
○ DISEÑO PARA VIDA INFINITA

- Criterio más antiguo
- Tensiones de diseño < límite de fatiga
- Para componentes sometidos a millones de ciclos



○ DISEÑO PARA VIDA SEGURA

- Componentes a la máxima carga esperada en servicio fallan tras cientos de miles de ciclos (resorte de suspensión, rodamientos, ...)
- Se debe incluir un margen de seguridad (dispersión estadística y otros factores)
- El margen de seguridad puede considerarse en vida, en cargas, o ambos.



○ (DISEÑO PARA LA VIDA DE GARANTÍA)

- (Obsolescencia programada...)

**MIELE. Concurso. Premio
40 años funcionando.**

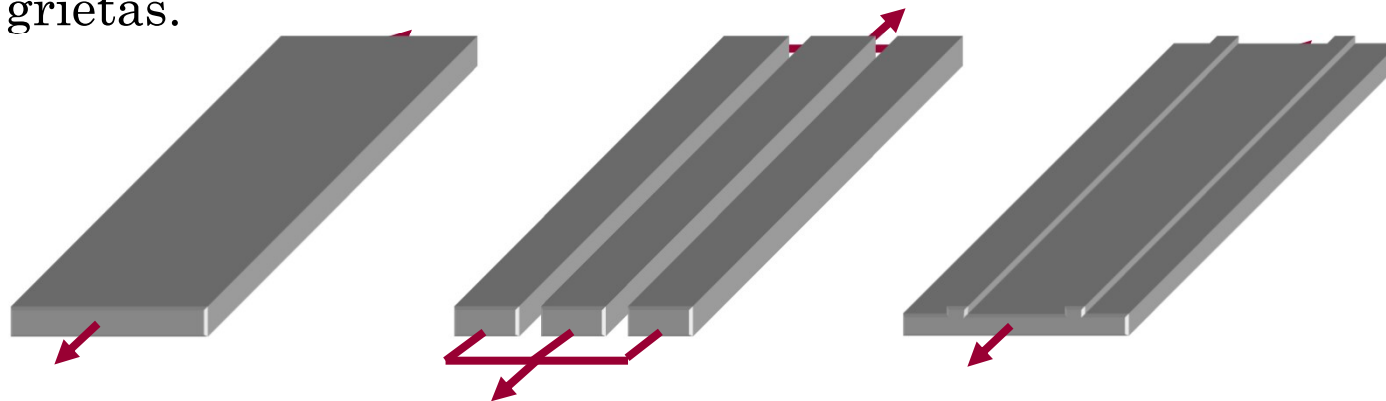


RESISTENCIA A LA FATIGA

3. ENFOQUES PARA EL ANÁLISIS A FATIGA

○ DISEÑO SEGURO AL FALLO

- Criterio desarrollado por **ingenieros aeronáuticos**
- Diseño en el que **las grietas no pongan en peligro la integridad estructural antes de ser detectadas.** Revisiones aviones.
- Métodos: Varios caminos de transmisión de fuerzas y detección de grietas.



○ DISEÑO TOLERANTE AL FALLO

- Asegurar que las grietas se detectarán por inspección periódica antes de la rotura (el fuselaje se revisa buscando grietas cada 4000h de vuelo)
- Análisis mediante mecánica de la fractura y ensayo.

RESISTENCIA A LA FATIGA

3. ENFOQUES PARA EL ANÁLISIS A FATIGA

- Boeing 737. Vuelo 243 de Aloha Airlines, 28 de abril de 1988. 89 pasajeros y 6 tripulantes.
- Fallo por fatiga con corrosión junto a uniones remachadas durante el vuelo. Mal mantenimiento.



Siguen apareciendo grietas en los Boeing 737 NG

11 noviembre, 2019



Foto de archivo Boeing 737 NG de Lion Air (Foto: REUTERS/Willy Kurniawan).

Ryanair: los más antiguos

Ryanair do, no obstante, haber retirado de servicio a un número de aviones Boeing 737 tras detectar problemas estructurales, los cuales ya está reparando, más de 70 de sus aviones más antiguos.

No obstante, Ryanair rechazó que estos problemas estén relacionados con los llamados *pickle forks*, la estructura que une las alas con el fuselaje del avión, según informó el diario británico *The Guardian*, citando *The Irish Times*.

La low cost irlandesa subrayó que tiene "confianza en que, en caso de que aparezcan grietas en la mencionada parte del avión, no afectará a su flota o a sus vuelos".

Ahora Lion Air

Los aviones de Lion Air con grietas tenían menos de 22.000 ciclos y ahora estaban en tierra para reparaciones, dijo un portavoz de la aerolínea.

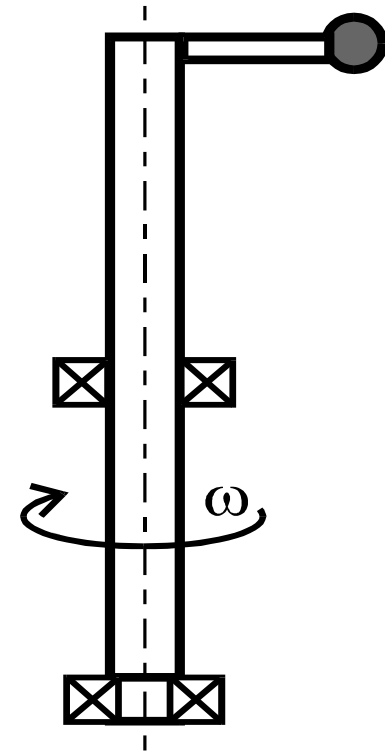
RESISTENCIA A LA FATIGA

3. ENFOQUES PARA EL ANÁLISIS A FATIGA

Ejemplo.

El eje de la figura, situado en posición vertical tiene una masa descentrada en su extremo superior y gira a gran velocidad, debido a lo cual aparecen fuerzas de inercia. ¿Qué tipo de fallo podría producirse en el eje?

- a) Fallo estático debido a flexión.
- b) Fallo por fatiga debido a que la carga va girando y produce flexión rotativa en el eje.
- c) Fallo por fatiga debido a que la carga va girando y produce tensiones alternantes debidas tanto a flexión como a torsión.
- d) Fallo por fatiga debido a torsión alternante inducida por el giro del eje



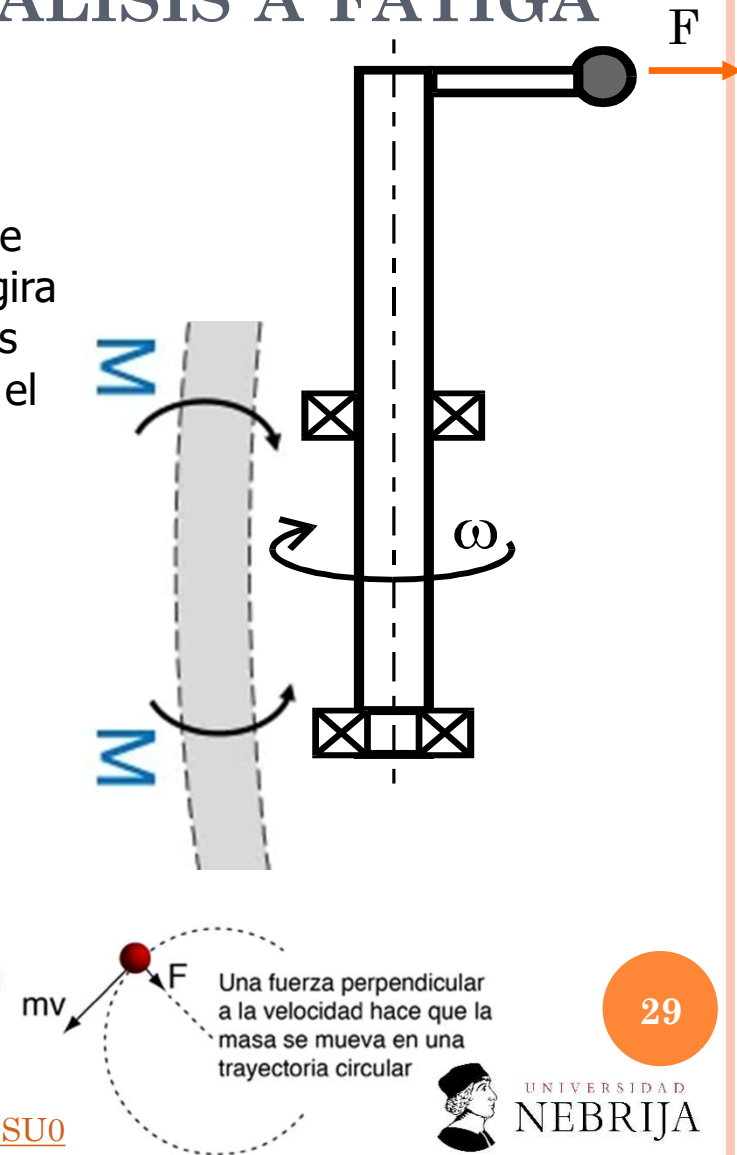
RESISTENCIA A LA FATIGA

3. ENFOQUES PARA EL ANÁLISIS A FATIGA

Ejemplo.

El eje de la figura, situado en posición vertical tiene una masa descentrada en su extremo superior y gira a gran velocidad, debido a lo cual aparecen fuerzas de inercia. ¿Qué tipo de fallo podría producirse en el eje?

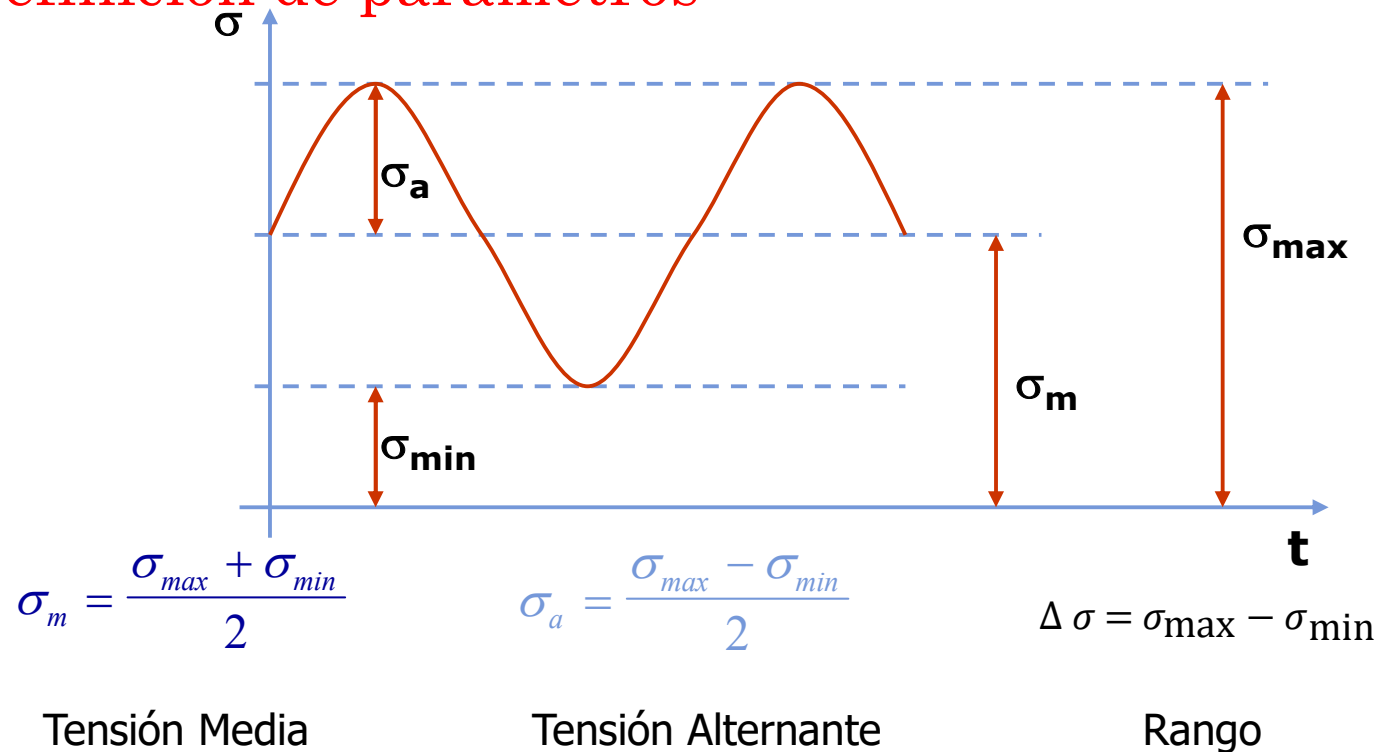
- a) Fallo estático debido a flexión.
- b) Fallo por fatiga debido a que la carga va girando y produce flexión rotativa en el eje.
- c) Fallo por fatiga debido a que la carga va girando y produce tensiones alternantes debidas tanto a flexión como a torsión.
- d) Fallo por fatiga debido a torsión alternante inducida por el giro del eje



RESISTENCIA A LA FATIGA

4. CARGAS CÍCLICAS

Definición de parámetros



R relación de tensiones y **A** relación de amplitudes.

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

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

30

RESISTENCIA A LA FATIGA

4. CARGAS CÍCLICAS

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

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

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

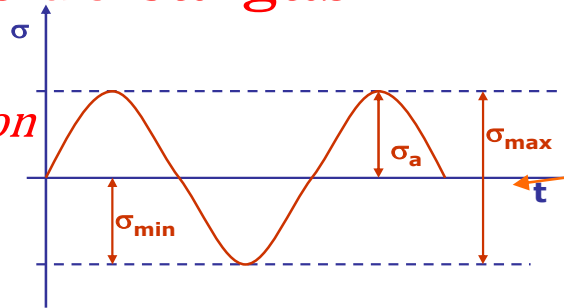
Tipos de cargas

Si los ciclos son iguales, p.e. Rotación.

$$\sigma_m = 0$$

$$R = 1/2$$

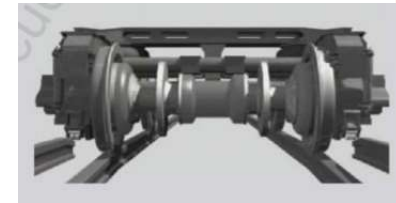
$$A = \text{infinito}$$



Tensión Media

ALTERNANTE

Tensión Alternante



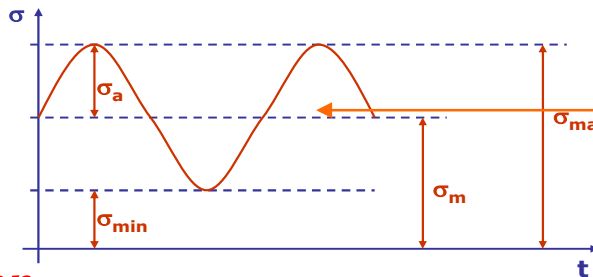
CICLO COMPLETO

Si los ciclos son iguales, p.e. Rotación.

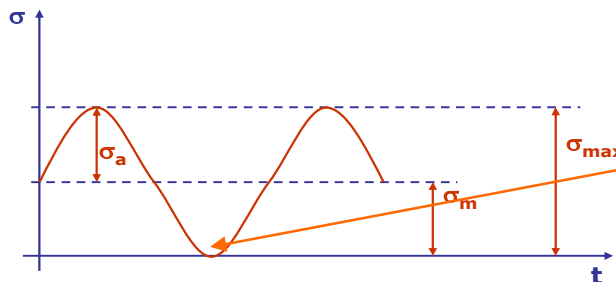
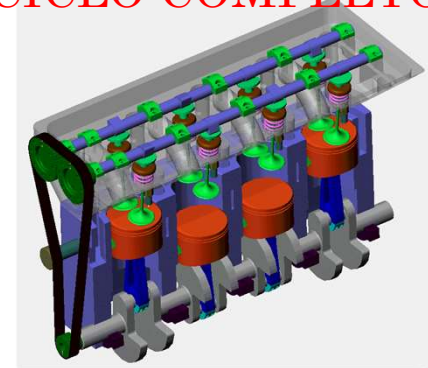
$$\sigma_{\min} = 0$$

$$R = 0$$

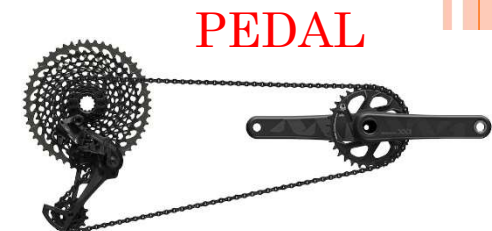
$$A = 1$$



FLUCTUANTE



PULSANTE



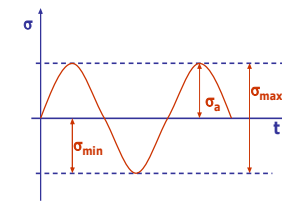
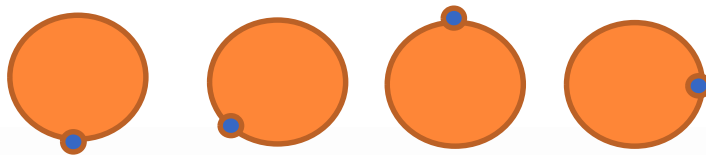
PEDAL

RESISTENCIA A LA FATIGA

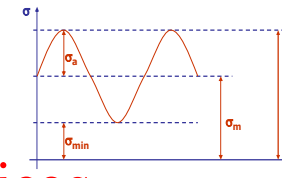
5. DIAGRAMA S-N

○ Ensayos de Fatiga.

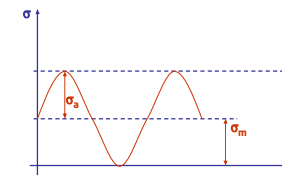
- Máquina de **probeta rotatoria de Moore**.
- Muy sencillo y **eficaz para materiales férricos**



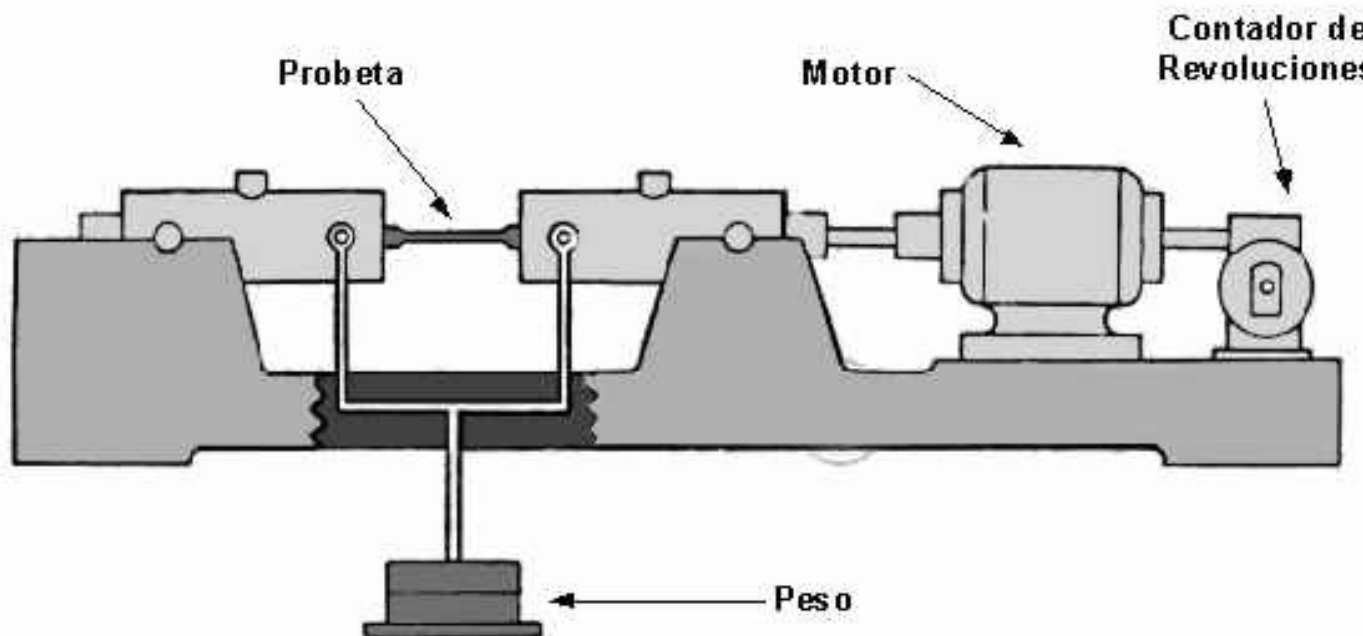
ALTERNANTE



FLUCTUANTE



PULSANTE



RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

○ Ensayos de Fatiga.

• Máquina de Wöhler

- Flexión rotativa
- Aparece cortante

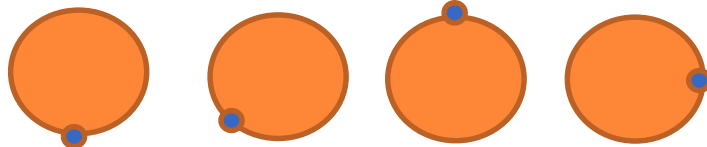
• Máquina de Viga Rotativa

- La probeta gira por motor
- Mientras se aplica carga
- Flexión alternada
- (tracción-compresión)

Giro del mismo punto.

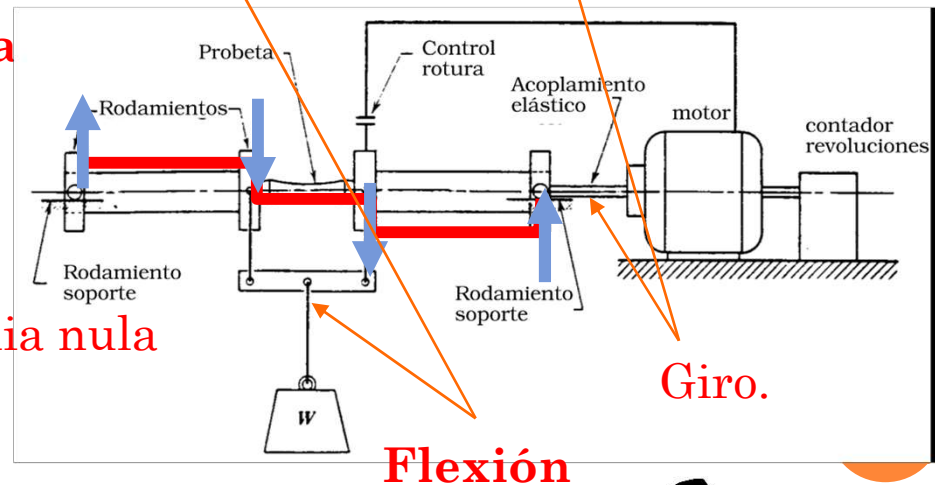
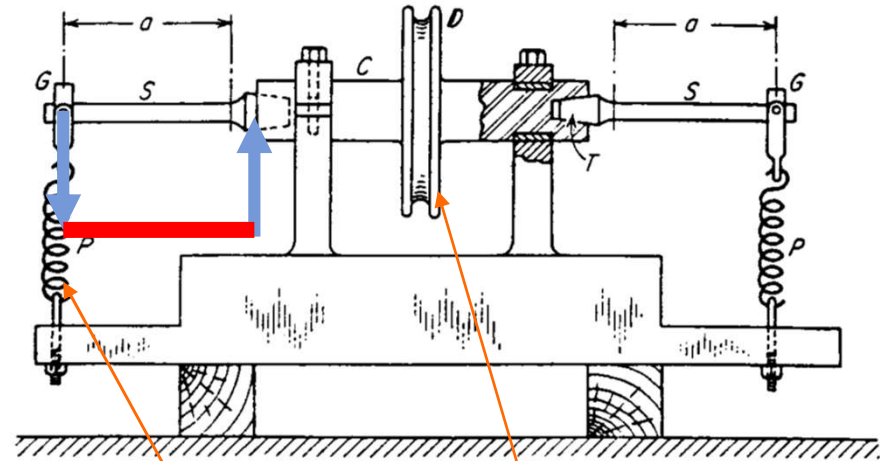
Tracción

Tensión media nula



Tracción máx.
Dr. J. L. O. y MABH

Compresión máx.



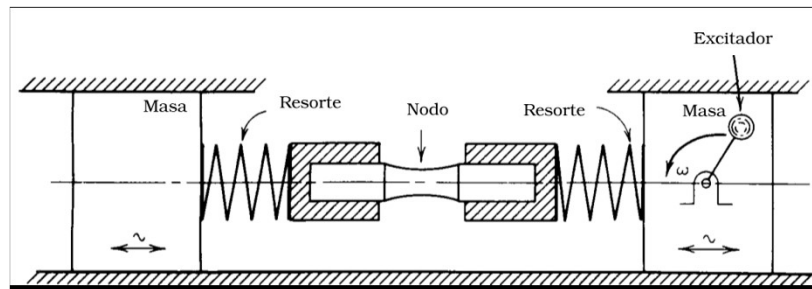
Flexión

Giro.

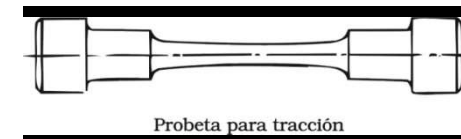
RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

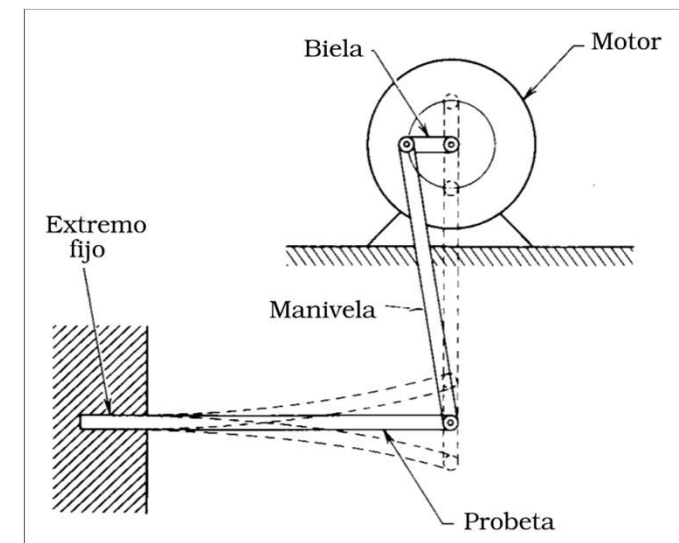
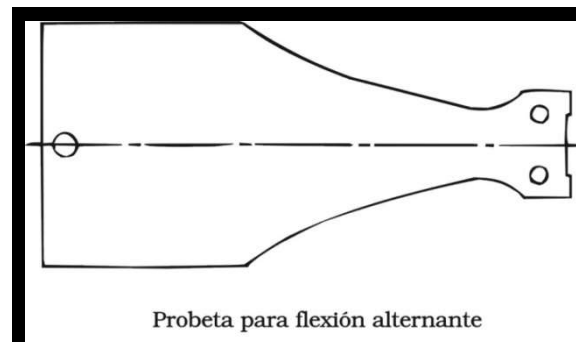
- Ensayos de Fatiga.
 - Máquina de resonancia de vibración



Carga axial



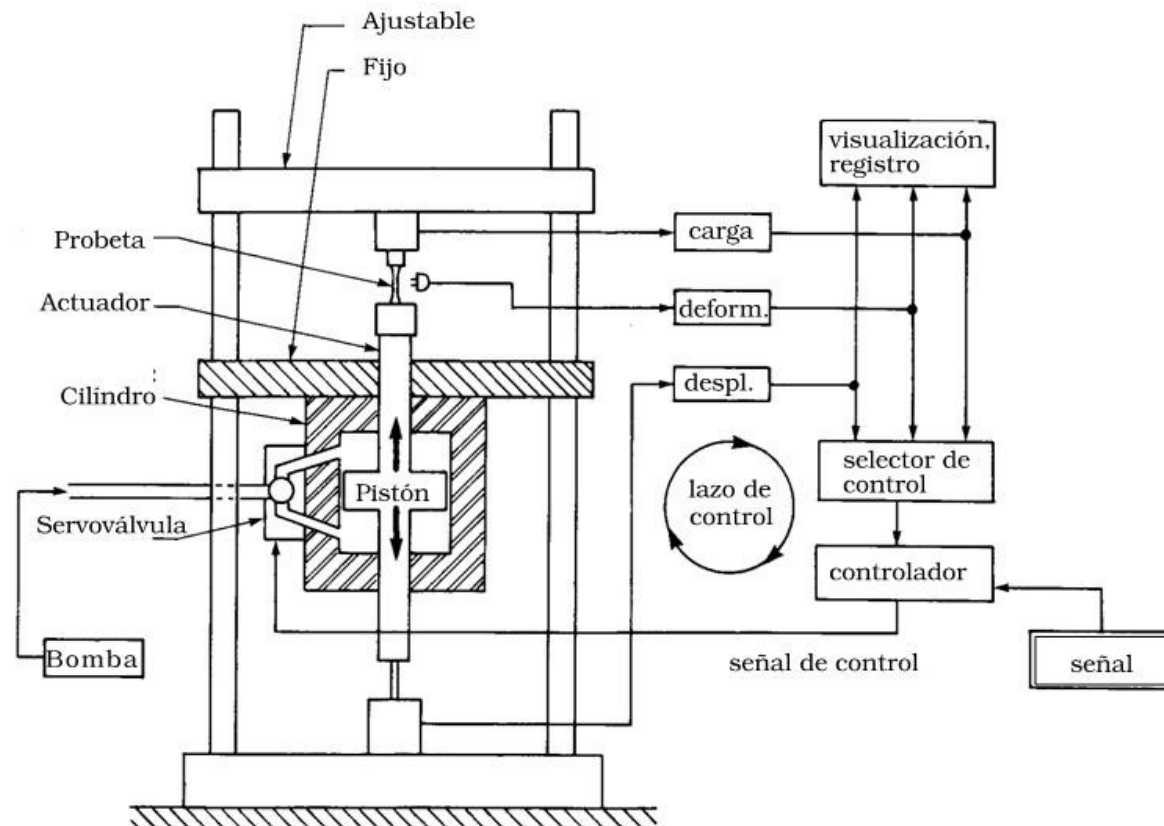
- Máquina de **Flexión Alternante**
 - Puede aplicar tensiones medias



RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

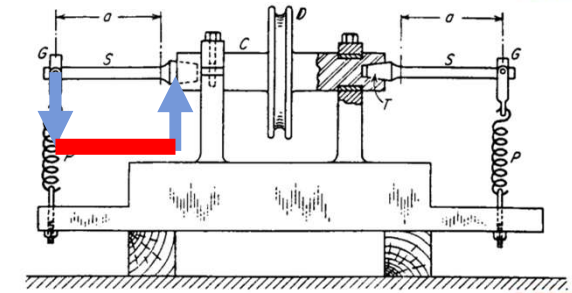
- Ensayos de Fatiga.
 - Máquina servohidráulica con control en lazo cerrado



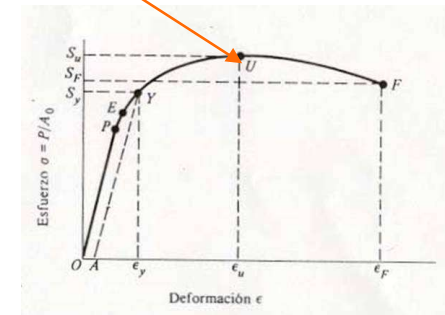
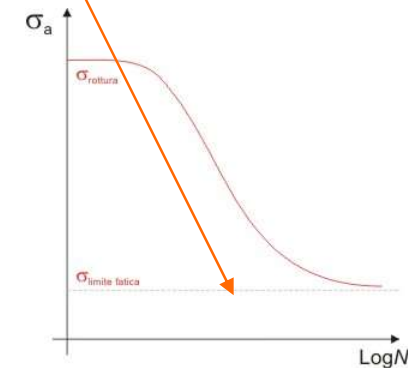
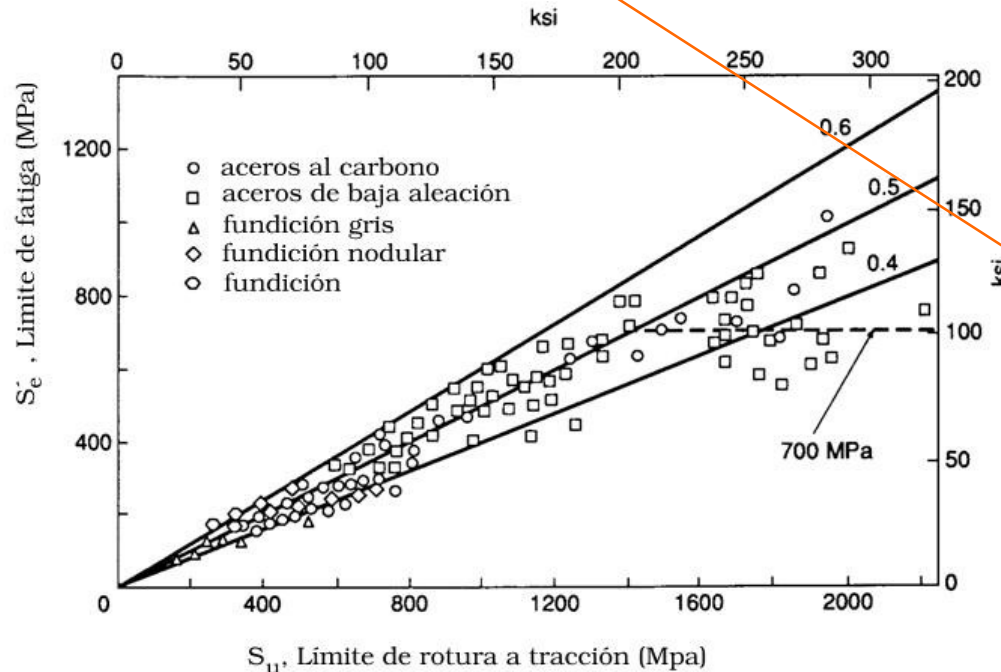
Se puede simular.
Tracción.
Alternante.
Fluctuante.
Pulsante.

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

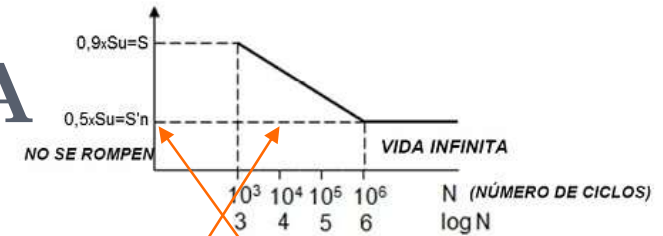


- Tendencias del **límite de fatiga en función de S_u**
 - Muchos datos procedentes del **ensayo de tracción del ensayo de fatiga rotativa**.
 - En la figura se representan puntos provenientes de un gran número de ensayos sobre **probetas lisas**
 - Se busca la correlación entre el **límite de fatiga S'_e** y el **límite de rotura a tracción (S_u)**



RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N ACEROS

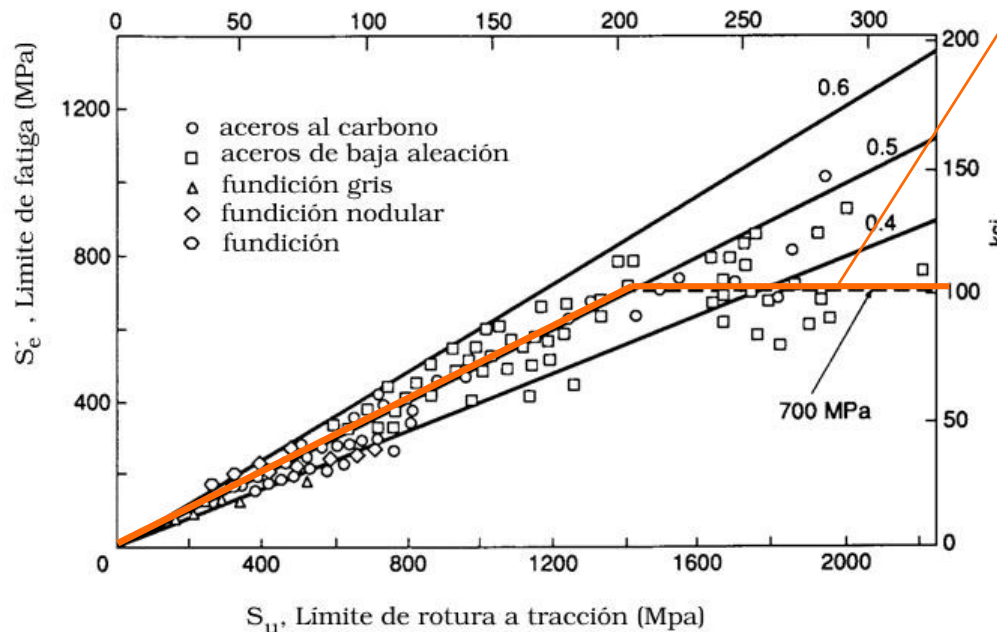


Teoría Clásica priman los esfuerzos S_n valida para más 1000 ciclos

○ Tendencias del **límite de fatiga en función de S_u**

- Del gráfico se podría deducir que el límite de fatiga obtenido en ensayo de probeta giratoria está comprendido entre el **40% y el 60% de la resistencia a rotura para aceros con $S_u < 1400 \text{ MPa}$.**
- La dispersión aumenta, pero aparece una tendencia a estabilizarse el valor límite de fatiga en **$S'_e = 700 \text{ MPa}$**

**Estimación
aceros
 $S_u < 1400 \text{ MPa}$
 $S'_e = 0,5 S_u$**



• **S_u** es el límite de rotura a tracción mínimo esperable del material.

• Se utiliza el símbolo ' en la definición de **S'_e** para indicar que es el límite de fatiga de la probeta lisa de flexión rotatoria. **TEORICO**

• Se reserva el símbolo **S_e** para el límite de fatiga del punto del componente mecánico a analizar. **REAL**

37

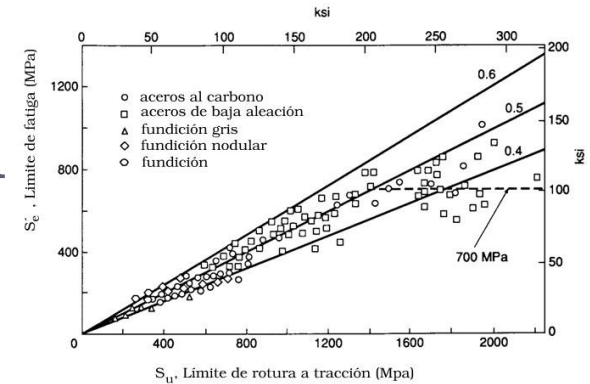
Teoría bajo número de ciclos priman los deformación local ϵ_n es la **Dr** valida para menos 1000 ciclos. **Pocas piezas. No se estudia.**



UNIVERSIDAD
NEBRIJA

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N



○ Dispersión

- La dispersión obtenida **no es imputable al límite de rotura** del material.
- **La dispersión se mantiene aunque S_u sea básicamente constante.**
- Por esto, la estimación del límite de fatiga de la probeta S'_e que se puede realizar a partir del límite de rotura del material S_u , puede diferir notablemente del resultado de los ensayos de fatiga realizados sobre el material.
- **Esto deberá tenerse en cuenta al considerar el coeficiente de seguridad a aplicar en diseño.**
- Además, **la relación entre S'_e y S_u disminuye a medida que S_u aumenta.**
- En general, para un material dado, **a medida que se dispone de un mayor S_u , el material es relativamente menos dúctil.**
- Por tanto **un grado razonable de ductilidad es útil para disponer de resistencia a la carga cíclica.**
- El no apreciar este hecho puede dar lugar a **fallos por fatiga en situaciones en las que no fue previamente un problema (por ejemplo cuando se sustituyen materiales iniciales por otros de alta resistencia para reducir el peso en vehículos)**

RESISTENCIA A LA FATIGA

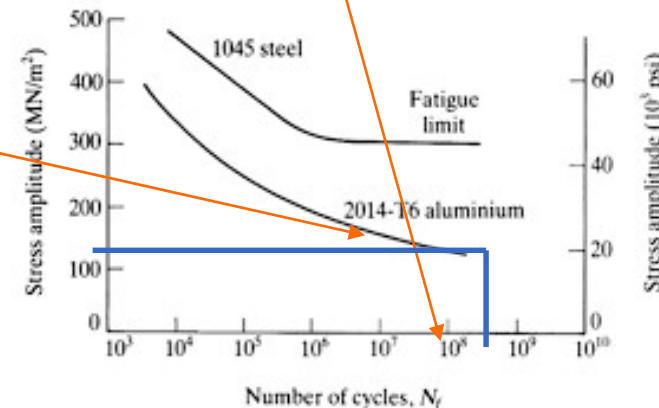
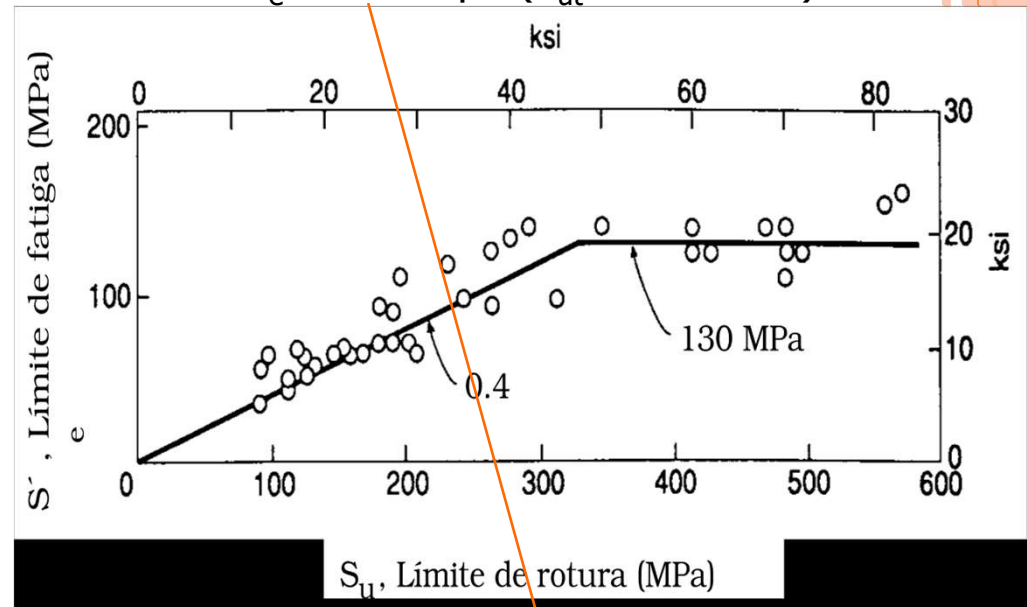
5. DIAGRAMA S-N

○ Aleaciones de **Aluminio**

- Gráfico **similar** para aleaciones de aluminio laminado para **5×10^8 ciclos.**
- Aquí no existe un verdadero límite de fatiga ya que la curva **S-N** no tiende asintóticamente a la horizontal, sino que continúa decreciendo a medida que aumenta el número de ciclos.

$$S'_e = 0.4 S_{ut} \quad (S_{ut} < 325 \text{ MPa})$$

$$S'_e = 130 \text{ MPa} \quad (S_{ut} > 325 \text{ MPa})$$

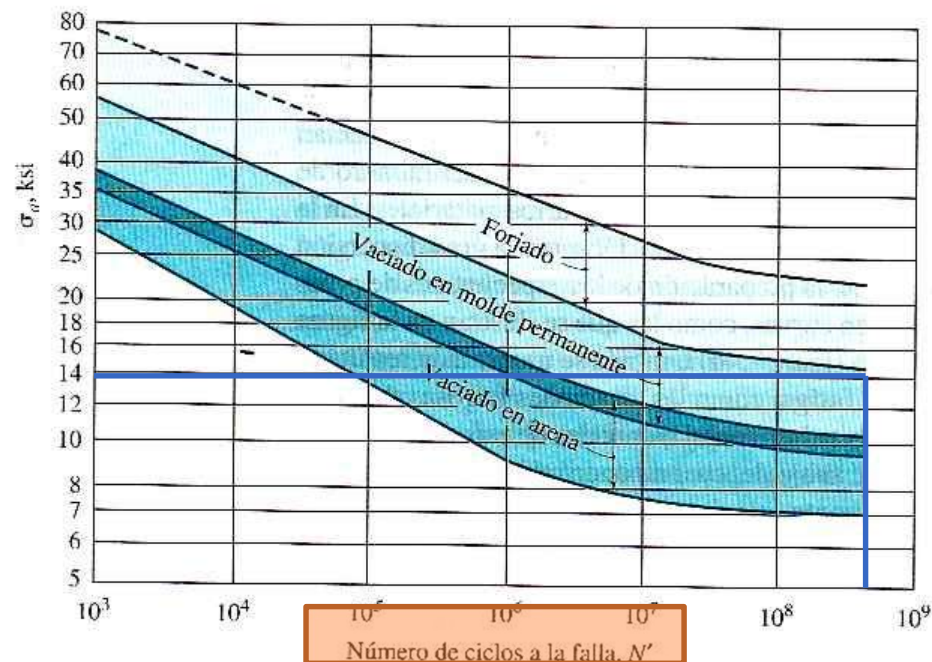


RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

○ Aleaciones de Aluminio

- No tienen codo claro
- A partir de $1E7$ la pendiente se reduce
- Normalmente se toma S' como esfuerzo medio a la falla a $N=5E8$ ciclos. (5×10^8)

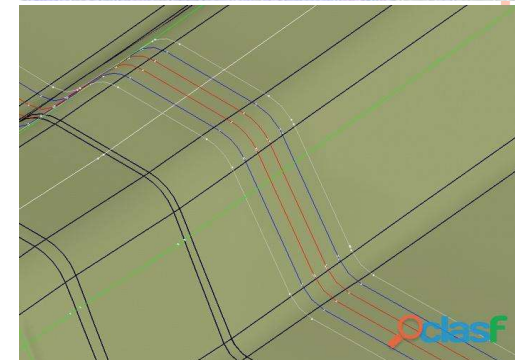
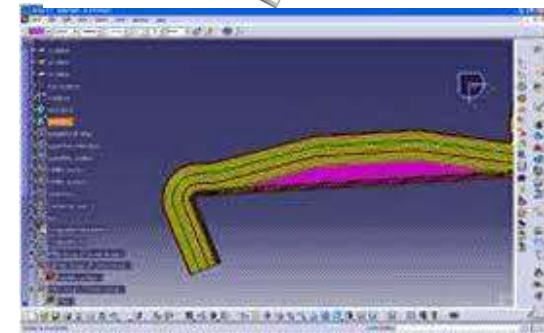
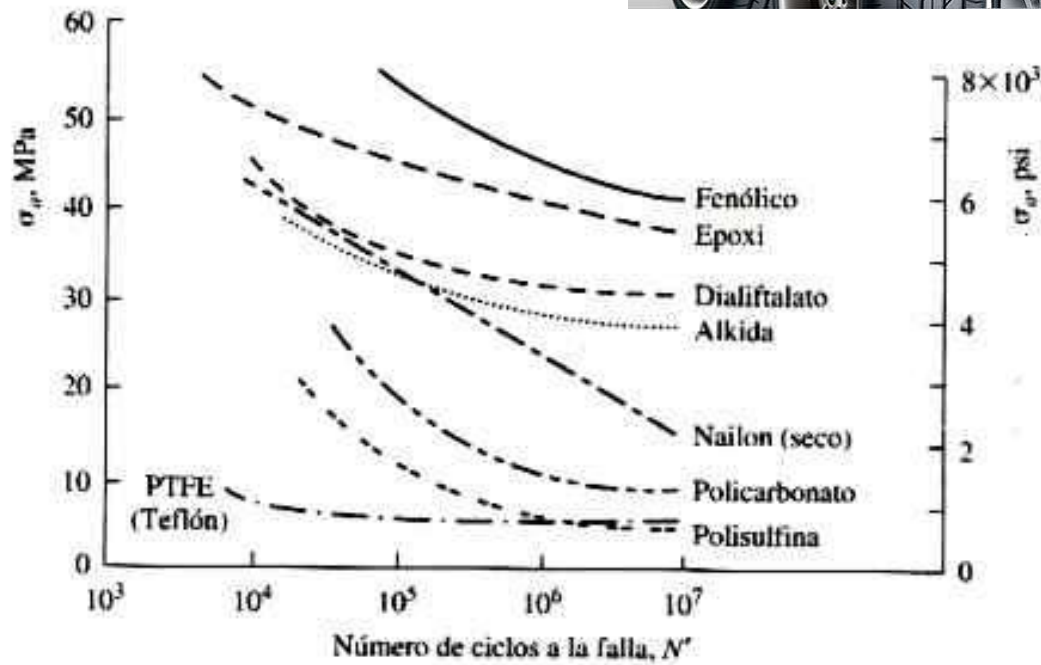
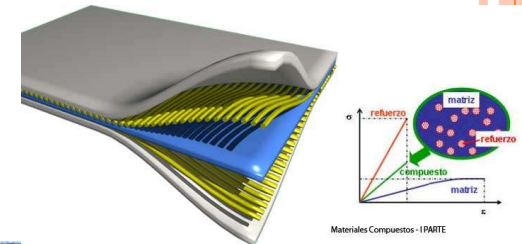


ALEACIONES DE ALUMINIO

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

Polímeros



POLÍMEROS

Fuente: Hamrock (2000)

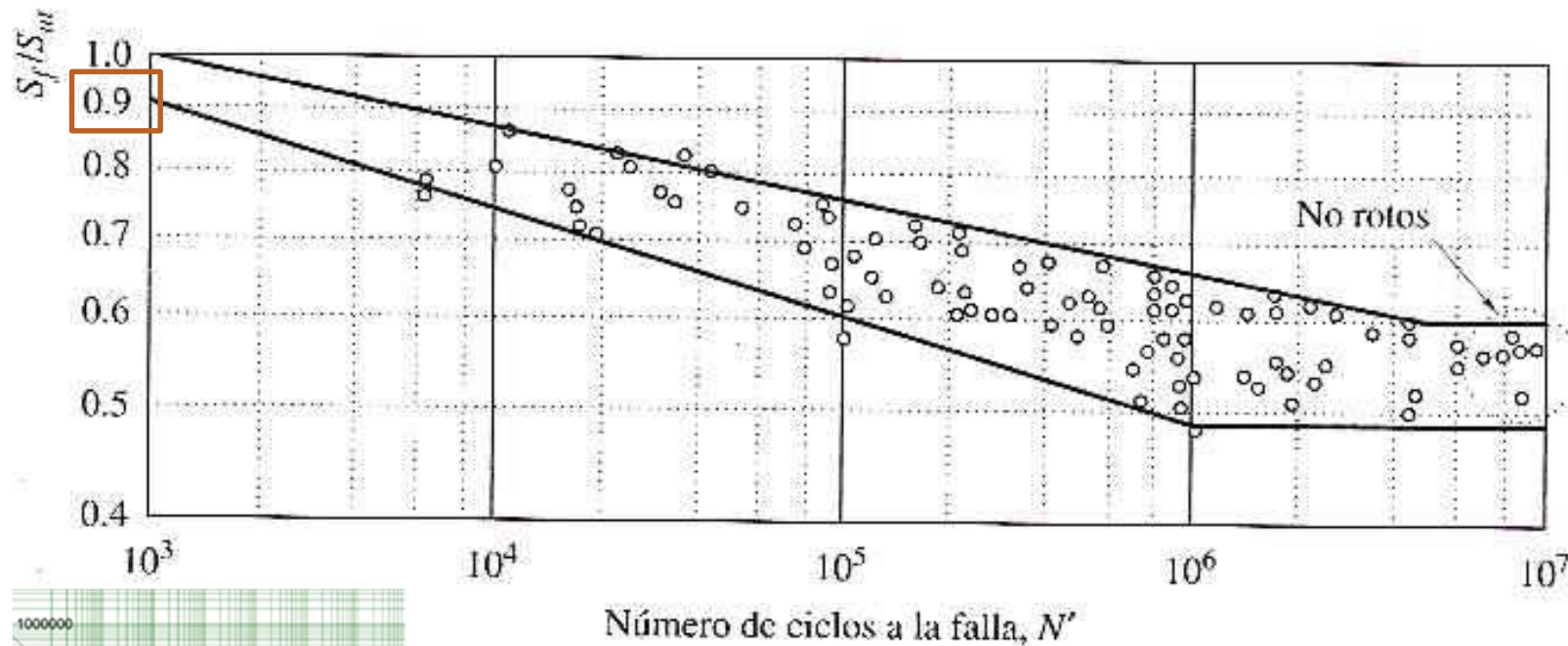
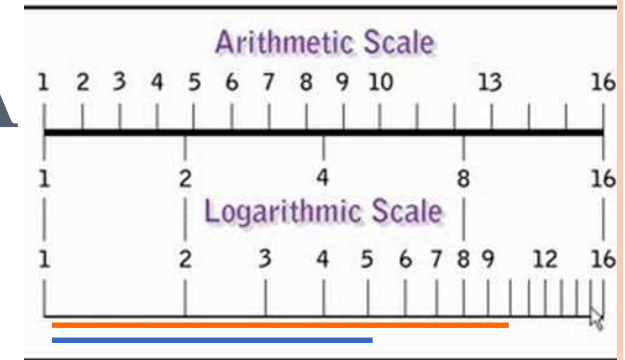
41

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

- Materiales férricos

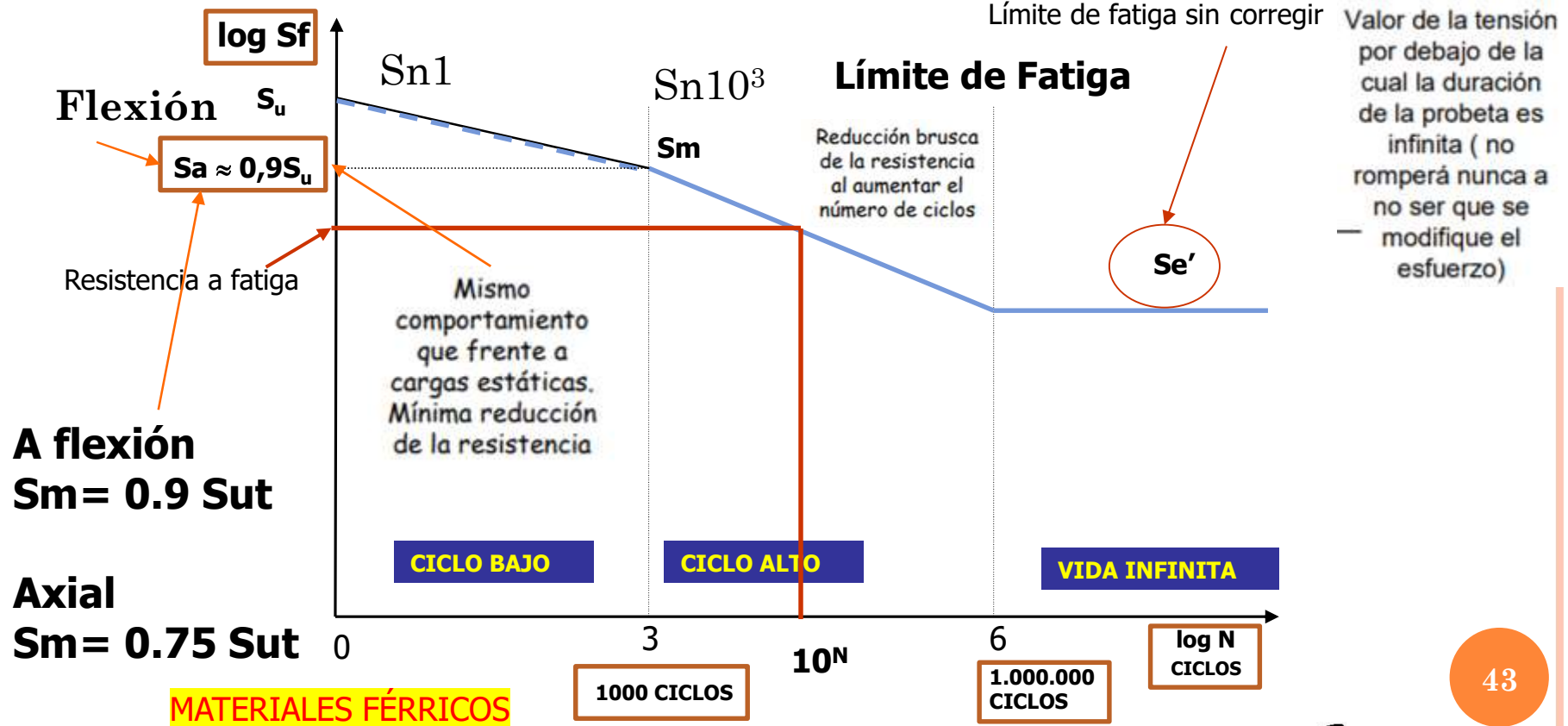
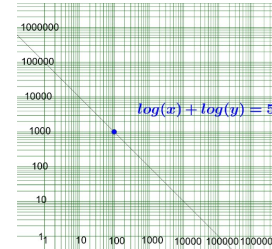
Correlación S_f/S_{ut}



RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

El diagrama



RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

- Valor de **S_m (en 10^3 ciclos)** ¿Cómo se obtiene?
 - Bibliografía
 - Ensayos anteriores
 - Aproximaciones

A flexión

$$S_m = 0.9 S_{ut}$$

Axial

$$S_m = 0.75 S_{ut}$$

En función esfuerzo

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

- Valor de S'_e (en 10^6 ciclos) . ¿Cómo se obtiene?
 - Bibliografía
 - Ensayos anteriores
 - Aproximaciones

Aceros

$$\begin{array}{ll} S'_e = 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \\ S'_e = 700 \text{ MPa} & S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa} \end{array}$$

Hierros

$$\begin{array}{ll} S'_e = 0.4 S_{ut} & S_{ut} \leq 400 \text{ MPa} \\ S'_e = 160 \text{ MPa} & S_{ut} \geq 400 \text{ MPa} \end{array}$$

Aluminios

$$\begin{array}{ll} S'_e = 0.4 S_{ut} & S_{ut} \leq 330 \text{ MPa} \\ S'_e = 130 \text{ MPa} & S_{ut} \geq 330 \text{ MPa} \end{array}$$

Aleaciones cobre

$$\begin{array}{ll} S'_e = 0.4 S_{ut} & S_{ut} \leq 280 \text{ MPa} \\ S'_e = 100 \text{ MPa} & S_{ut} \geq 280 \text{ MPa} \end{array}$$

En función material



RESISTENCIA A LA FATIGA

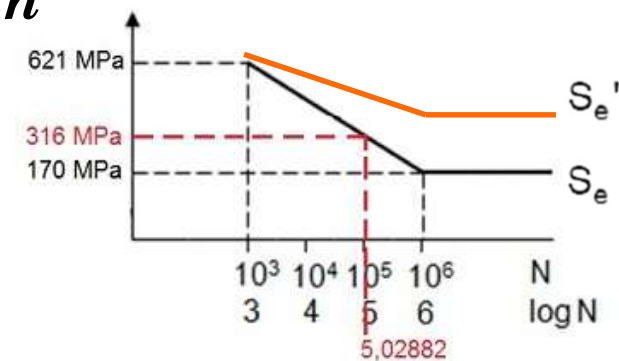
6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Ecuación

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

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

- Los K_i son los “*Coeficientes de Marin*”
 - **Ka**: Factor de **acabado superficial**
 - **Kb**: Factor de **tamaño**
 - **Kc**: Factor de **modificación de carga**
 - **Kd**: Factor de **temperatura**
 - **Ke**: Factor de **fiabilidad**
 - **1/Kf**: Factor de **concentración de tensiones**
 - **Kg**: Factor de **efectos diversos**
- Se obtienen experimentalmente.



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

Sut en MPa

Si $K_a > 1 \rightarrow K_a = 1$

○ **Ka: Factor de acabado superficial**

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

○ Ensayo de probeta rotatoria

- **Probeta pulida (a espejo)** con pulimento fino en dirección axial

○ Pieza real

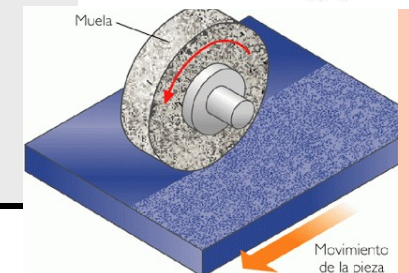
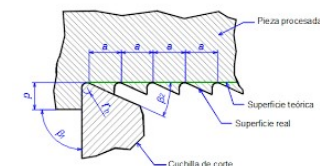
- Peor acabado superficial $\Rightarrow \downarrow S_e$
- Mayor rugosidad en la superficie que produce un fenómeno de concentración de tensiones

Hierro Fundido

$K_a = 1$

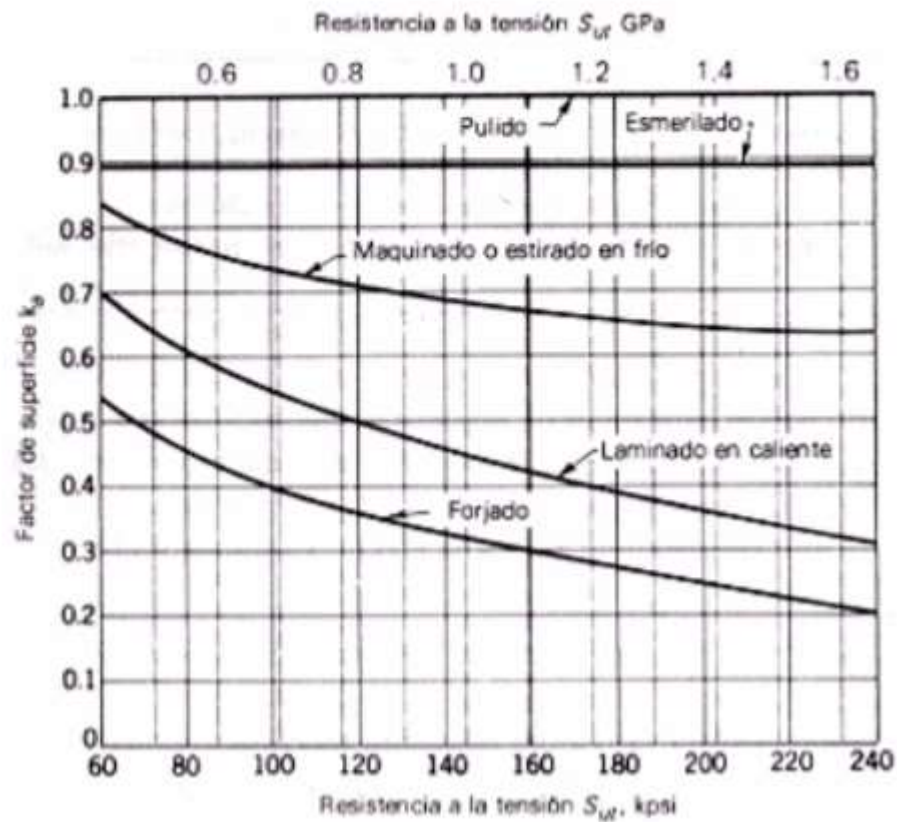
○ Función de:

- Calidad del **acabado superficial**
- Resistencia última del material ($\uparrow S_u \Rightarrow \downarrow S_e$)
- **Para ciclos bajos (<1000) se puede tomar siempre $K_a = 1$**



Acabado superficial	Coefficiente 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 para el ACERO



Sut en MPa

Si $K_a > 1 \rightarrow K_a = 1$

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

Hierro Fundido

$K_a = 1$

Fundición.

Concentración de tensiones

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Ka: Factor de acabado superficial

- Los valores presentados corresponden a resultados experimentales en aceros.
- Deben usarse con precaución en materiales dúctiles no ferrosos.
- Los procesos de recubrimiento por electrodeposición, tales como el cromado, el niquelado, el cuprizado y el galvanizado minan significativamente la resistencia a la fatiga, por lo que el diseñador debe referirse a tablas y gráficas especiales.
- Procesos como el granallado (chorreado o arenado) ayudan a recuperar posteriormente la resistencia a la fatiga.

Procesos térmicos que liberan tensiones. Por ej. **Recocido.**

RECOCIDO

Calentamiento y posterior enfriamiento lento y controlado.

Lo que se consigue es mejora del material por refinamiento del grano y también alivio de tensiones internas generadas durante el proceso de fabricación.

Deja tensiones de compresión al impactar.



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ **Kb: Factor de tamaño**

- Ensayo de probeta rotatoria
 - **Probeta con sección circular**, diámetro normalizado (7.5 a 12.5 mm)
- Pieza real
 - Sección circular / diámetro diferente
 - **En 10^3 : $K_b = 1$ (no influye el tamaño)**
 - **En 10^6 : el diámetro de probeta influye en flexión y torsión, no con carga axial**
- Flexión / Torsión [Shigley. Pag. 280]

$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

$$2,79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$$

$$K_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$$

$$51 \leq d \text{ (mm)} \leq 254$$

$$K_b = 0,6$$

$$d \text{ (mm)} > 254$$

• Carga Axial

- **Kb=1** (Sólo para sección circular. Pero ver Kc)

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN



○ Kb: Factor de tamaño

- Gran parte de los datos de fatiga se obtienen de **probetas con diámetro 7.62 mm**
- Para componentes **más pequeños que la probeta** los límites obtenidos son un poco superiores. **7,62 mm (0,3 inch)**
- Para **tamaños mayores, el límite de fatiga disminuye.**
- Los ensayos de fatiga para tamaños grandes son muy costosos y los datos experimentales son limitados
- ¿Qué hacer cuando una **barra redonda en flexión no gira?**
- ¿Qué hacer cuando se utiliza una **sección no circular?**
- **Pieza real**
 - Sección no circular
 - Mismas ecuaciones. Se considera d = (Diámetro efectivo)

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

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

	d2	0,95^2d	d2-(0,95d)2	A0.95
	1	0,903	0,098	0,0766

○ Kb: Factor de tamaño

- Diámetro efectivo: “*Diámetro que se obtiene al igualar el volumen de material sometido a esfuerzo igual o superior a 95% del esfuerzo máximo con el mismo volumen en la muestra de viga rotativa*”.
- Sección de viga rotatoria (caso más crítico)

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

- Sección rectangular hxb
(Ejemplo sólo para flexión)

No rotativa.

Flexión alternada.

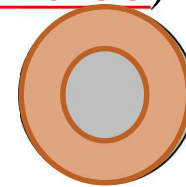
Dos puntos afectados.

$$A_{0,95} = 0,05 \cdot h \cdot b$$

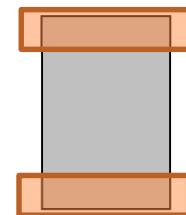
(I) = (II) →

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

(I)



(II)



SECCIÓN NO CIRCULAR
(Ejemplo: Sección rectangular)

$$(I) = (II) \longrightarrow$$

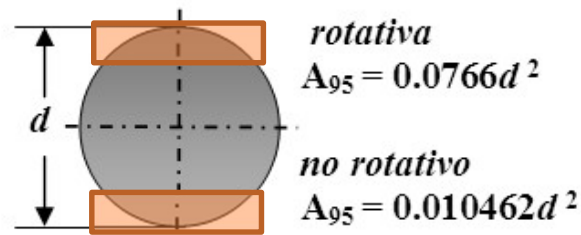
$$d_e = 0,808 \cdot (h \cdot b)^{1/2}$$

RESISTENCIA A LA FATIGA

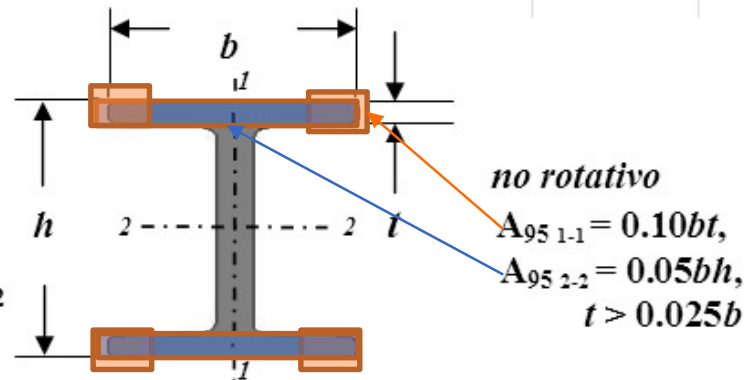
6. ECUACIÓN DE MARIN

- Kb: Factor de tamaño (otras secciones)**

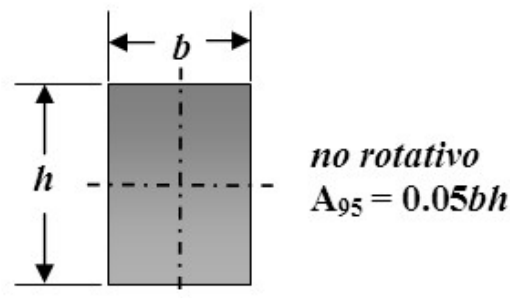
	A0.95 Cil rot		A0.95 Rectangular	
0,0766	de2	=	0,05 hb	tabla
	de2	=	0,653 hb	
	de	=	0,808 hb ^{1/2}	
	A0.95 Cil rot		A0.95 Cil est	Redondo solido o hueco
0,0766	de2	=	0,010462 d2	tabla
	de2	=	0,137 d2	
	de	=	0,370 d	



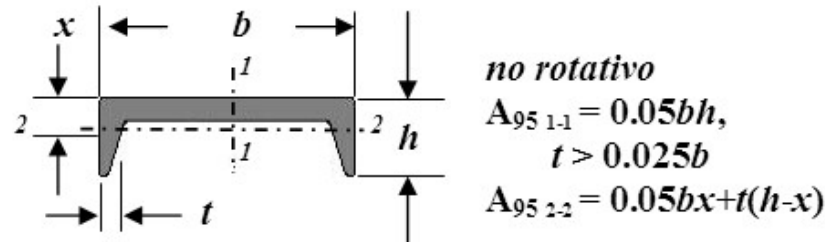
a) Redondo sólido o hueco



b) Viga en I



c) Rectangular sólido



d) Viga en I

$$(I) = (II) \longrightarrow$$

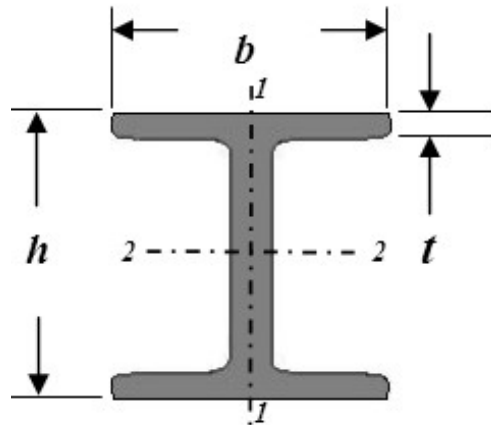
$$d_e = 0,808 \cdot (h \cdot b)^{1/2}$$

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

	A0.95 Cil rot		A0.95 Rectangular	
0,0766	de2	=	0,05 hb	tabla
	de2	=	0,653 hb	
	de	=	0,808 hb ^{1/2}	

o Kb A95 1-1 HEB 100. Flexión

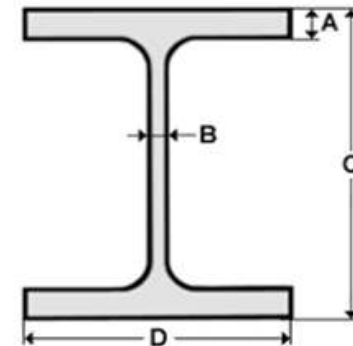


no rotativo

$$A_{95 \ 1-1} = 0.10bt,$$

$$A_{95 \ 2-2} = 0.05bh,$$

$$t > 0.025b$$



Profils HEB	Dimensions en mm				Poids en kg/ML
	C	D	B	A	
HEB 100	100	100	6	10	20,4

$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

$$K_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$$

$$K_b = 0,6$$

$$2,79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$$

$$51 \leq d \text{ (mm)} \leq 254$$

$$d \text{ (mm)} > 254$$

54

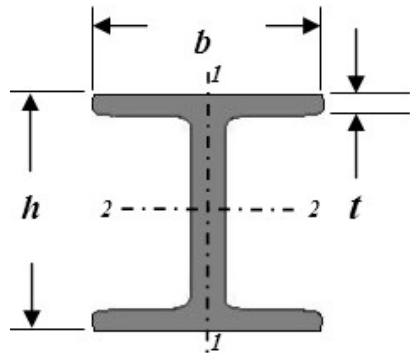
$$(I) = (II) \longrightarrow$$

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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ **Kb A95 1-1 HEB 100.**
Flexión

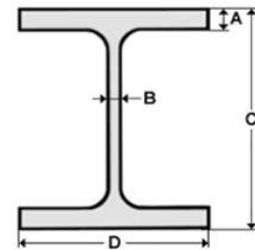


no rotativo

$$A_{95 \ 1-1} = 0.10bt,$$

$$A_{95 \ 2-2} = 0.05bh,$$

$$t > 0.025b$$



$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

$$K_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$$

$$K_b = 0,6$$

$$2,79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$$

$$51 \leq d \text{ (mm)} \leq 254$$

$$d \text{ (mm)} > 254$$

Profils HEB	Dimensions en mm				Poids en kg/ML
	C	D	B	A	
HEB 100	100	100	6	10	20,4

	A0.95 Cil rot		A0.95 11 HEB	Esfuerzo en z		
0,0766	de2	=	0,1 bt	tabla		
	de2	=	1,306 bt			
	de	=	1,143 (bt)^1/2			
			b	t	bt	bt^1/2
			100	10	1000	31,62
				(bt)^1/2		
	de	=	1,143	31,62	36,137	
	de<51	implica	kb	1,24d^-0,107		
				d		d^-0,107
	kb	=	1,24	36,137	-0,107	0,681
	Kb	=	0,845			

55

UNIVERSIDAD
NEBRIJA

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ **Kc: Factor de modificación de carga**

Probeta a flexión rotativa.

- Carga a flexión: **$K_c = 1$**
- Carga axial: **$K_c = 0,85$** (Otros autores **$K_c=0,7$**)
- Carga torsión (sólo para fatiga torsional): **$K_c = 0.59$**
- Carga torsión combinada con flexión: **$K_c = 1$**

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ **Kd: Factor de temperatura**

- Aplicable también para ciclos bajos (<1000)
- Fórmulas únicamente para Aceros

Norton Pag. 381

- $T \leq 450^{\circ}\text{C}$ $K_d=1$
- $450^{\circ}\text{C} \leq T \leq 550^{\circ}\text{C}$ $K_d=1-0,0058 \cdot (T-450)$

- No debe utilizarse para otros materiales
- Para temperaturas mayores la termofluencia adquiere un valor significativo y la curva S-N ya no tendrá un codo.
- Nota. Criterio diferente en **Shigley Pag. 283.**

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ **Kd: Factor de temperatura**

○ Shigley Pag. 283.

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

S_T = resistencia a la rotura por tensión a la temperatura de operación.

S_{RT} = resistencia a la rotura por tensión a la temperatura ambiente del lugar de trabajo.

CAPÍTULO 6 Fatigas por fatiga resultantes de carga variable

Tabla 6-4

Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero.*
(S_T = resistencia a la tensión a la temperatura de operación; S_{RT} = resistencia a la tensión a temperatura ambiente; $0.099 \leq \hat{\sigma} \leq 0.110$)

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		

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

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

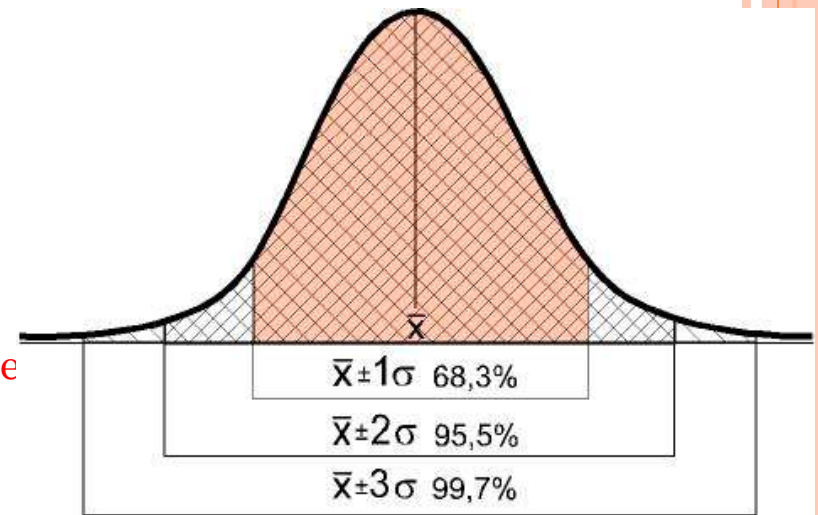


RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Ke: Factor de fiabilidad

- Permanencia de la calidad de los productos a lo largo del tiempo. **Capacidad de desarrollar adecuadamente su labor a lo largo del tiempo.**
- La Fiabilidad intenta garantizar que el producto permanecerá en buenas condiciones durante un periodo razonable de tiempo.
- Datos según una **distribución normal** con **desviación estándar** supuesta de 8% (lo observado normalmente)

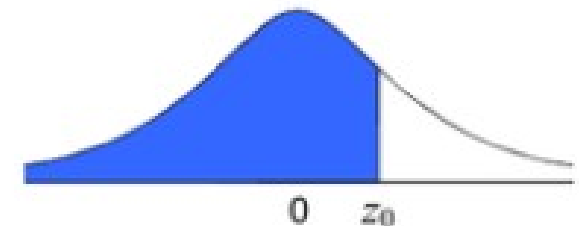


μ = Media

σ = Desviación típica

Tipificación: $z_0 = \frac{x - \mu}{\sigma}$

$$P(z \leq z_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_0} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

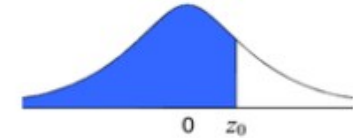
- Ke: Factor de fiabilidad

μ = Media

σ = Desviación típica

Tipificación: $z_0 = \frac{x - \mu}{\sigma}$

$$P(z \leq z_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_0} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$



z_0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	z_0
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359	0,0
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753	0,1
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141	0,2
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517	0,3
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879	0,4
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224	0,5
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549	0,6
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852	0,7
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133	0,8
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389	0,9
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621	1,0
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830	1,1
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015	1,2
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177	1,3
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319	1,4
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441	1,5
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545	1,6
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633	1,7
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706	1,8
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767	1,9
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817	2,0
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857	2,1
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890	2,2
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916	2,3
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936	2,4
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952	2,5
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964	2,6
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974	2,7
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981	2,8
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986	2,9
3,0	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99889	0,99893	0,99896	0,99900	3,0
3,1	0,99903	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929	3,1
3,2	0,99931	0,99934	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950	3,2
3,3	0,99952	0,99953	0,99955	0,99957	0,99958	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965	3,3
3,4	0,99966	0,99968	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976	3,4
3,5	0,99977	0,99978	0,99978	0,99979	0,99980	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99983	3,5
3,6	0,99984	0,99985	0,99985	0,99986	0,99986	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988	0,99989	3,6
3,7	0,99989	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	3,7
3,8	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99995	3,8
3,9	0,99995	0,99995	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99997	0,99997	3,9

$1-\alpha$	90%	92%	94%	95%	96%	97%	98%	99%
α	10%	8%	6%	5%	4%	3%	2%	1%
$z_{\alpha/2}$	1,645	1,751	1,881	1,960	2,054	2,170	2,326	2,576
z_{α}	1,282	1,405	1,555	1,645	1,751	1,881	2,054	2,326

Siendo:

$1-\alpha$ = Nivel de confianza

α = Nivel de significación

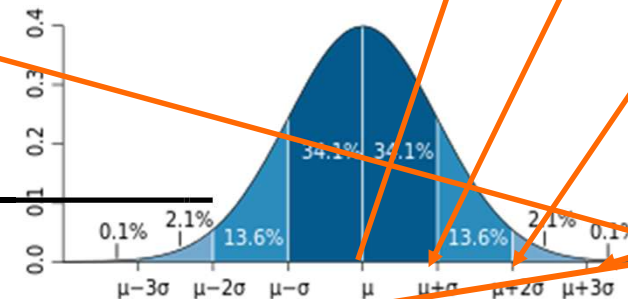
RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Ke: Factor de fiabilidad

<i>Fiabilidad</i>	<i>Factor de fiabilidad Kc</i>
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

Reliability, %	Transformation Variate z_0	Reliability Factor k_0
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



z_0	0,00
0,0	0,5000
0,1	0,5398
0,2	0,5793
0,3	0,6179
0,4	0,6554
0,5	0,6915
0,6	0,7257
0,7	0,7580
0,8	0,7881
0,9	0,8159
1,0	0,8413
1,1	0,8643
1,2	0,8849
1,3	0,9032
1,4	0,9192
1,5	0,9332
1,6	0,9452
1,7	0,9554
1,8	0,9641
1,9	0,9713
2,0	0,9772
2,1	0,9821
2,2	0,9861
2,3	0,9893
2,4	0,9918
2,5	0,9938
2,6	0,9953
2,7	0,9965
2,8	0,9974
2,9	0,9981
3,0	0,99865
3,1	0,99903
3,2	0,99931
3,3	0,99952
3,4	0,99966
3,5	0,99977
3,6	0,99984
3,7	0,99989
3,8	0,99993
3,9	0,99995

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

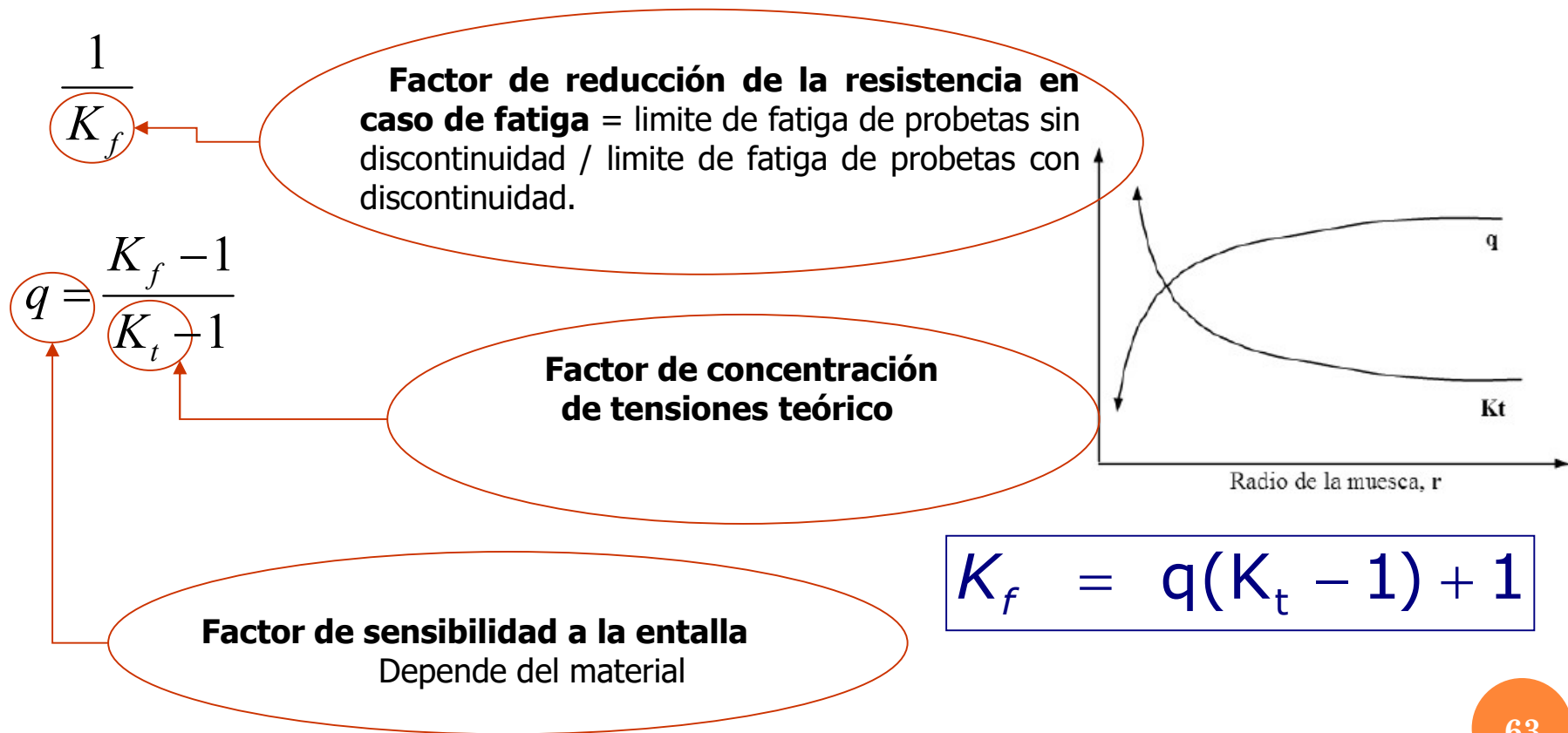
- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones
 - Aplicación:

MATERIAL	CARGA ESTÁTICA	CARGA FATIGA
Dúctil	1.0	K_f
Frágil	K_t	K_f
Fundición	1.0	K_f

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones



RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

6. ECUACIÓN DE MARIN

- 1/K_f: Factor de concentración de tensiones

$$\frac{1}{K_f}$$

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

Factor de concentración de tensiones teórico

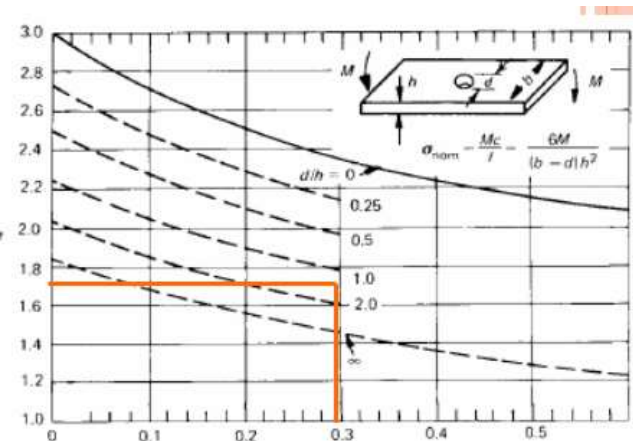
Geometría.

Tipo de entalla.

Tipo de esfuerzo.

Factor de sensibilidad a la entalla

Depende del material
Tamaño entalla



¿Qué coeficiente K_t aplicaríamos en el siguiente caso?

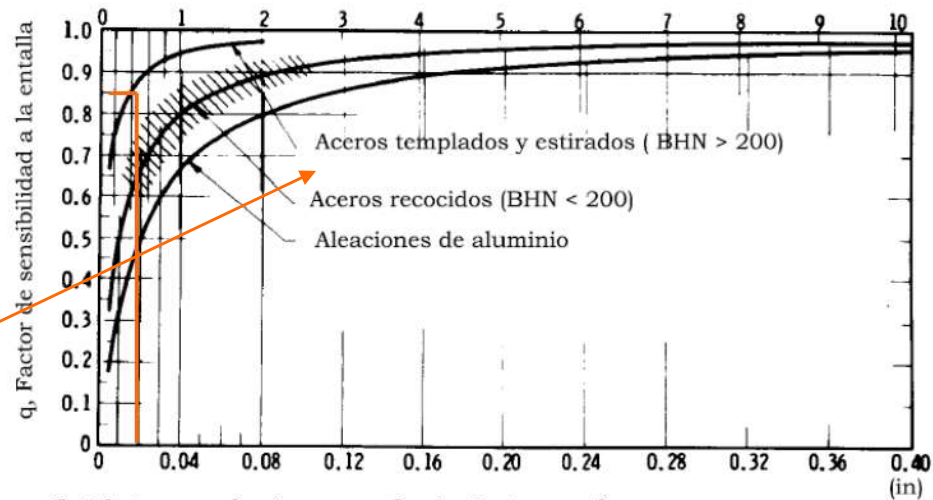
- Momento flector: b=10 mm, d=3 mm, h=2 mm

b	10
d	3
h	2
d/b	0,30
d/h	1,50

98

K_t 1,7

p, radio de la entalla (mm)



¿Qué factor q emplearíamos para los siguientes casos?

- Acero templado y estirado con radio de entalla 0.4 mm
- Aleación de aluminio con radio de entalla 2 mm

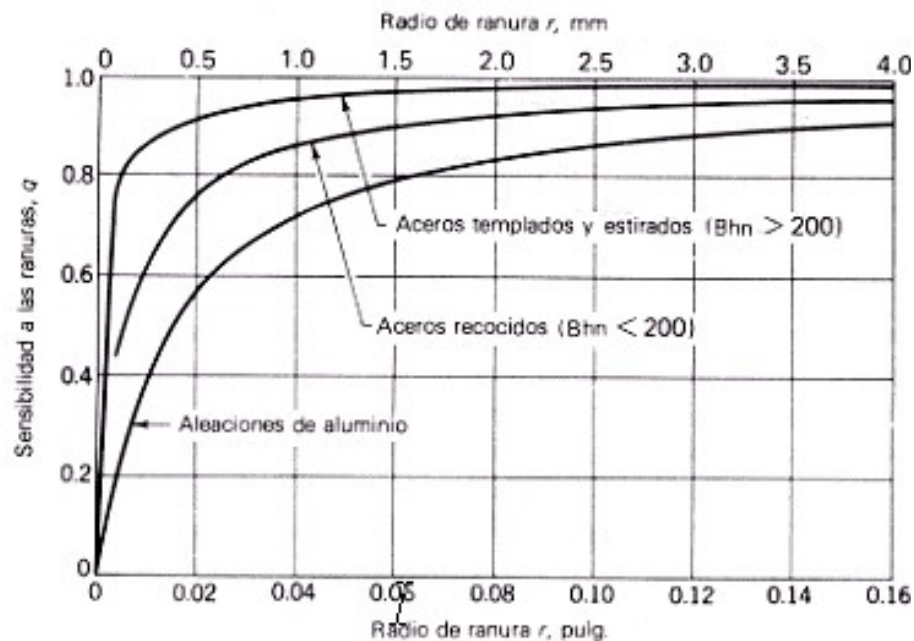
25,4 mm	1 pulgadas
0,4 mm	0,02 pulgadas
q=	0,85

RESISTENCIA A LA FATIGA

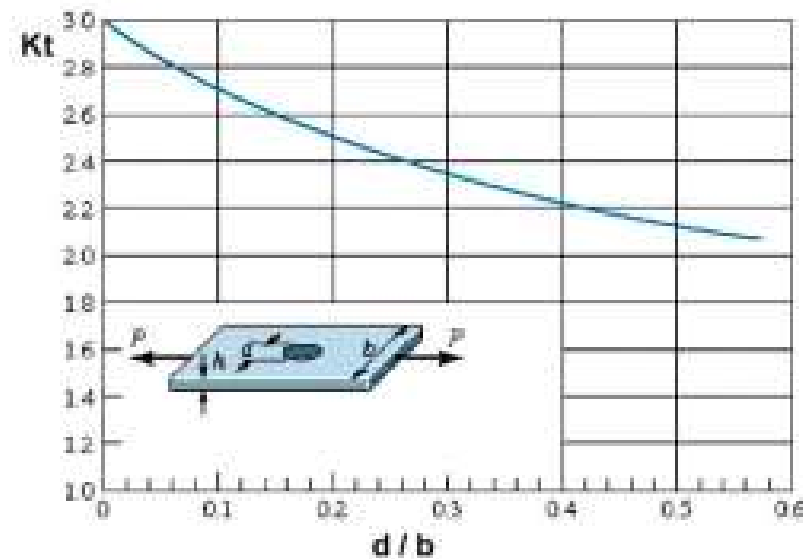
6. ECUACIÓN DE MARIN

- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones

q (Sensibilidad a la entalla)



K_t (Factor de concentración de tensiones teórico)



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones
 - Constante de Neuber (a) para aceros
 - Para torsión tomar 138 MPa más en S_u

S_u		$\sqrt{a}$			
		Carga axial y flexión		Torsión	
(ksi)	(MPa)	(in ^{0.5})	(mm ^{0.5})	(in ^{0.5})	(mm ^{0.5})
50	345	0.130	0.66	0.093	0.47
55	380	0.118	0.59	0.087	0.44
60	415	0.108	0.54	0.080	0.40
70	485	0.093	0.47	0.070	0.35
80	550	0.080	0.40	0.062	0.31
90	620	0.070	0.35	0.055	0.28
100	690	0.062	0.31	0.049	0.25
110	760	0.055	0.28	0.044	0.22
120	825	0.049	0.25	0.039	0.20
130	895	0.044	0.22	0.035	0.18
140	965	0.039	0.20	0.031	0.16
160	1100	0.031	0.16	0.024	0.12
180	1240	0.024	0.12	0.018	0.09
200	1380	0.018	0.09	0.013	0.07
220	1515	0.013	0.07	0.009	0.05
240	1655	0.009	0.05		

La sensibilidad a la muesca q a partir de la fórmula de Kuhn-Hardrath, en términos de la constante a y del radio r de la muesca.

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

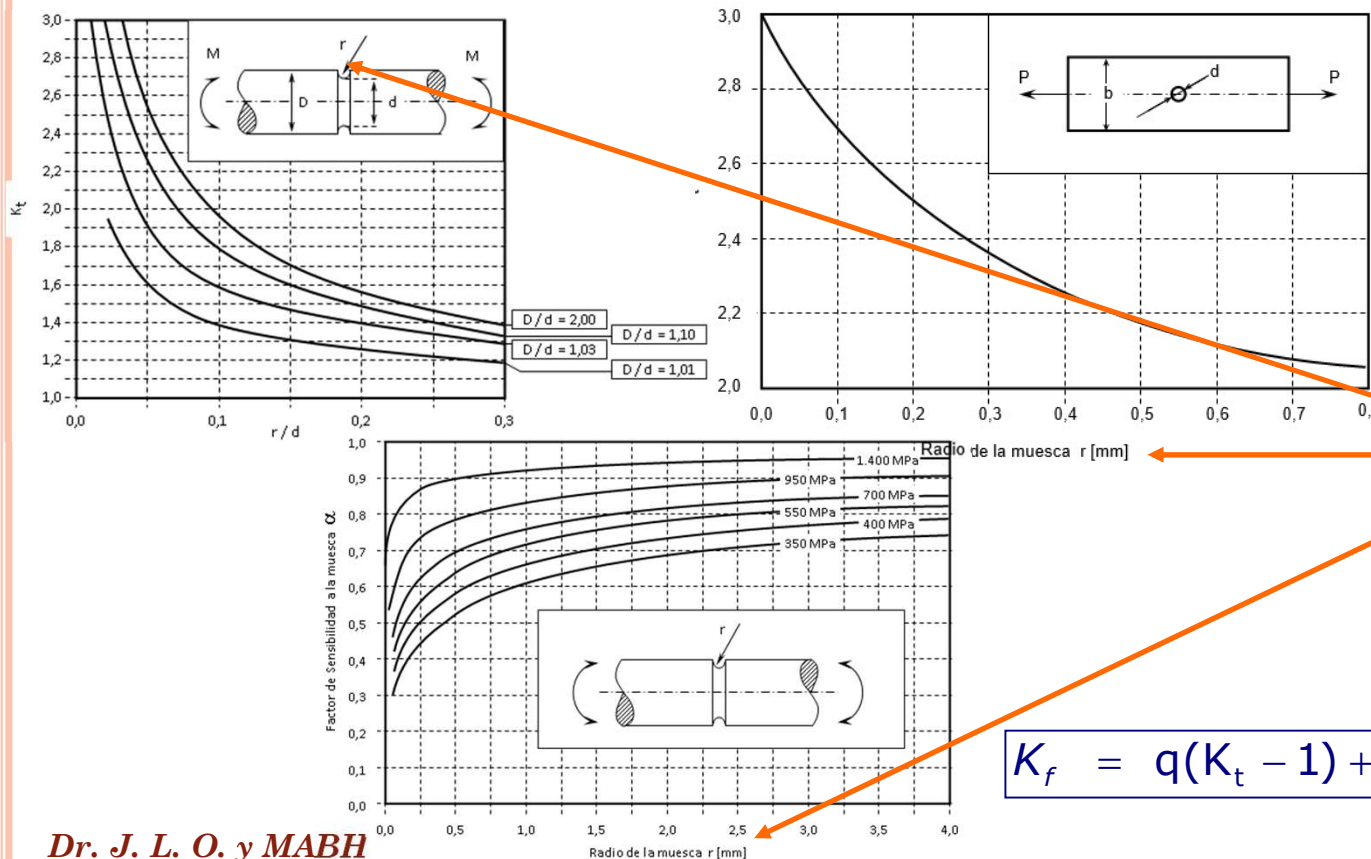
RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones

- Constante de Neuber (a) para aceros
- Para torsión tomar 138 MPa más en S_u

S_u		$\sqrt{a}$			
(ksi)	(MPa)	Carga axial y flexión		Torsión	
		(in ^{0.5})	(mm ^{0.5})	(in ^{0.5})	(mm ^{0.5})
50	345	0.130	0.66	0.093	0.47
55	380	0.118	0.59	0.087	0.44
60	415	0.108	0.54	0.080	0.40
70	485	0.093	0.47	0.070	0.35
80	550	0.080	0.40	0.062	0.31
90	620	0.070	0.35	0.055	0.28
100	690	0.062	0.31	0.049	0.25
110	760	0.055	0.28	0.044	0.22
120	825	0.049	0.25	0.039	0.20
130	895	0.044	0.22	0.035	0.18
140	965	0.039	0.20	0.031	0.16
160	1100	0.031	0.16	0.024	0.12
180	1240	0.024	0.12	0.018	0.09
200	1380	0.018	0.09	0.013	0.07
220	1515	0.013	0.07	0.009	0.05
240	1655	0.009	0.05		



La sensibilidad a la muesca q a partir de la fórmula de Kuhn-Hardrath, en términos de la constante a y del radio r de la muesca.

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

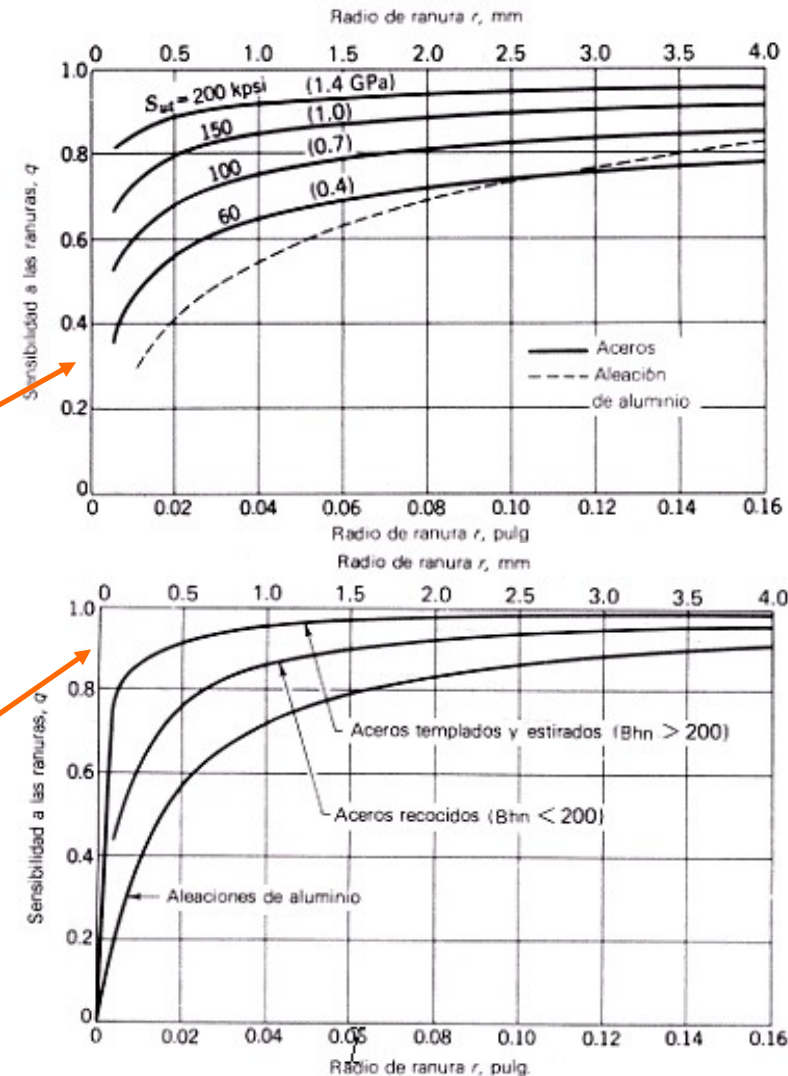
$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARTIN

$$1 \text{ PSI} = 6904.56 \text{ Pa}$$

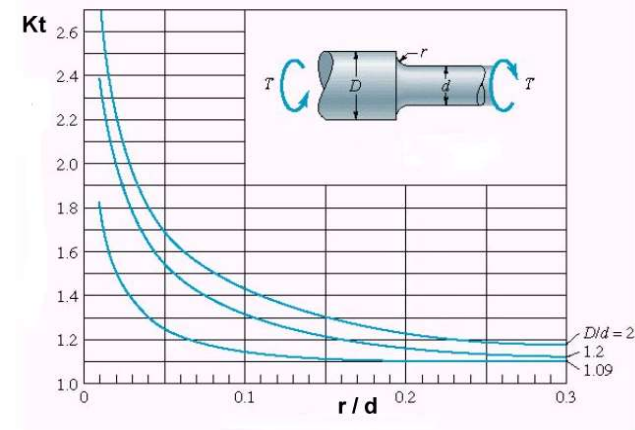
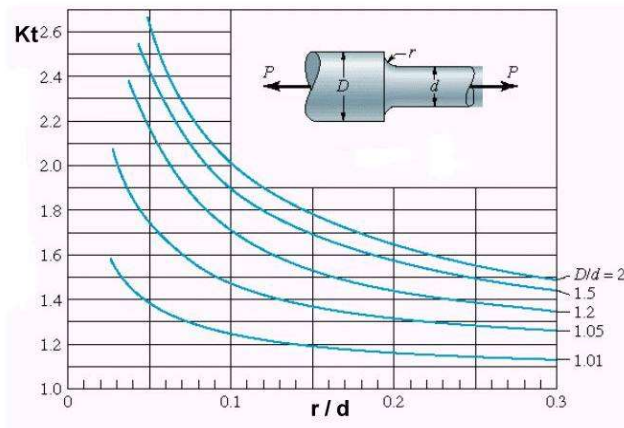
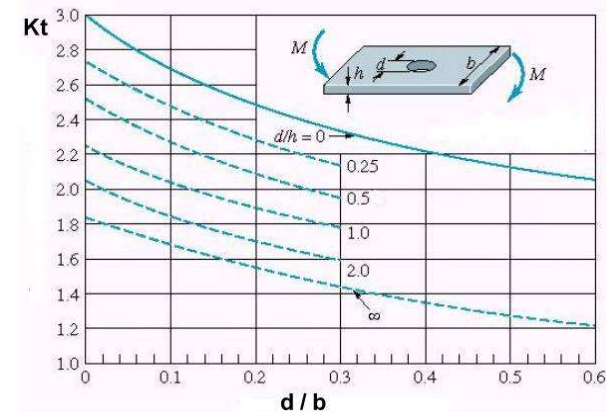
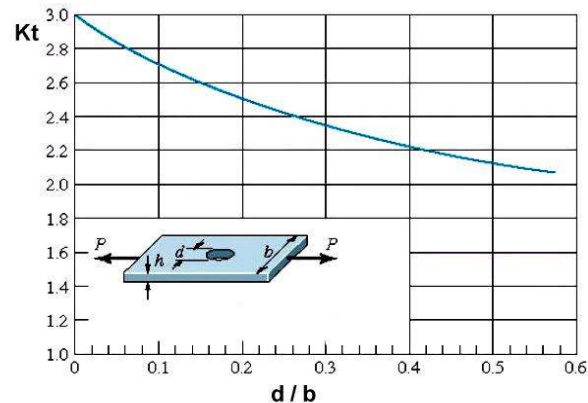
- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones
 - Sensibilidad a la entalla q
 - Sensibilidad a las ranuras. Cargas de flexión y axiales alternantes. Para radios de ranura mayores usar valores de q correspondientes a $r=4\text{mm}$
 - Sensibilidad a las ranuras. Cargas de torsión alternantes. Para radios de ranura mayores usar valores de q correspondientes a $r=4\text{mm}$



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

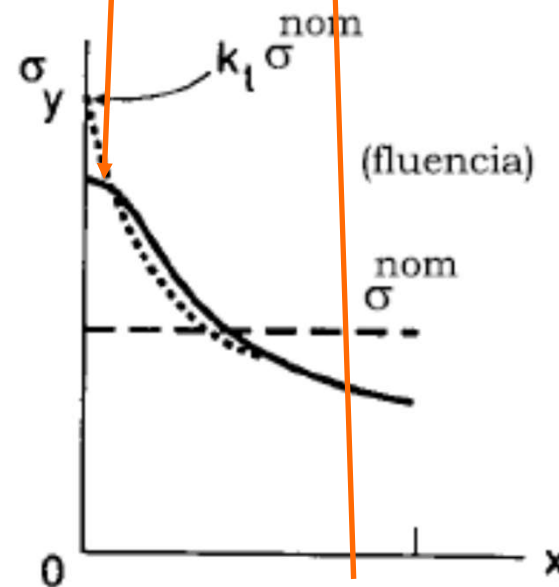
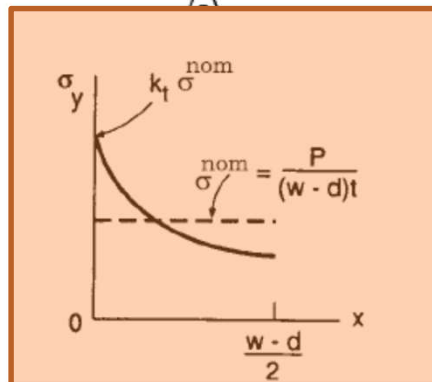
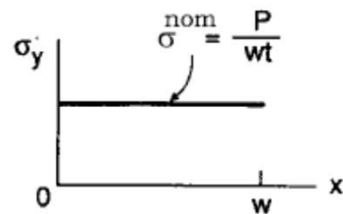
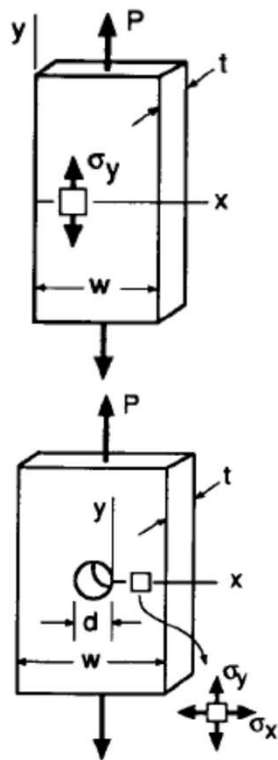
- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones.
 - Factor de concentración de tensiones teórico (K_t)



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

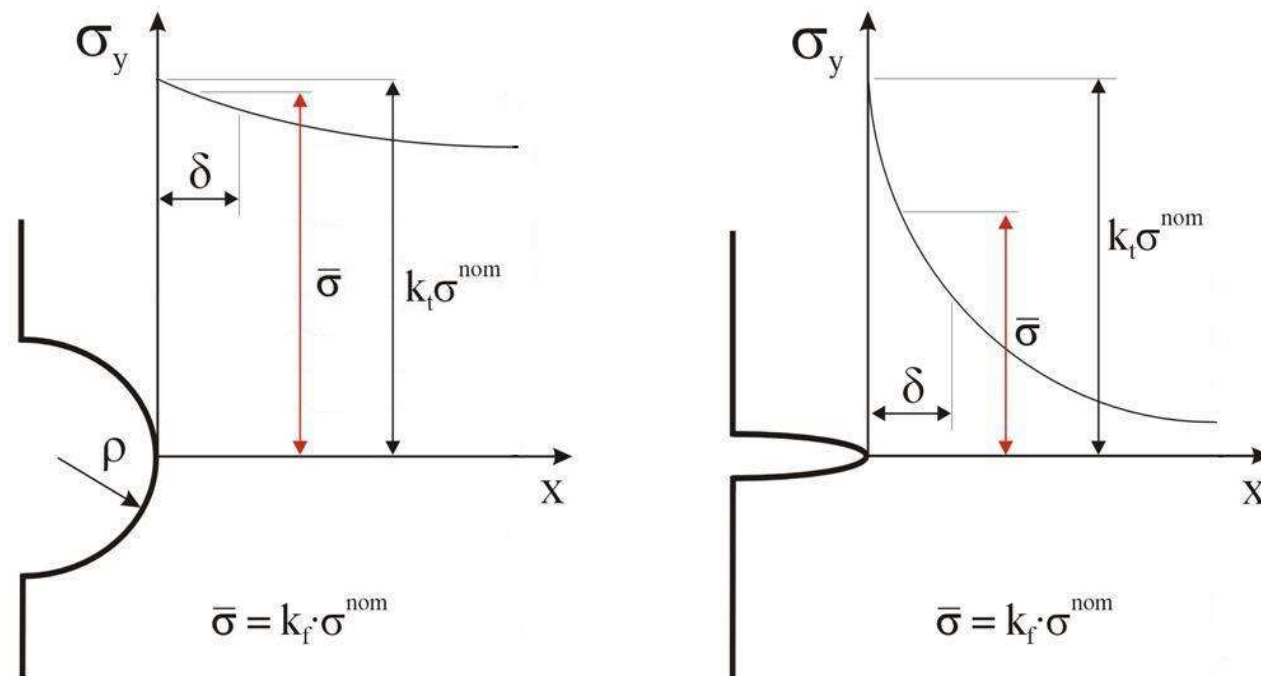
- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones.
 - Tensiones nominales y reales considerando tensión simple y componente con entalla, con y sin fluencia
 - **Cuanto más se acerque el diseño a la zona de bajo ciclo, más importante es la fluencia**



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones.
 - Necesario un espesor δ para el proceso de fatiga

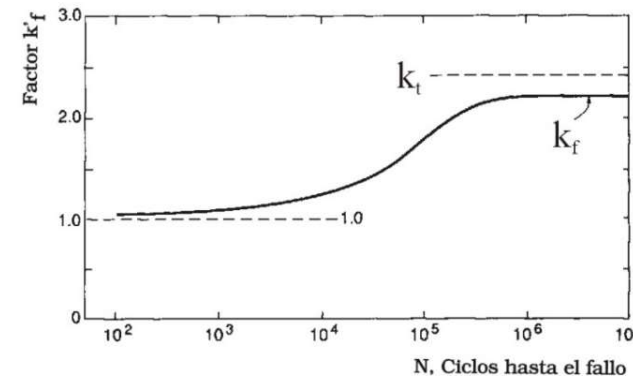
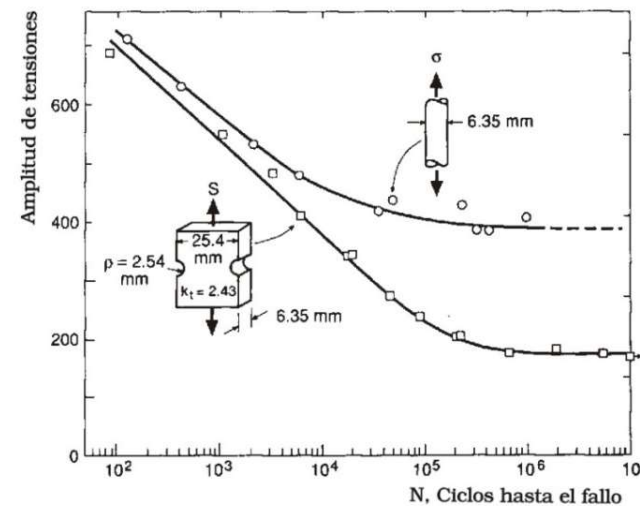
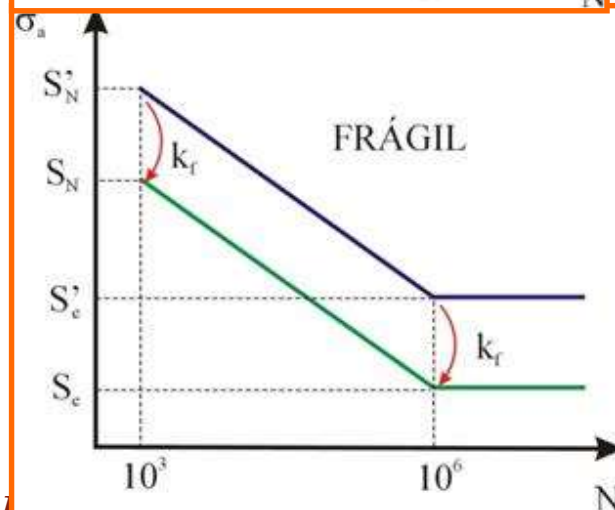
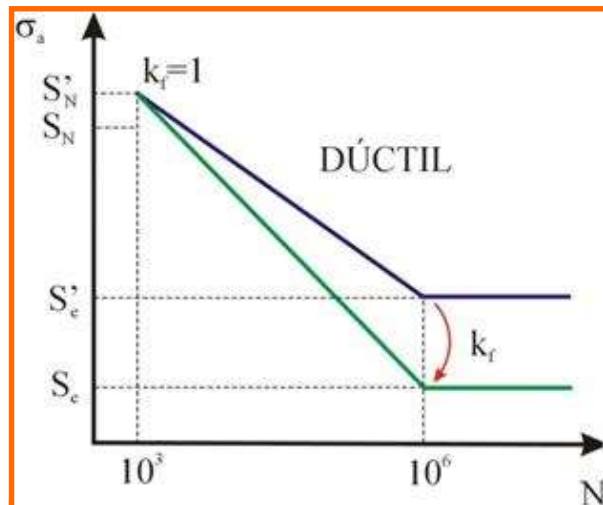


$$\rho \downarrow \Rightarrow \text{grad}(\sigma) \Rightarrow k_f / k_t \downarrow$$

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones.

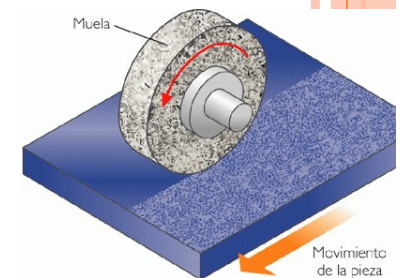
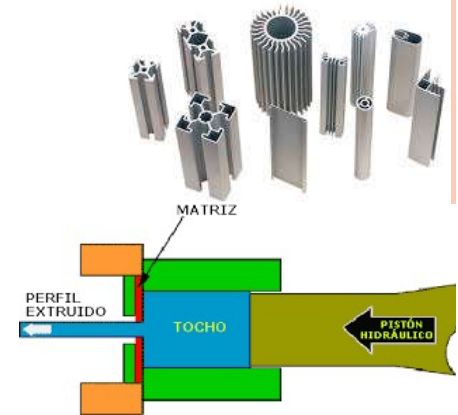


RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Kg: Factor de efectos diversos

- Datos experimentales. Algunos de ellos...
- **Tensiones residuales...**
 - ... de tracción: Acelera el crecimiento de grieta (forjado, extrusión, laminado,...)
 - ... de compresión: Retarda el crecimiento de grieta (granallado, recocido, ...)
- **Recubrimientos electrolíticos**
 - En general disminuyen Se (cromado, niquelado, etc.)
- **Corrosión**
 - La corrosión disminuye Se (concentración de tensiones)
 - Por deterioro superficial

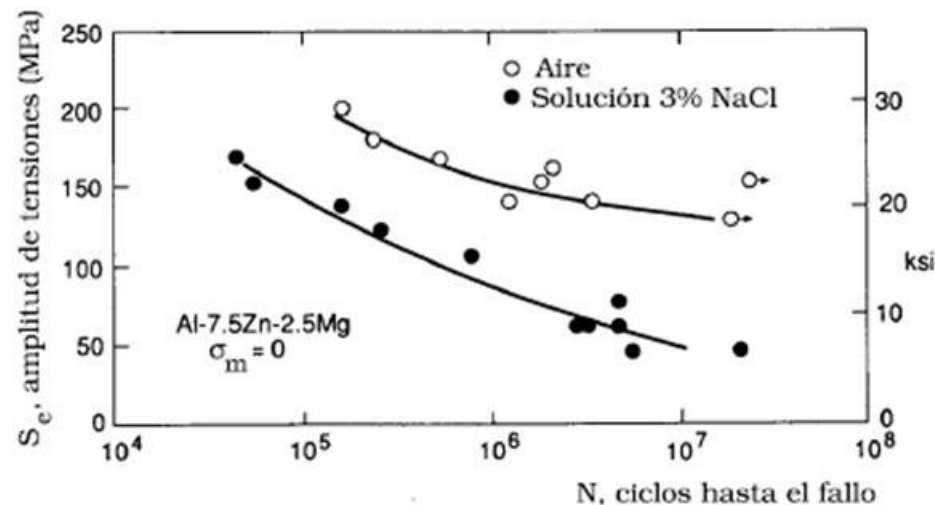


RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Kg: Factor de efectos diversos

- El problema de la corrosión no es tan simple como encontrar el límite de fatiga para una muestra que se ha corroído.
- La razón es que **corrosión y fatiga ocurren simultáneamente**.
- Básicamente esto significa que siempre **existirá fallo en un componente sometido a tensiones repetidas en una atmósfera corrosiva**.
- **Es decir, “no existe” el límite de fatiga**

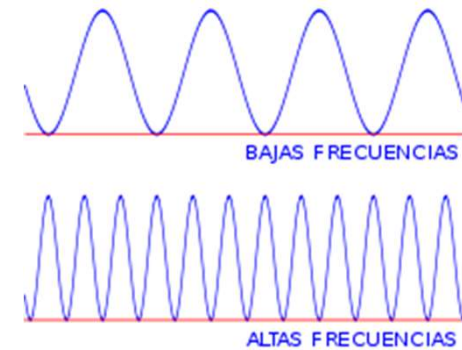


CORROSIÓN

Efecto de una solución salina similar al agua marina en el comportamiento a fatiga de flexión en una aleación de aluminio.

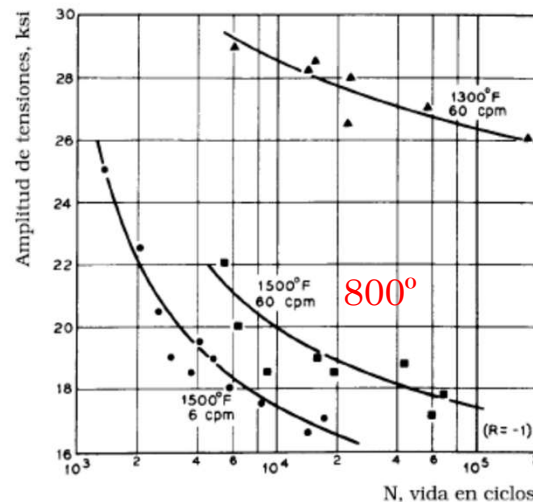
RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN



○ Kg: Factor de efectos diversos

- Si por alguna razón el proceso de fatiga se convierte **en dependiente del tiempo, también es dependiente de la frecuencia.**
- Bajo **condiciones normales, el fallo por fatiga es independiente de la frecuencia.** Pero cuando existe corrosión o altas temperaturas, la frecuencia de aplicación es importante.
- **Para un nivel de tensiones dado, a medida que la frecuencia sea más baja y la temperatura más alta, se tiene una velocidad de propagación de grieta más alta y en consecuencia una vida inferior de fatiga.**

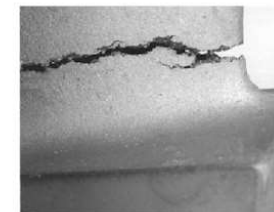


↓ S'_e
Influye
Temperatura y
frecuencia

· Efecto de la temperatura y frecuencia en las curvas S-N para carga axial de la aleación de base níquel Inconel.

CREEP: Gran parte de las fallas ocurridas a altas temperaturas son atribuidas a **fluencia lenta** o a una combinación fluencia lenta-fatiga

Este actúa como si fuese viscoso y puede definirse como la **acumulación de deformación plástica con el tiempo.** Sufrir deformación anelástica; sus dimensiones cambian con el tiempo.



Agrietamiento por "Creep" de un álabe de turbina de Gas.

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

Corrosión por fretting

Tiene lugar cuando dos metales son mantenidos en contacto y sujetos a una repetición de deslizamientos cortos con movimientos relativos. (juntas atornilladas, cojinetes...)

Bureau Veritas.

○ Kg: Factor de efectos diversos. Fretting

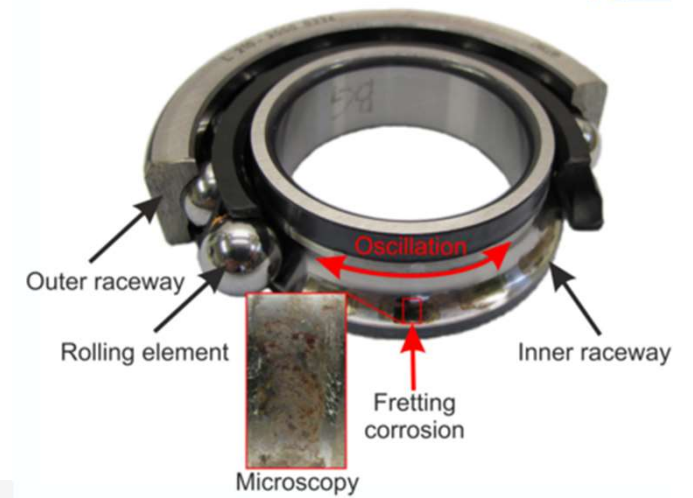
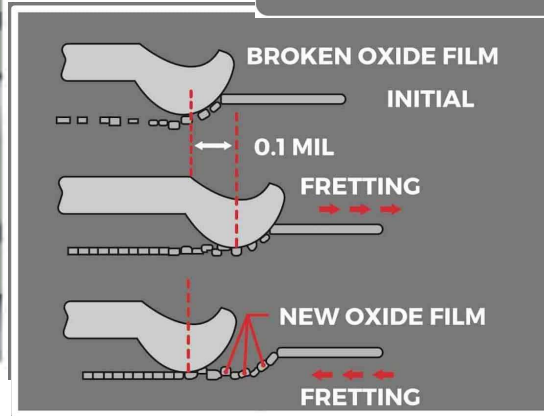
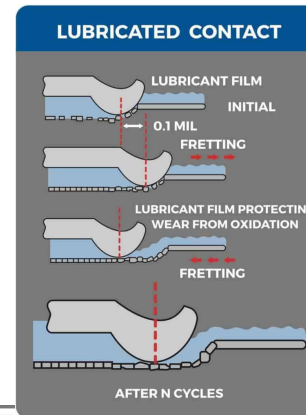
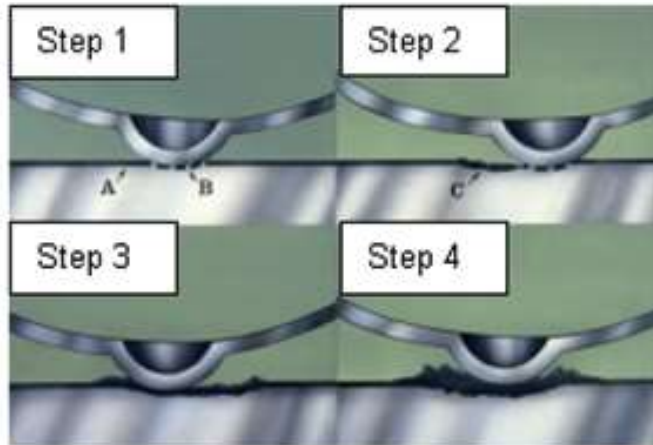
- Tensiones de contacto, p.e. en uniones atornilladas.
- El factor de reducción del límite de fatiga depende de los materiales utilizados y puede oscilar entre 0.24 y 0.9.
- $\downarrow S'_e$ (0.24 - 0.9)
- Los polímeros pueden incrementar su T^a debido a la carga cíclica, ya que estos materiales tienen un comportamiento viscoelástico, y la energía generada debe disiparse en forma de calor.
- El efecto se agrava debido a que estos materiales tienen una conductividad térmica bajo.
- Una consecuencia de esto es que la curva S-N no sólo está afectada por la frecuencia, sino también por el espesor del elemento, ya que los componentes más delgados pueden disipar mejor el calor generado.

POLIMEROS: (viscoelásticos y malos conductores del calor)

carga cíclica $\Rightarrow \uparrow$ temperatura
 $\Rightarrow$ cuando $\emptyset \uparrow$, $\downarrow$ vida

76

FRETTING



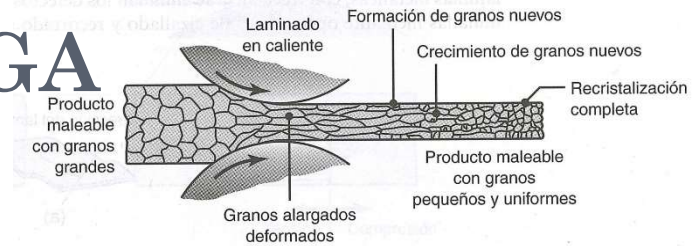
Anodo (metal menos noble)
 Cátodo (metal más noble)

Grafito
Titanio
Plata
Acero a prueba de ácido A4 -pasivo
Acero inoxidable A2 – pasivo
Iconel – pasivo
Níquel – pasivo
Soldadura de plata
Monel
Aleaciones de cobre/níquel
Bronce
Cobre
Latón
Estaño
Plomo
Soldadura de estaño
Acero fundido
Acero y hierro
Aluminio 2024 – T4
Cadmio
Aluminio 1100
Acero galvanizado
Zinc
Aleaciones de magnesio
Magnesio



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN



○ Kg: Factor de efectos diversos. **Fretting**

- Tensiones residuales de compresión (inhibición crecimiento grieta). Mejora significativamente el comportamiento a fatiga.

- Shot-peening El granallado es un proceso diseñado específicamente para mejorar la resistencia a la fatiga de componentes sujetos a tensiones elevadas alternas.
- Laminado

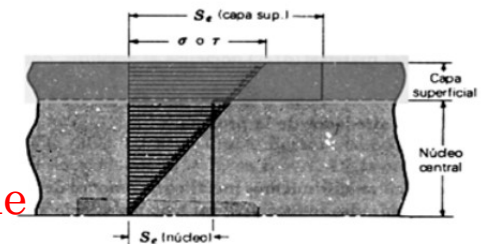
• Orientación Preferente de Grano (Forja)

Estirado, laminación, forja $\Rightarrow$

• Endurecimientos Superficiales

Se transversal 10% menor que Se longitudinal

- Nitruración
- Templado superficial
- Problemas. Alteración de microestructura y composición química. Posible fallo bajo la superficie



• Recubrimientos:

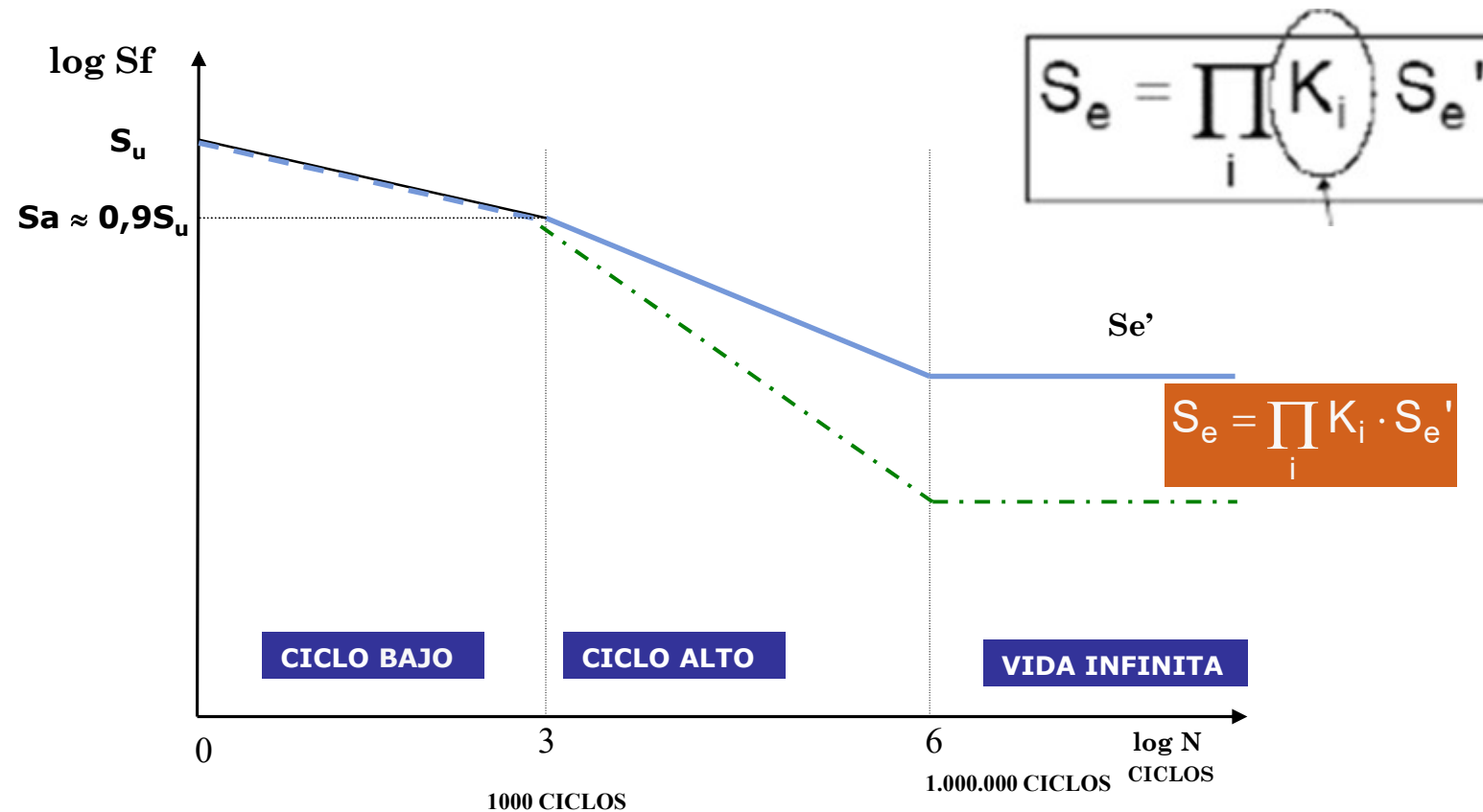
- Niquelado y cromado. σ residuales de tracción $\Rightarrow \downarrow$ vida hasta 50%
- Zincado: no afecta.



RESISTENCIA A LA FATIGA

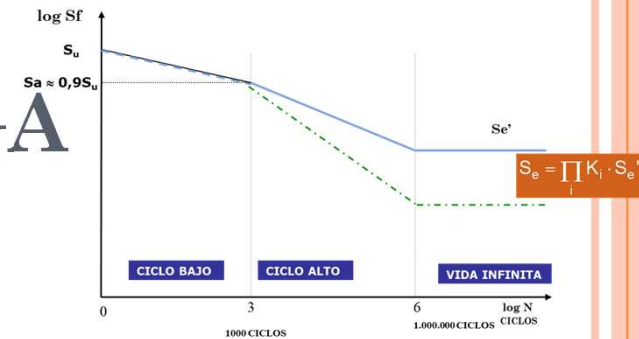
6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Curva final



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN



○ Curva final

- La ecuación de la curva límite de fallo se puede escribir como $S_n = a \cdot N^b$
- $\log (S_n) = \log (a) + b \times \log (N)$
- Donde:
 - S_n es la resistencia a la fatiga a N ciclos
 - N es el número de ciclos
 - a es el punto de intersección con el eje de resistencia
 - b es la pendiente de la curva de fallo.
- Para hallar b basta aplicar la fórmula de la pendiente

PARA METALES FERROSOS :
$$b = \frac{\log(S_e) - \log(S_m)}{\log(10^6) - \log(10^3)} = \frac{1}{3} \cdot \log\left(\frac{S_e}{S_m}\right)$$

PARA METALES NO FERROSOS :
$$b = \frac{\log(S_f) - \log(S_m)}{\log(N_f) - \log(10^3)}$$

- Despejando para a ...

$$a = 10^{\log(S_m) - 3b}$$

Propiedades	Ejemplos
$\log_a m + \log_a n = \log_a(m \cdot n)$	$\log_3 5 + \log_3 10 = \log_3 50$
$\log_a m - \log_a n = \log_a(m / n)$	$\log_3 7 - \log_3 2 = \log_3 7 / 2$
$\log_a m^n = n \log_a m$	$\log_3 5^4 = 4 \log_3 5$
$\log_a m = \log_a n$ si y sólo si $m=n$	Si $\log_2 7 = \log_2 x$, entonces $x=7$
Si $m > n$ $\log_a m > \log_a n$	Como $8 > 3$, $\log_5 8 > \log_5 3$.

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

Curva final

La ecuación de la curva límite de fallo

$$S_n = a \cdot N^b$$

$$\log(S_n) = \log(a) + b \times \log(N)$$

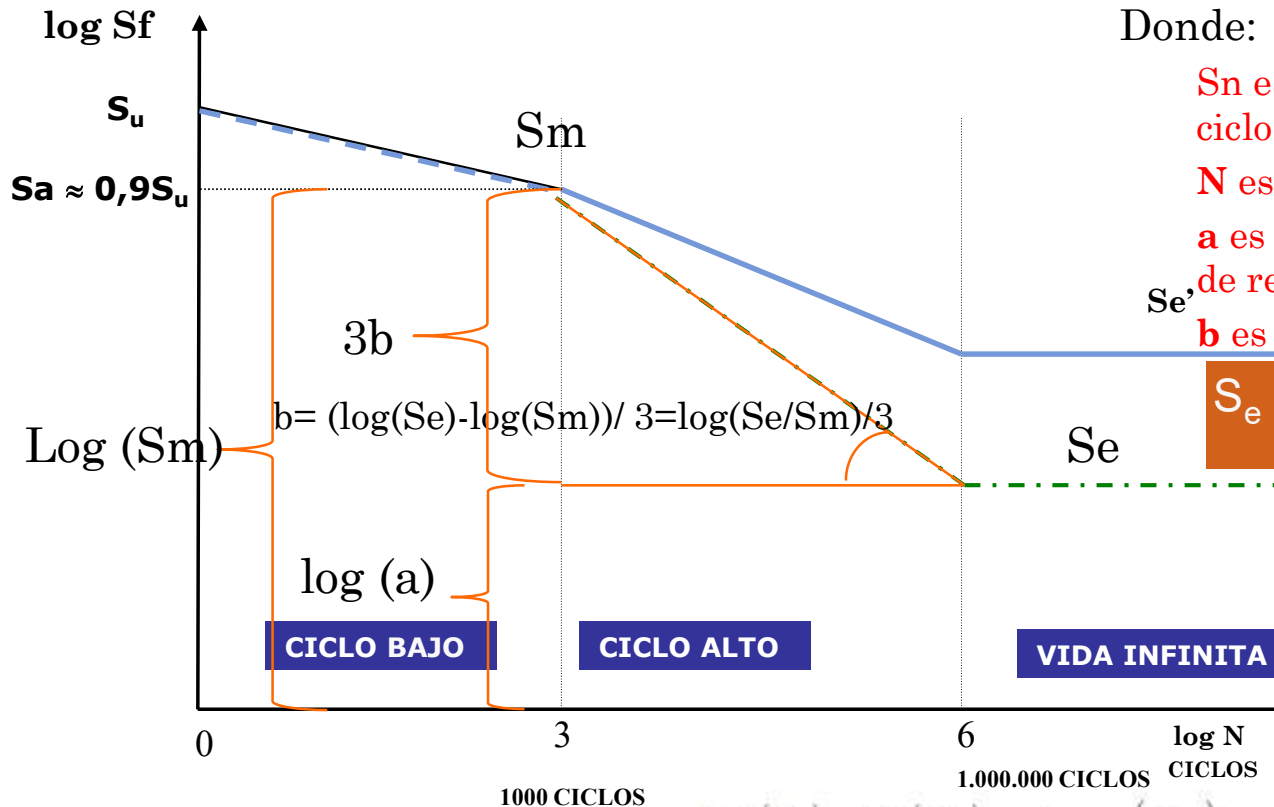
Donde:

S_n es la resistencia a la fatiga a N ciclos

N es el número de ciclos

a es el punto de intersección con el eje de resistencia

b es la pendiente de la curva de fallo.



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

PARA METALES FERROSOS :

$$b = \frac{\log(S_e) - \log(S_m)}{\log(10^6) - \log(10^3)} = \frac{1}{3} \cdot \log\left(\frac{S_e}{S_m}\right)$$

PARA METALES NO FERROSOS :

$$b = \frac{\log(S_f) - \log(S_m)}{\log(N_f) - \log(10^3)}$$

$$a = 10^{\log(S_m) - 3b}$$

RESISTENCIA A LA FATIGA

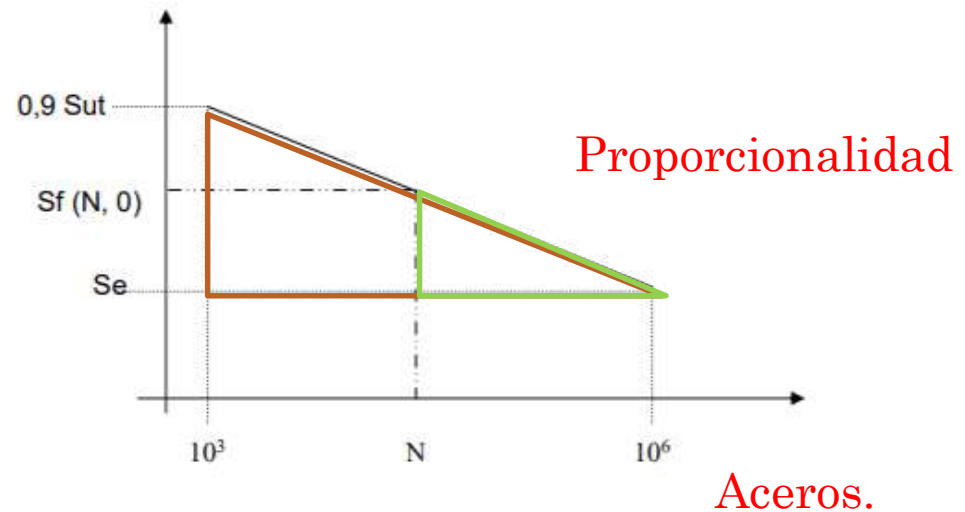
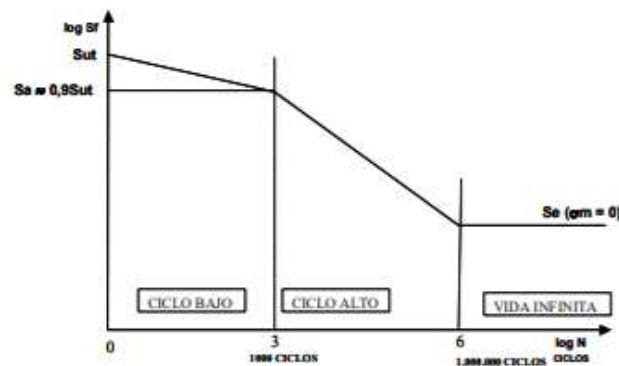
6. ECUACIÓN DE MARIN

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



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

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

82

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

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

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

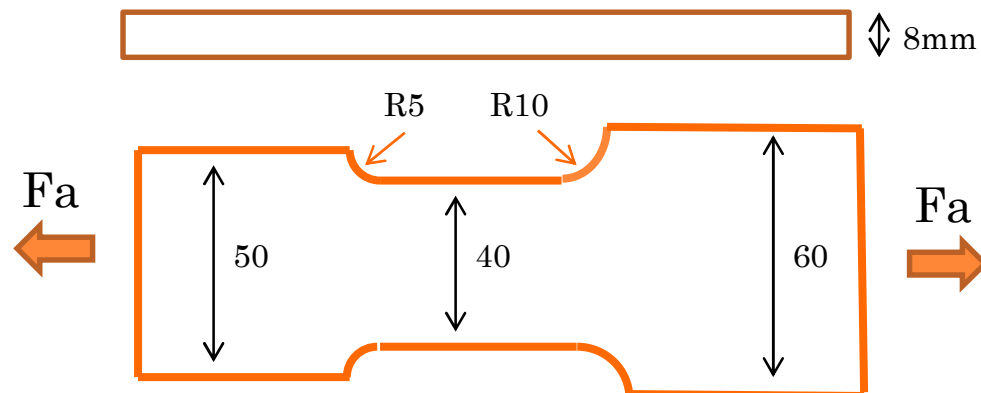
N = 1000000 ciclos

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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- **Ejercicio:** La pieza mostrada en la figura (unidades en mm) se mecaniza a partir de una placa de acero laminado en frío con $S_{ut}=545 \text{ Mpa}$ y $S_y=365 \text{ MPa}$. La carga axial que se muestra es totalmente alternante: $F_a=6500 \text{ N}$. La temperatura del proceso es de 60°C y se requiere una fiabilidad de 99% en el cálculo.
- Se pide:
 - A) Sección donde probablemente fallará la pieza
 - B) Determinar el factor de seguridad de dicha sección para $N=450.000 \text{ Ciclos}$ y para vida infinita



RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

○ Valor de S_m (en 10^3 ciclos) ¿Cómo se obtiene?

- Bibliografía
- Ensayos anteriores
- Aproximaciones

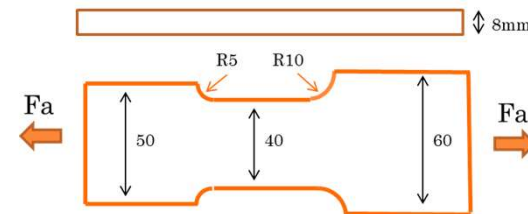
A flexión

$$S_m = 0.9 S_{ut}$$

Axial

$$S_m = 0.75 S_{ut}$$

La pieza mostrada en la figura (unidades en mm) se mecaniza a partir de una placa de acero laminado en frío con $S_{ut}=545$ Mpa y $S_y=365$ MPa.



En función esfuerzo

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

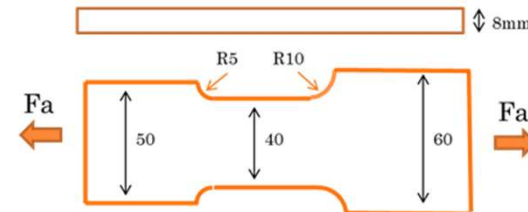
- Valor de S_m (en 10^3 ciclos) ¿Cómo se obtiene?
 - Bibliografía
 - Ensayos anteriores
 - Aproximaciones

A flexión

$$S_m = 0.9 S_{ut}$$

Axial

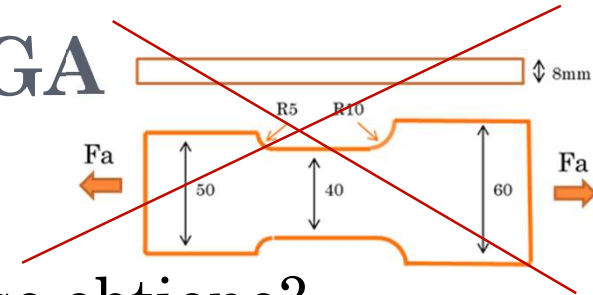
$$S_m = 0.75 S_{ut}$$



En función esfuerzo

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N



- Valor de S'_e (en 10^6 ciclos) . ¿Cómo se obtiene?

- Bibliografía
- Ensayos anteriores
- Aproximaciones

La pieza mostrada en la figura (unidades en mm) se mecaniza a partir de una placa de acero laminado en frío con $S_{ut}=545$ Mpa y $S_y=365$ MPa.

Aceros

$$S'_e = 0.5 S_{ut}$$

$$S'_e = 700 \text{ MPa}$$

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

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

Hierros

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$

$$S'_e = 160 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 400 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \geq 400 \text{ MPa}$$

Aluminios

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$

$$S'_e = 130 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 330 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \geq 330 \text{ MPa}$$

Aleaciones cobre

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$

$$S'_e = 100 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 280 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \geq 280 \text{ MPa}$$

En función material

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

- Valor de S'_e (en 10^6 ciclos) . ¿Cómo se obtiene?

- Bibliografía
- Ensayos anteriores
- Aproximaciones

La pieza mostrada en la figura (unidades en mm) se mecaniza a partir de una placa de acero laminado en frío con $S_{ut}=545$ Mpa y $S_y=365$ MPa.

Aceros

$$S'_e = 0.5 S_{ut}$$

$$S'_e = 700 \text{ MPa}$$

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

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

Hierros

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$

$$S'_e = 160 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 400 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \geq 400 \text{ MPa}$$

Aluminios

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$

$$S'_e = 130 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 330 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \geq 330 \text{ MPa}$$

Aleaciones cobre

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$

$$S'_e = 100 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 280 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \geq 280 \text{ MPa}$$

En función material



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

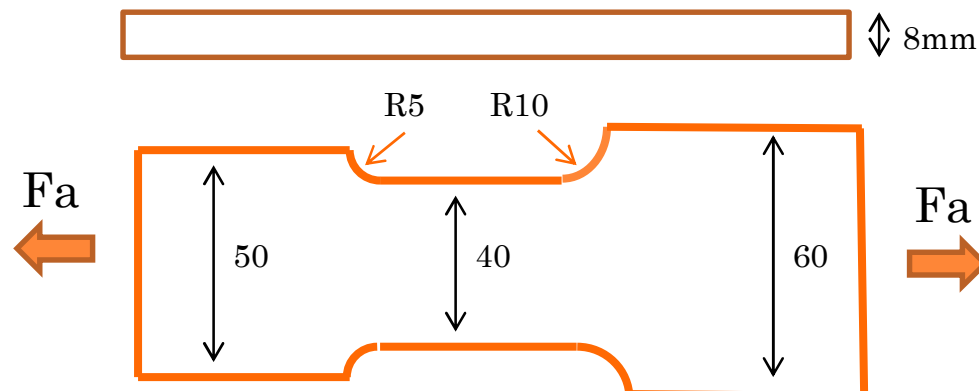
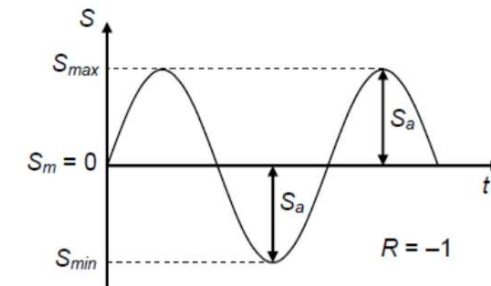
○ $S_{ut}=545 \text{ Mpa}$

○ $S_y=365 \text{ MPa}$.

S_m	Axial	$S_m = 0.75 S_{ut}$	408,75 Mpa
Aceros	$S_e' = 0.5 S_{ut}$	$S_{ut} < 1400 \text{ MPa}$	$S_e' =$
	$S_e' = 700 \text{ MPa}$	$S_{ut} > 1400 \text{ MPa}$	272,5 Mpa

○ La carga axial alternante: $F_a=6500 \text{ N}$.

○ $F_{\max} = 6500 \text{ N}$ $F_{\min} = -6500 \text{ N}$



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

Sut en MPa

Si $K_a > 1 \rightarrow K_a = 1$

○ **Ka: Factor de acabado superficial**

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

• Ensayo de probeta rotatoria

- **Probeta pulida (a espejo)** con pulimento fino en dirección axial

• Pieza real

- Peor acabado superficial $\Rightarrow \downarrow S_e$

Hierro Fundido

$K_a = 1$

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

• Función de:

- Calidad del acabado superficial
- Resistencia última del material ($\uparrow S_u \Rightarrow \downarrow S_e$)
- **Para ciclos bajos (<1000) se puede tomar siempre $K_a = 1$**

La pieza mostrada en la figura (unidades en mm) se mecaniza a partir de una placa de acero laminado en frío

Acabado superficial	Coefficiente 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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

Sut en MPa

Si $K_a > 1 \rightarrow K_a = 1$

○ **Ka: Factor de acabado superficial**

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

• Ensayo de probeta rotatoria

- **Probeta pulida (a espejo)** con pulimento fino en dirección axial

• Pieza real

Hierro Fundido

- Peor acabado superficial $\Rightarrow \downarrow S_e$

$K_a = 1$

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

• Función de:

- Calidad del acabado superficial
- Resistencia última del material ($\uparrow S_u \Rightarrow \downarrow S_e$)
- **Para ciclos bajos (<1000) se puede tomar siempre $K_a = 1$**

Acabado superficial	Coefficiente 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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ **Kb: Factor de tamaño**

- Ensayo de probeta rotatoria
 - Probeta con sección circular, diámetro normalizado (7.5 a 12.5 mm)
- Pieza real
 - Sección circular / diámetro diferente
 - En 10^3 : $K_b = 1$ (no influye el tamaño)
 - En 10^6 : el diámetro de probeta influye en flexión y torsión, no con carga axial
- Flexión / Torsión [Shigley. Pag. 280]

$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

$$2,79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$$

$$K_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$$

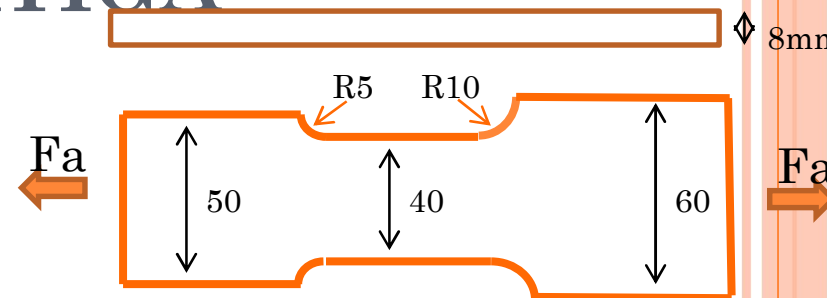
$$51 \leq d \text{ (mm)} \leq 254$$

$$K_b = 0,6$$

$$d \text{ (mm)} > 254$$

○ Carga Axial

- **Kb=1** (Sólo para sección circular. Pero ver Kc)



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ **K_b**: Factor de tamaño

- Ensayo de probeta rotatoria
 - Probeta con sección circular, diámetro normalizado (7.5 a 12.5 mm)
- Pieza real
 - Sección circular / diámetro diferente
 - En 10³: K_b = 1 (no influye el tamaño)
 - En 10⁶: el diámetro de probeta influye en flexión y torsión, no con carga axial
- Flexión / Torsión [Shigley. Pag. 280]

$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

$$2,79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$$

$$K_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$$

$$51 \leq d \text{ (mm)} \leq 254$$

$$K_b = 0,6$$

$$d \text{ (mm)} > 254$$

- Carga Axial
 - K_b=1 (Sólo para sección circular. Pero ver K_c)

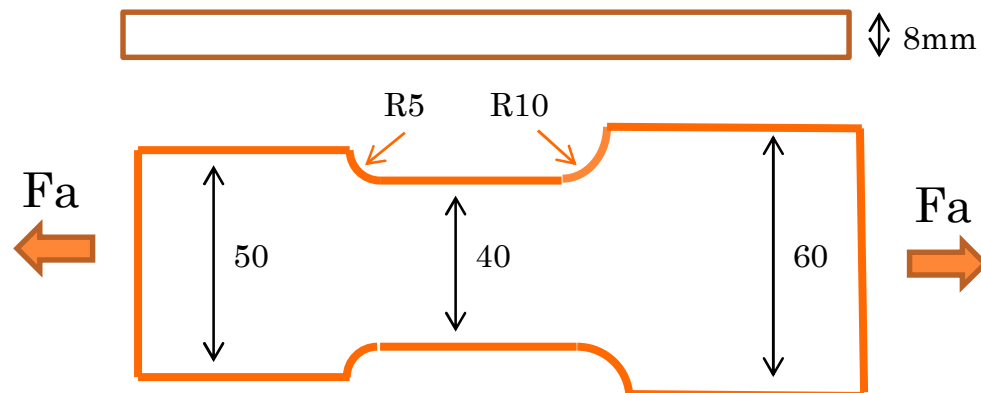
RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ K_c : Factor de modificación de carga

Probeta a flexión rotativa.

- Carga a flexión: $K_c = 1$
- Carga axial: $K_c = 0,85$ (Otros autores $K_c=0,7$)
- Carga torsión (sólo para fatiga torsional): $K_c = 0.59$
- Carga torsión combinada con flexión: $K_c = 1$



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ **Kc: Factor de modificación de carga**

Probeta a flexión rotativa.

- Carga a flexión: **Kc = 1**
- Carga axial: **Kc = 0,85** (Otros autores **Kc=0,7**)
- Carga torsión (sólo para fatiga torsional): **Kc = 0.59**
- Carga torsión combinada con flexión: **Kc = 1**

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Kd: Factor de temperatura

60° C

- Aplicable también para ciclos bajos (<1000)
- Fórmulas únicamente para Aceros

Norton Pag. 381

- $T \leq 450^{\circ}\text{C}$ $K_d=1$
- $450^{\circ}\text{C} \leq T \leq 550^{\circ}\text{C}$ $K_d=1-0,0058 \cdot (T-450)$

- No debe utilizarse para otros materiales
- Para temperaturas mayores la termofluencia adquiere un valor significativo y la curva S-N ya no tendrá un codo.
- Nota. Criterio diferente en Shigley Pag. 283.

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Kd: Factor de temperatura

60° C

- Aplicable también para ciclos bajos (<1000)
- Fórmulas únicamente para Aceros

Norton Pag. 381

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

$$K_d=1$$

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

$$K_d=1-0,0058 \cdot (T-450)$$

- No debe utilizarse para otros materiales
- Para temperaturas mayores la termofluencia adquiere un valor significativo y la curva S-N ya no tendrá un codo.
- Nota. Criterio diferente en Shigley Pag. 283.

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

99%

○ Ke: Factor de fiabilidad

<i>Fiabilidad</i>	<i>Factor de fiabilidad Kc</i>
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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Ke: Factor de fiabilidad

<i>Fiabilidad</i>	<i>Factor de fiabilidad Kc</i>
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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

○ Ejercicio: La carga axial alternante: $F_a = 6500\text{N}$.

- K_a : Acabado superficial. Placa de acero mecanizada laminado en frío

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

K_a	0,849
-------	-------

Acabado superficial	Coefficiente 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

- K_a : Acabado superficial.
- K_b : Factor de tamaño. Carga Axial.
- K_c : Factor de modificación de carga. Carga axial:
- K_d : Factor de temperatura. $T^a = 60^\circ\text{C}$ $T \leq 450^\circ\text{C}$
- K_e : Factor de fiabilidad. Fiabilidad de 99%

$$K_a = 0,849$$

$$K_b = 1.$$

$$K_c = 0,85.$$

$$K_d = 1$$

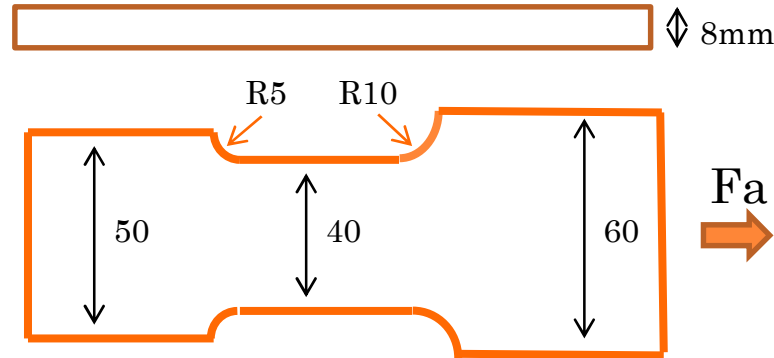
$$K_e = 0,814$$

Fiabilidad	Factor de fiabilidad K_c
0.5	1
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814

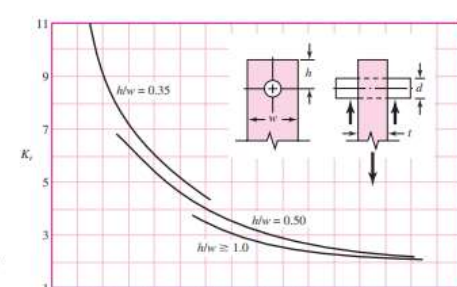
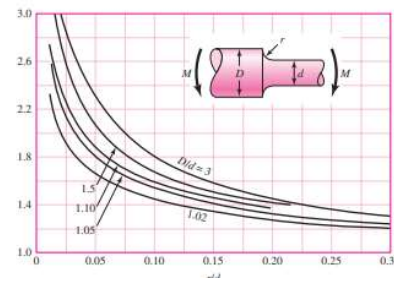
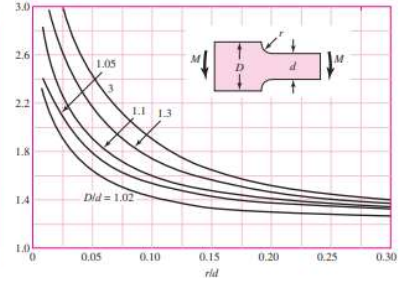
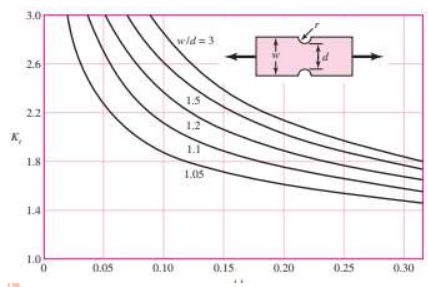
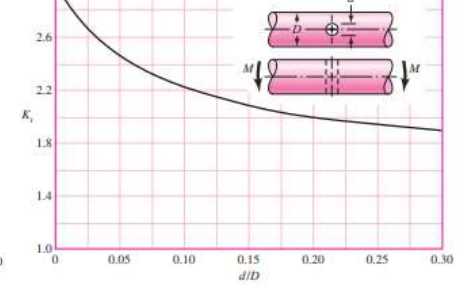
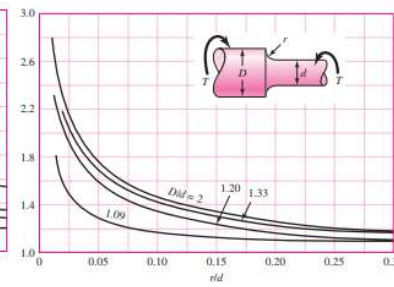
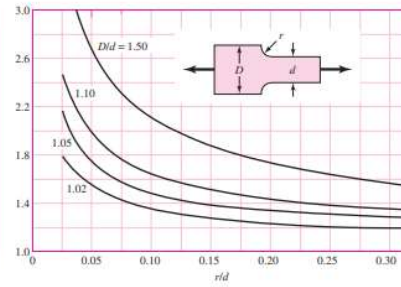
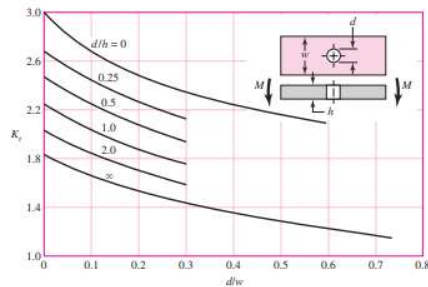
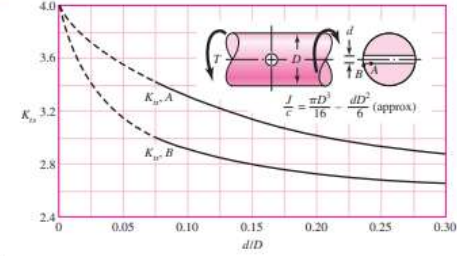
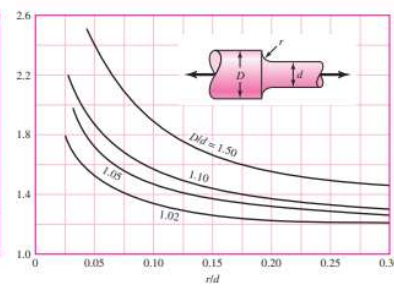
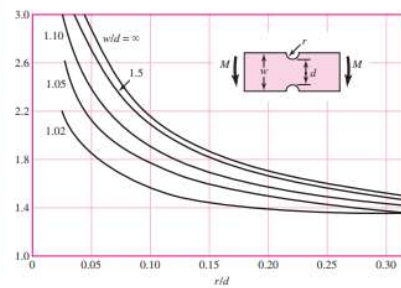
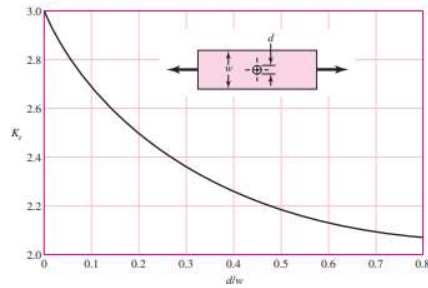
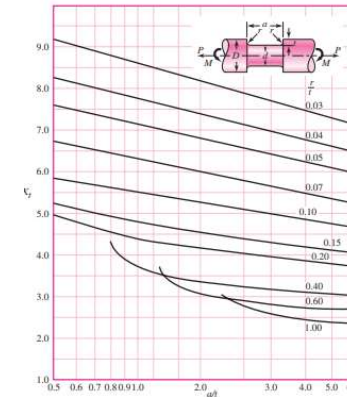
100

KT

Fa

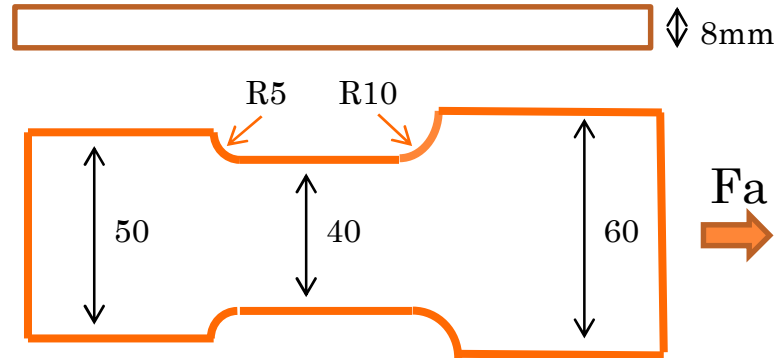


Fa

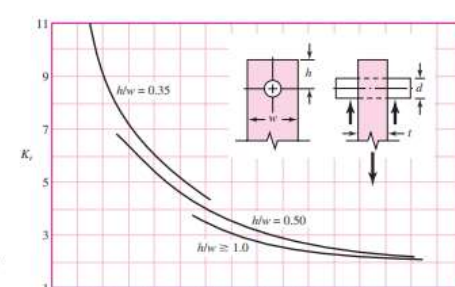
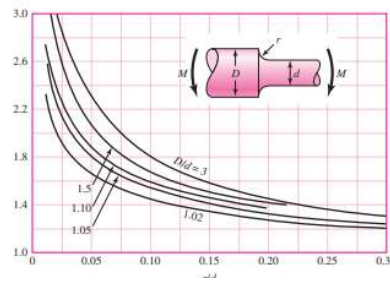
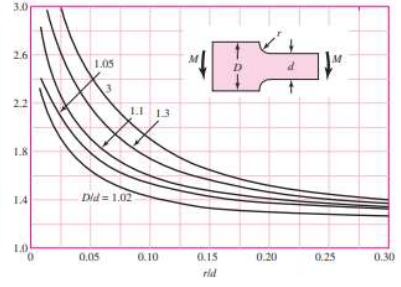
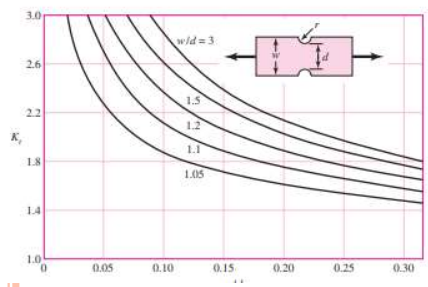
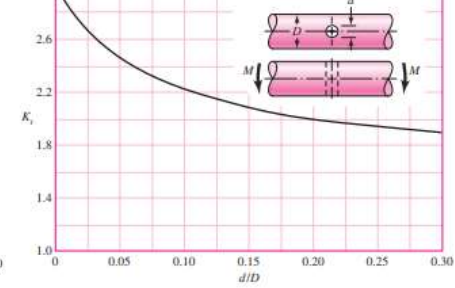
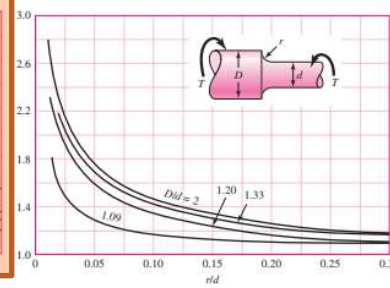
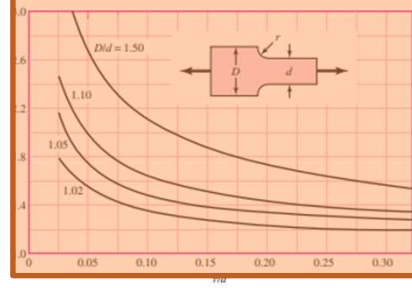
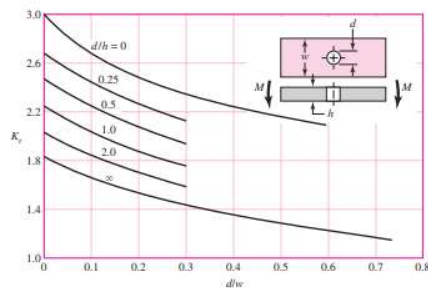
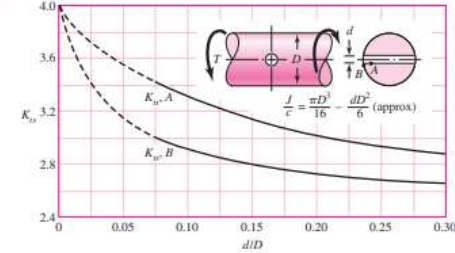
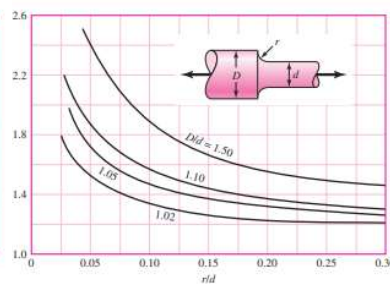
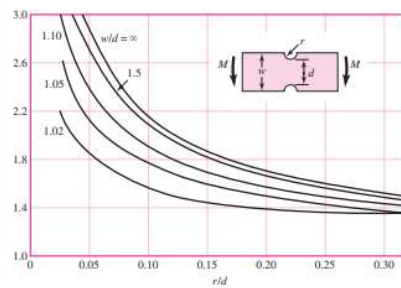
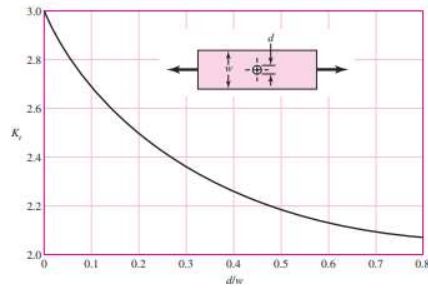
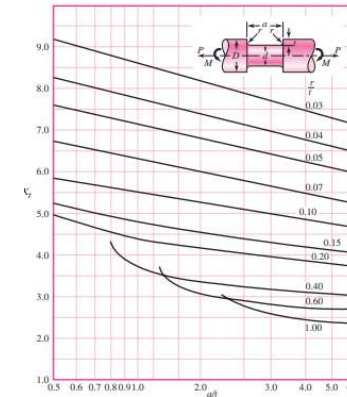


KT

Fa



Fa

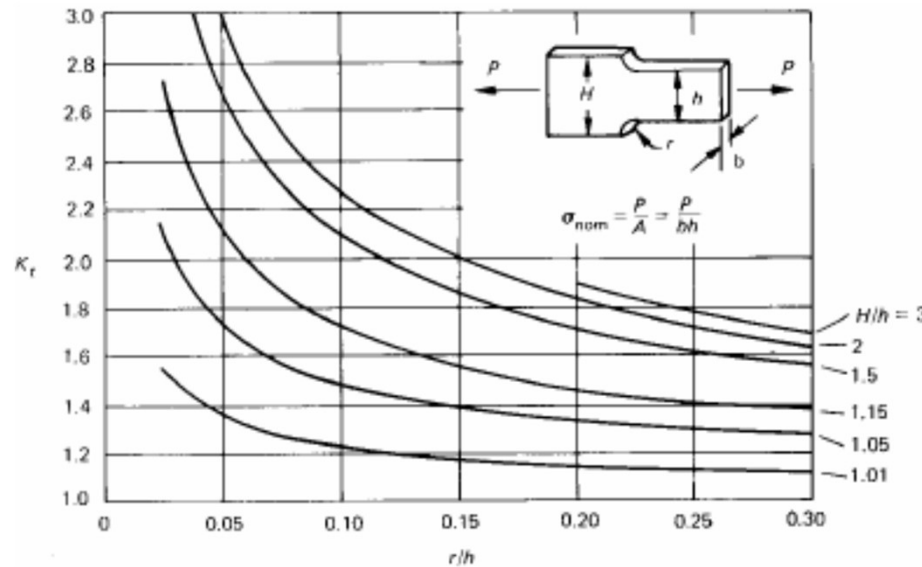


RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

- **Ejercicio:** Placa de acero laminado en frío
- A) Sección donde probablemente fallará la pieza
 - $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones

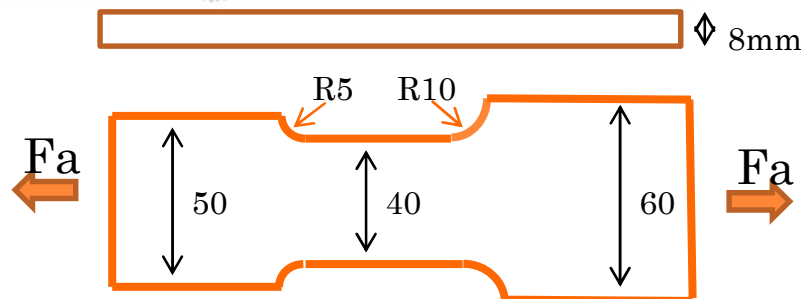


Caso r5 Kt= 1,8

Axial: H=50 mm, h=40 mm, r= 5 mm

Caso r10

Axial: H=60 mm, h=40 mm, r= 10mm



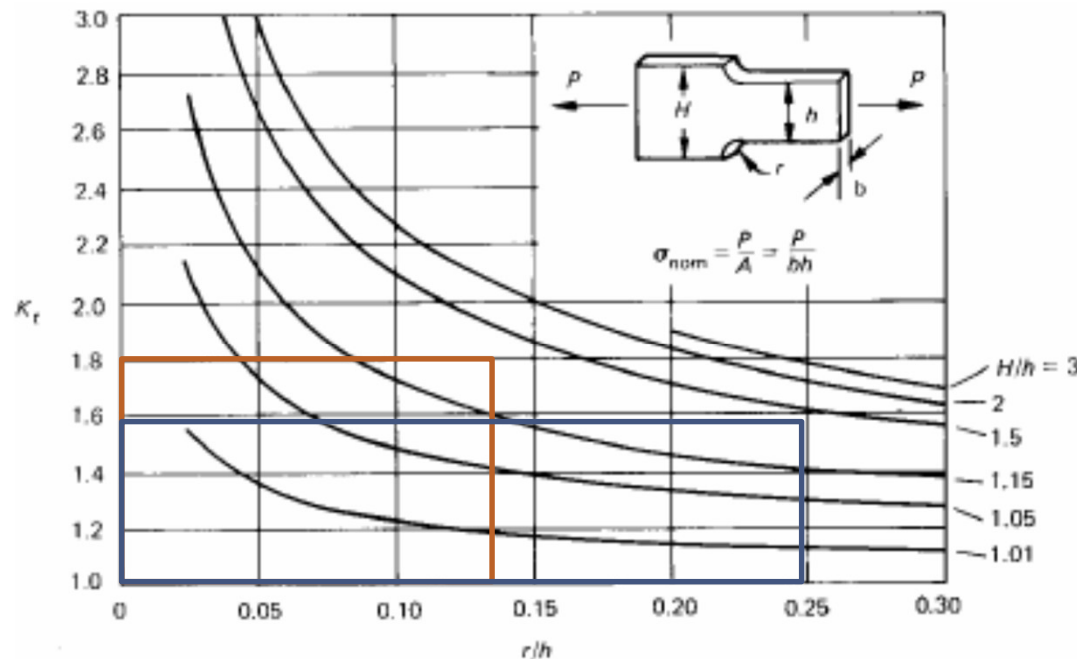
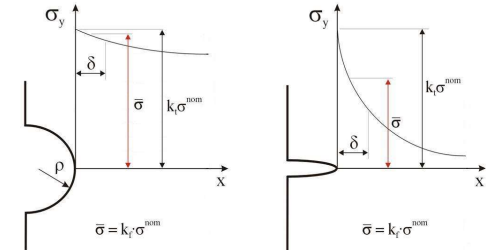
RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

○ 1/Kf: Factor de concentración de tensiones



$\rho \downarrow \Rightarrow \text{grad}(\sigma) \Rightarrow k_f / k_t \downarrow$

Caso r5 $K_t = 1,8$

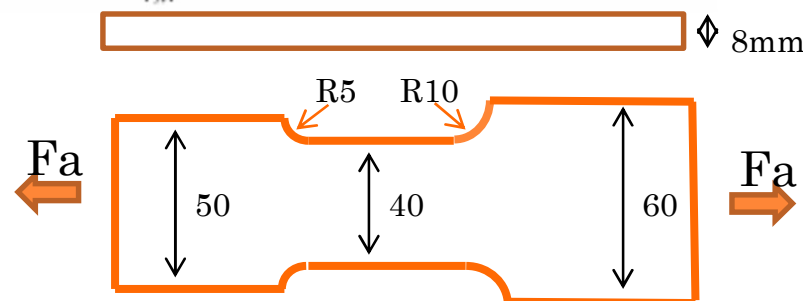
Axial: $H=50$ mm, $h=40$ mm, $r=5$ mm

Caso r10

Axial: $H=60$ mm, $h=40$ mm, $r=10$ mm

H	50	H	60
h	40	h	40
r	5	r	10
r/h	0,13	r/h	0,25
H/h	1,25	H/h	1,50

<u>Kt</u>	<u>1,8</u>	<u>Kt</u>	<u>1,6</u>
-----------	------------	-----------	------------



104

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

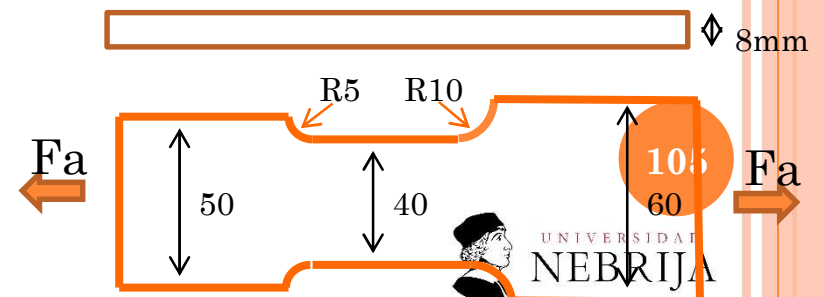
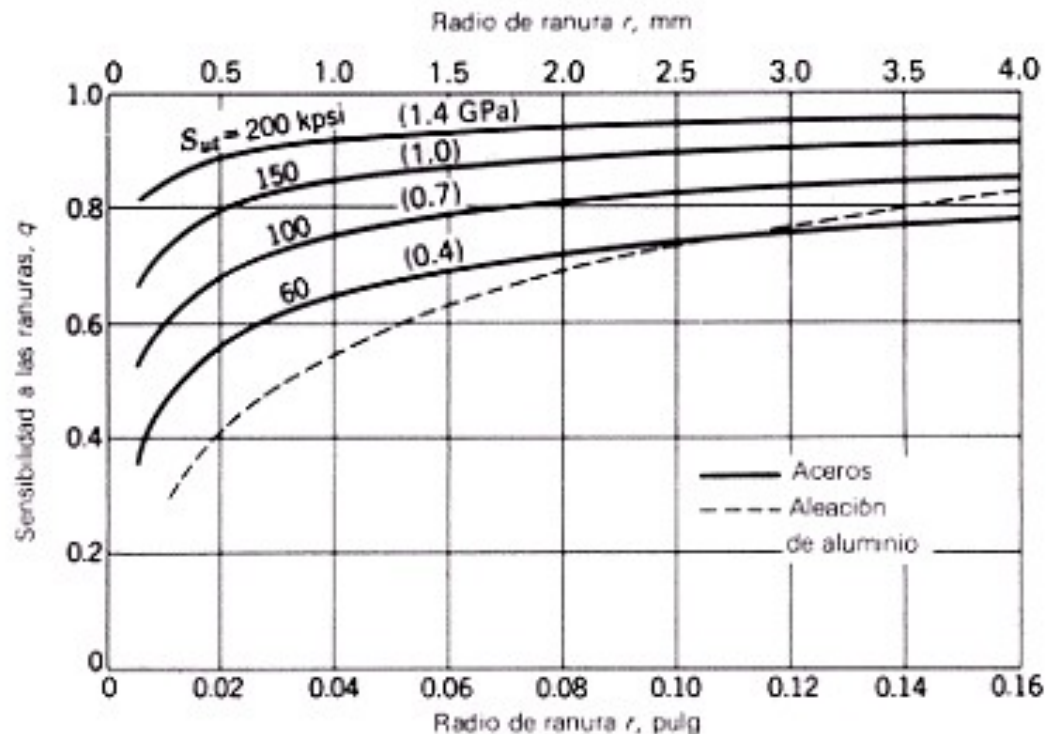
○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones. Sensibilidad a la entalla q .
- Cargas de flexión y axiales alternantes. $S_{ut}=545$ Mpa, $R=5$ mm. $R>r$ Tomar valor $r=4$ mm,

$S_{ut}=545$ Mpa

K_t	1,8
-------	-----

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



RESISTENCIA A LA FATIGA

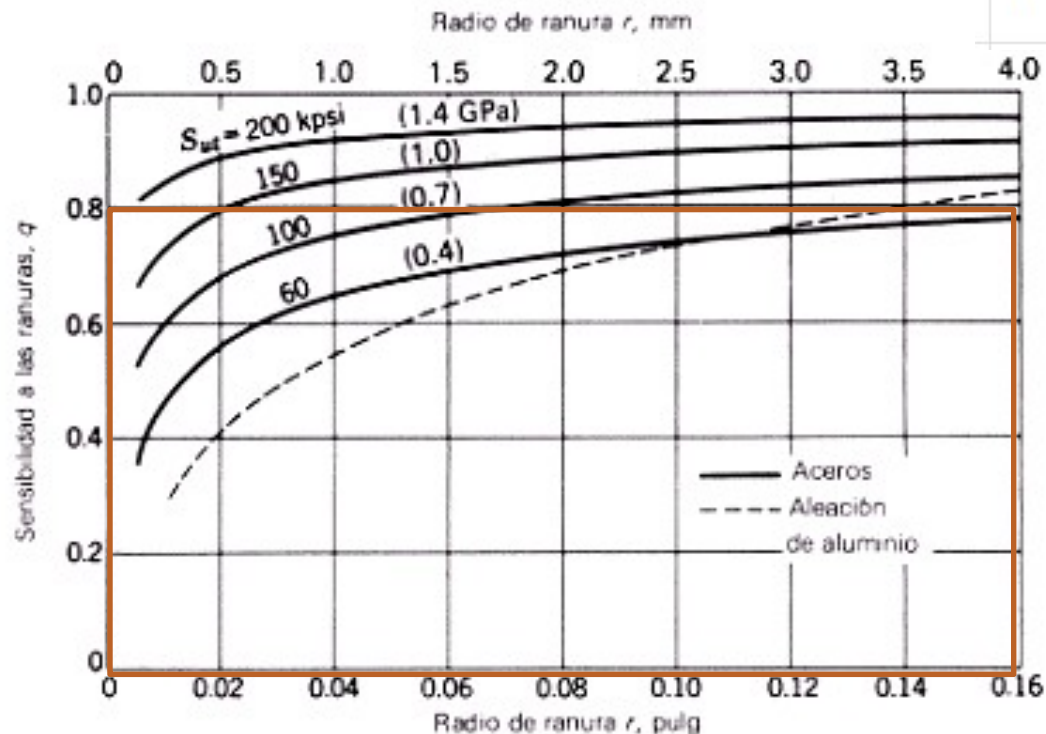
6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

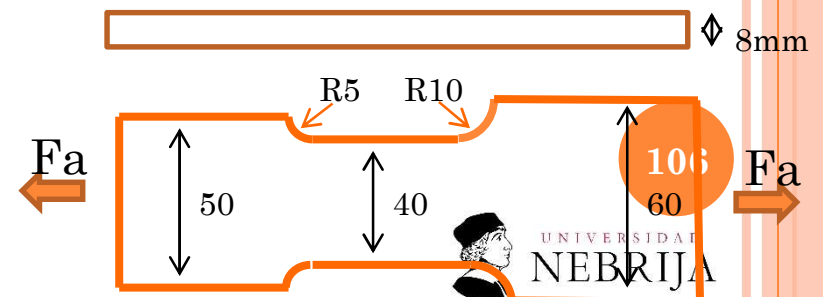
○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones. Sensibilidad a la entalla q .
- Cargas de flexión y axiales alternantes. $S_{ut}=545$ Mpa, $R=5$ mm.
 $R>r$ Tomar valor $r=4$ mm, $q=0,8$ $K_f=1,64$ $1/K_f=0,61$

q	K_t	K_f	$1/K_f$
0,800	1,8	1,640	0,610



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



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

- 1/Kf: Factor de concentración de tensiones. Sensibilidad a la entalla q.
- Cargas de flexión y axiales alternantes. Sut=545 Mpa, R= 5mm.
- Interpolación entre Sn=485 y Sn=550. **q= 0,847** **Kf=1,677** **1/Kf=0,596**

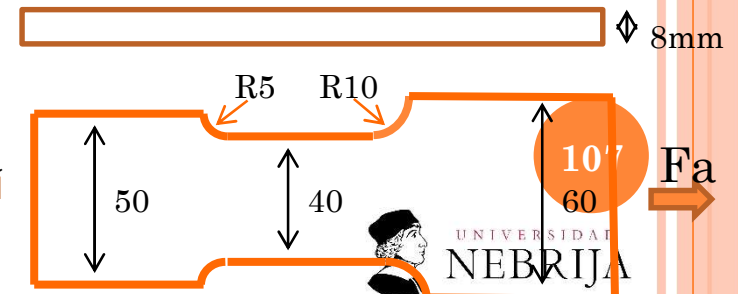
	q	Kt	Kf	1/Kf
Formula	0,847	1,8	1,677	0,596
	q	Kt	Kf	1/Kf
Tablas	0,800	1,8	1,640	0,610

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

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

S_u		$\sqrt{a}$			
		Carga axial y flexión		Torsión	
(ksi)	(MPa)	(in ^{0.5})	(mm ^{0.5})	(in ^{0.5})	(mm ^{0.5})
50	345	0.130	0.66	0.093	0.47
55	380	0.118	0.59	0.087	0.44
60	415	0.108	0.54	0.080	0.40
70	485	0.093	0.47	0.070	0.35
80	550	0.080	0.40	0.062	0.31
90	620	0.070	0.35	0.055	0.28
100	690	0.062	0.31	0.049	0.25
110	760	0.055	0.28	0.044	0.22
120	825	0.049	0.25	0.039	0.20
130	895	0.044	0.22	0.035	0.18
140	965	0.039	0.20	0.031	0.16
160	1100	0.031	0.16	0.024	0.12
180	1240	0.024	0.12	0.018	0.09
200	1380	0.018	0.09	0.013	0.07
220	1515	0.013	0.07	0.009	0.05
240	1655	0.009	0.05		

Sut	Intervalo	Sn	545 Mpa	a
s1		485	a1	0,47
s2		550	a2	0,4
s2-s1		65	a2-a1	-0,07
Tg		-	0,001077	
Sut-s1		60		
aut^(1/2)=a1+tg(sut-s1)		0,405		



RESISTENCIA A LA FATIGA

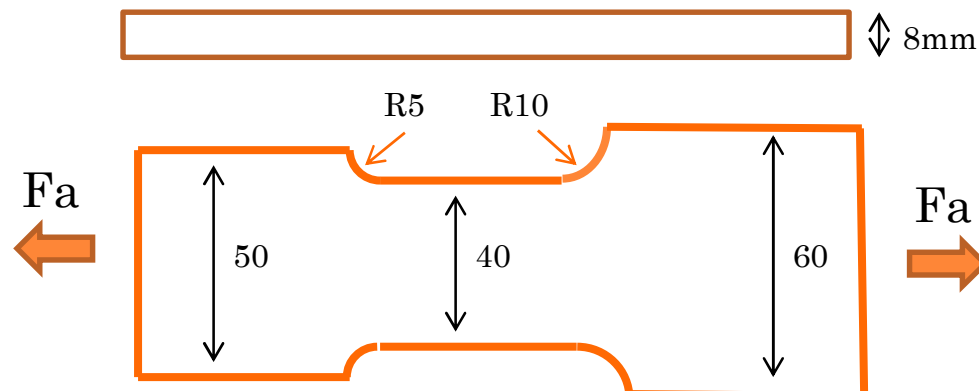
6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

- Ka: Acabado superficial. Ka=0,849
- Kb: Factor de tamaño. Carga Axial. Kb=1.
- Kc: Factor de modificación de carga. Carga axial: Kc = 0,85.
- Kd: Factor de temperatura. $T^a = 60^\circ\text{C}$ $T \leq 450^\circ\text{C}$ Kd=1
- Ke: Factor de fiabilidad. Fiabilidad de 99% Ke=0,814
- 1/Kf: Concentración de tensiones. **Kt=1,8** **q= 0,847**, **Kf=1,677** **1/Kf=0,596**
- Kg: Factor de efectos diversos. Nada. Kg=1

Ka	kb	kc	Kd	Ke	1/Kf	Kg	S'e	Se
0,849		1	0,85	1	0,814	0,596	1	272,5



RESISTENCIA A LA FATIGA

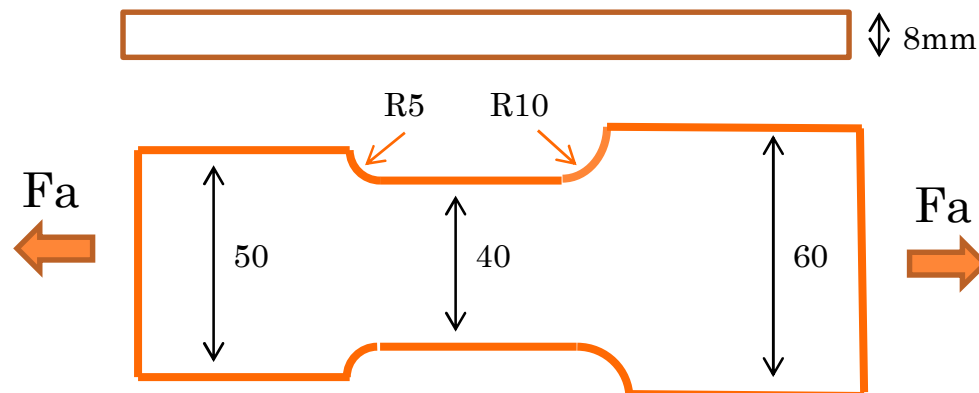
6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

- Ka: Acabado superficial. Ka=0,849
- Kb: Factor de tamaño. Carga Axial. Kb=1.
- Kc: Factor de modificación de carga. Carga axial: Kc = 0,85.
- Kd: Factor de temperatura. $T^a = 60^\circ\text{C}$ $T \leq 450^\circ\text{C}$ Kd=1
- Ke: Factor de fiabilidad. Fiabilidad de 99% Ke=0,814
- 1/Kf: Concentración de tensiones. **Kt=1,8** **q= 0,847**, **Kf=1,677** **1/Kf=0,596**
- Kg: Factor de efectos diversos. Nada. Kg=1

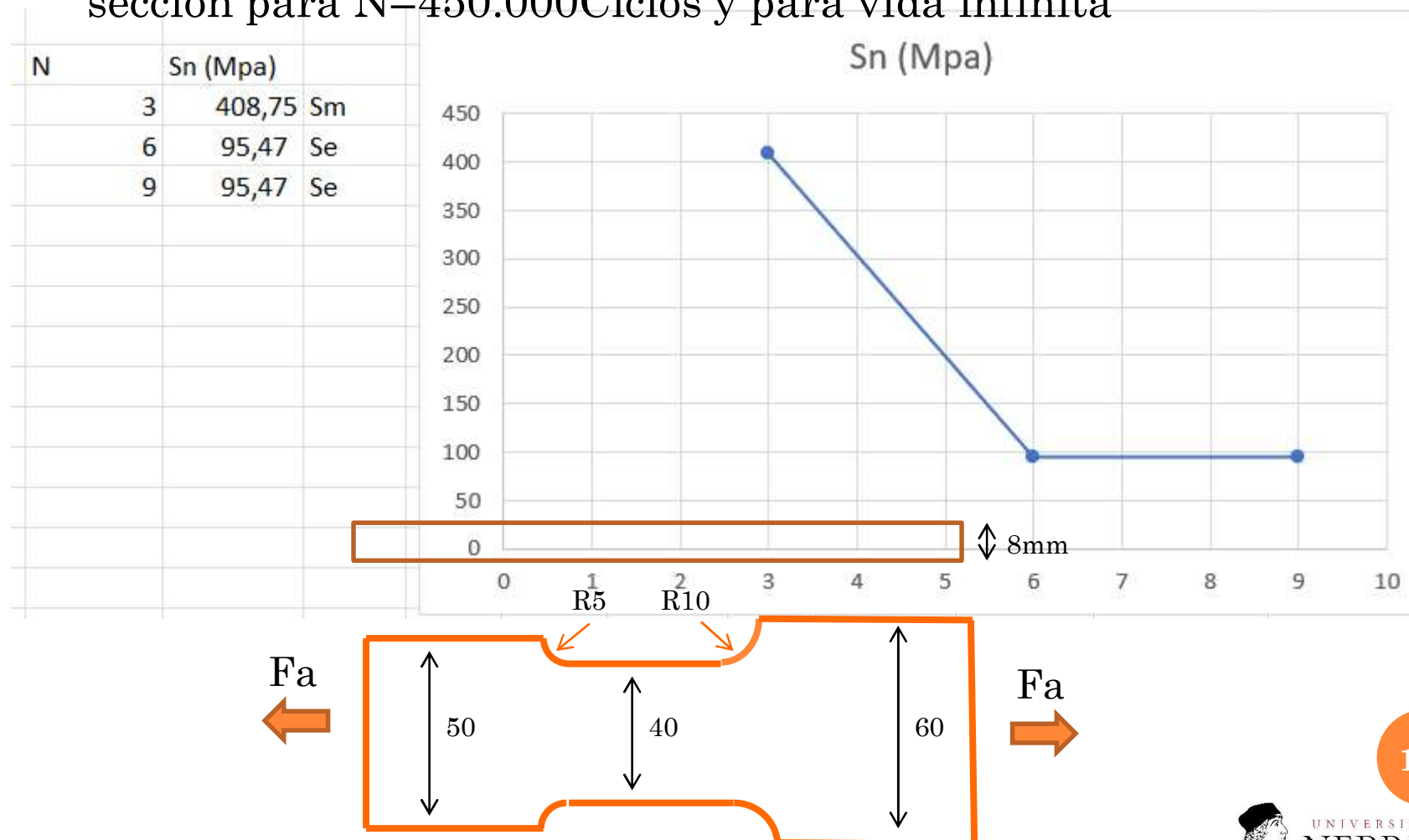
Ka	kb	kc	Kd	Ke	1/Kf	Kg	S'e	Se	
0,849		1	0,85	1	0,814	0,596	1	272,5	95,47 Mpa



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

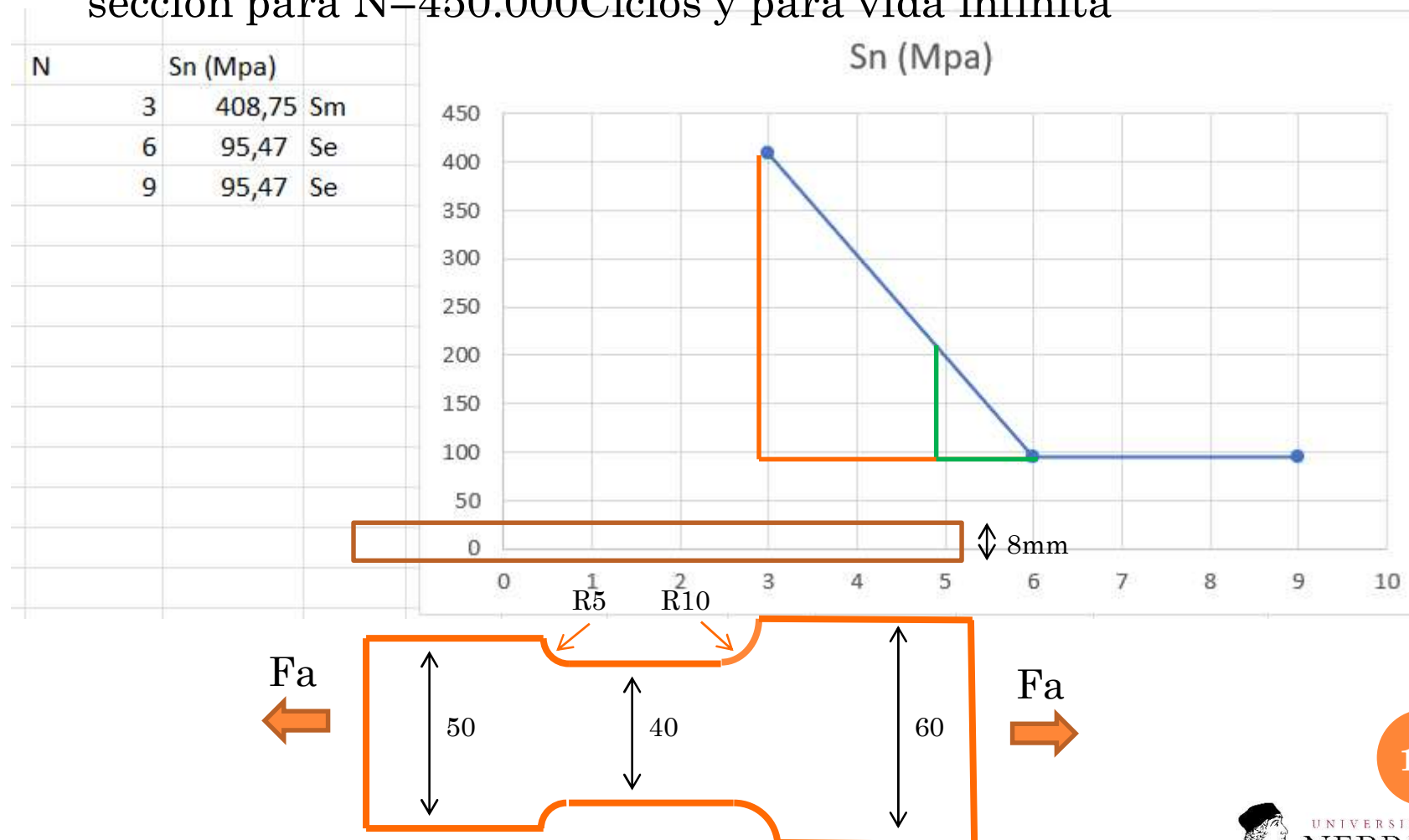
- **Ejercicio:** B) Determinar el factor de seguridad de dicha sección para $N=450.000$ Ciclos y para vida infinita



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- **Ejercicio:** B) Determinar el factor de seguridad de dicha sección para $N=450.000$ Ciclos y para vida infinita

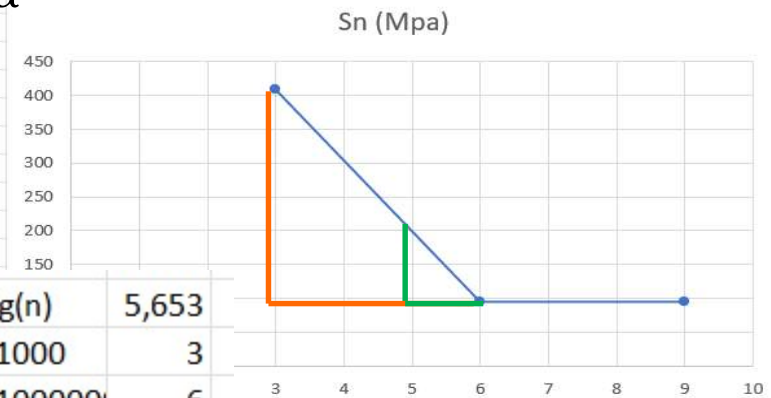


RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- B) Determinar el factor de seguridad de dicha sección para $N=450.000$ Ciclos y para vida infinita

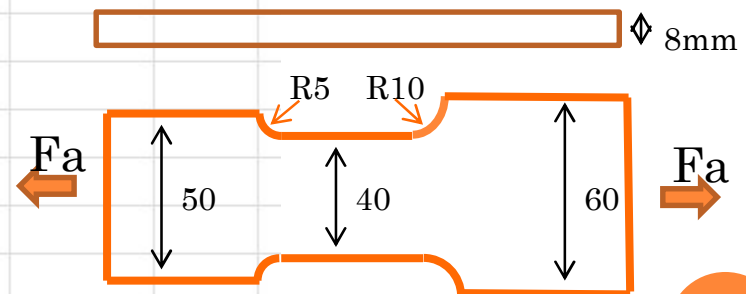
N	Sn (Mpa)	
3	408,75	Sm
6	95,47	Se
9	95,47	Se



Sn	?		N	450.000	log(n)	5,653
Sm	408,75	log(Sm)	2,611458		N1000	3
Se	95,47	Log(Se)	1,97985		N1000000	6
$\frac{\text{LogSm}-\text{LogSe}}{,6-3}$	=	$\frac{\text{log(Sn)}-\text{logSe}}{6-n}$				
0,631607458	=	log(Sn)	- 1,980			
3		0,347	0,347			
0,210535819	=	log(Sn)	-5,70912			
		0,347				
2,053	=	log(Sn)				
Sn	=	112,94	MPa			

Fa

50



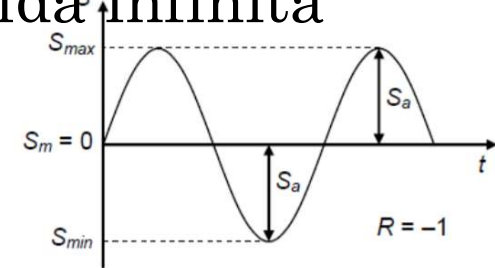
112

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- B) Determinar el factor de seguridad de dicha sección para $N=450.000$ Ciclos y para vida infinita
- La carga axial alternante: $F_a=6500N$.
- $F_{max}= 6500N$ $F_{min}=-6500N$

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$



Tensión=F/A			
	h	e	A
A=h*e	40	8	320 mm ²
Fmax	$\frac{\sigma_{max}}{20,3125}$		N/mm ²
6500			
Fmin	$\frac{\sigma_{min}}{-20,3125}$		N/mm ²
-6500			
$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 0$			
$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = 20,3125$ N/mm ²			

Factor de seguridad

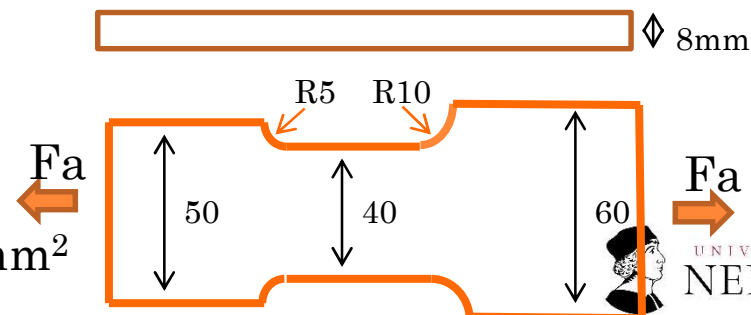
$$n_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_d}$$

donde: σ_y es el esfuerzo normal permisible y σ_d es el esfuerzo normal obtenido en el diseño.

Jordi

$$\frac{20,31}{112,9} = \frac{1}{CS}$$

N	450.000	
Sn	112,94	MPa=N/mm ²
Sd	20,3125	MPa=N/mm ²
CS= ns=	5,56	
N	1.000.000	
Se	95,47	MPa=N/mm ²
Sd	20,3125	MPa=N/mm ²
CS= ns=	4,70	



113

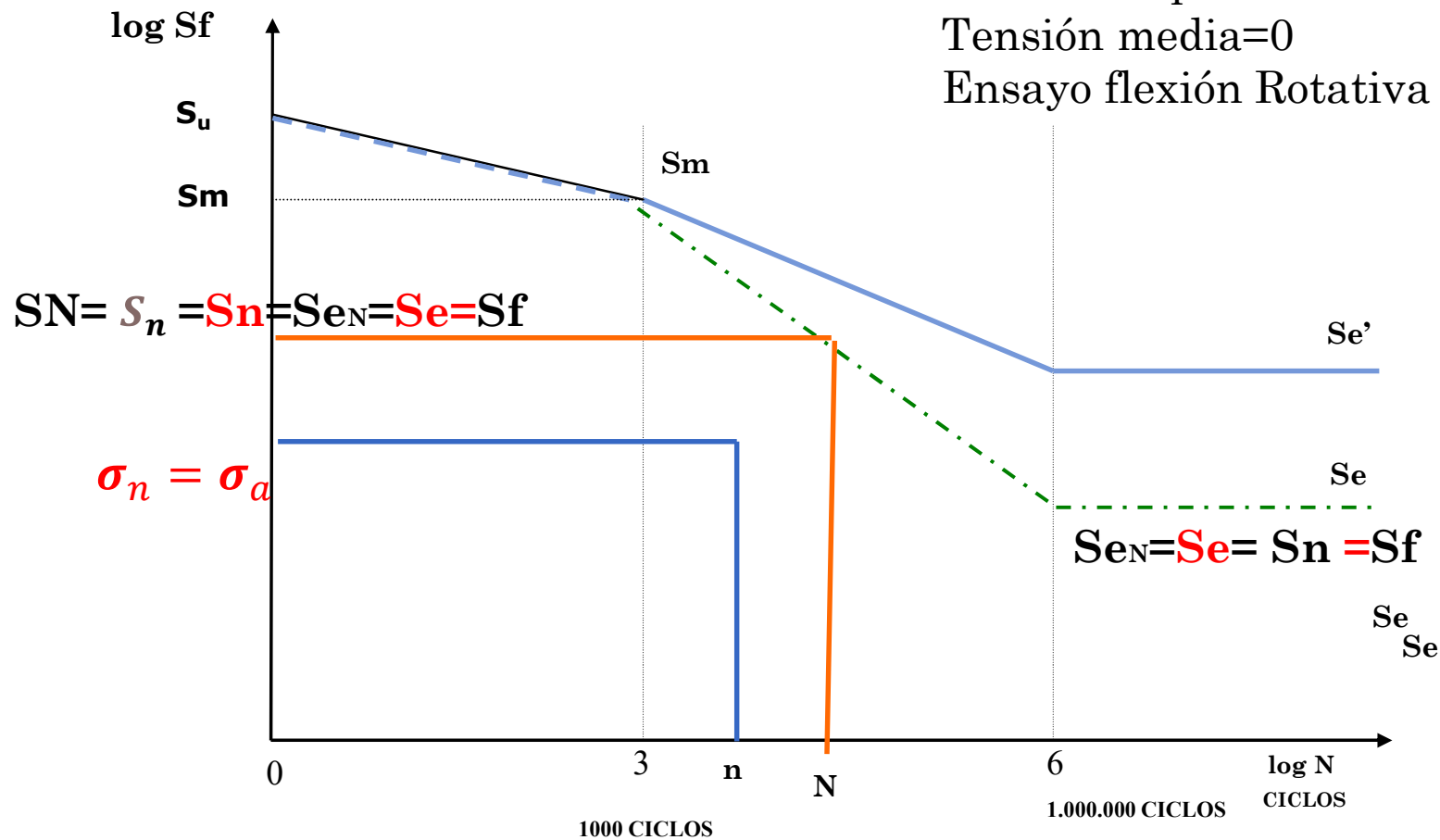
UNIVERSIDAD
NEBRIJA

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Curva final. **Nomenclatura**

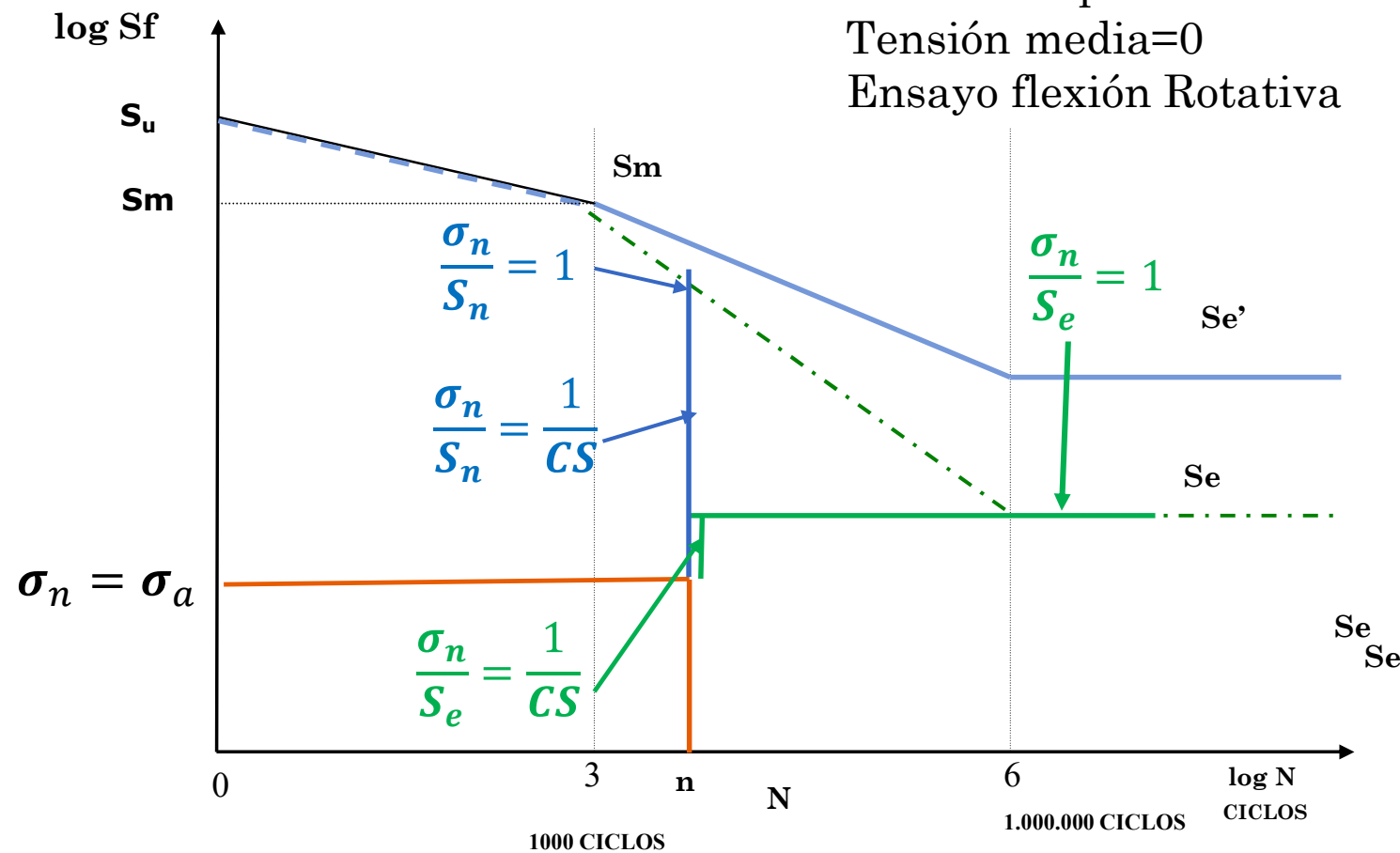
Curva S/N para tensión alternada.
Tensión media=0
Ensayo flexión Rotativa



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

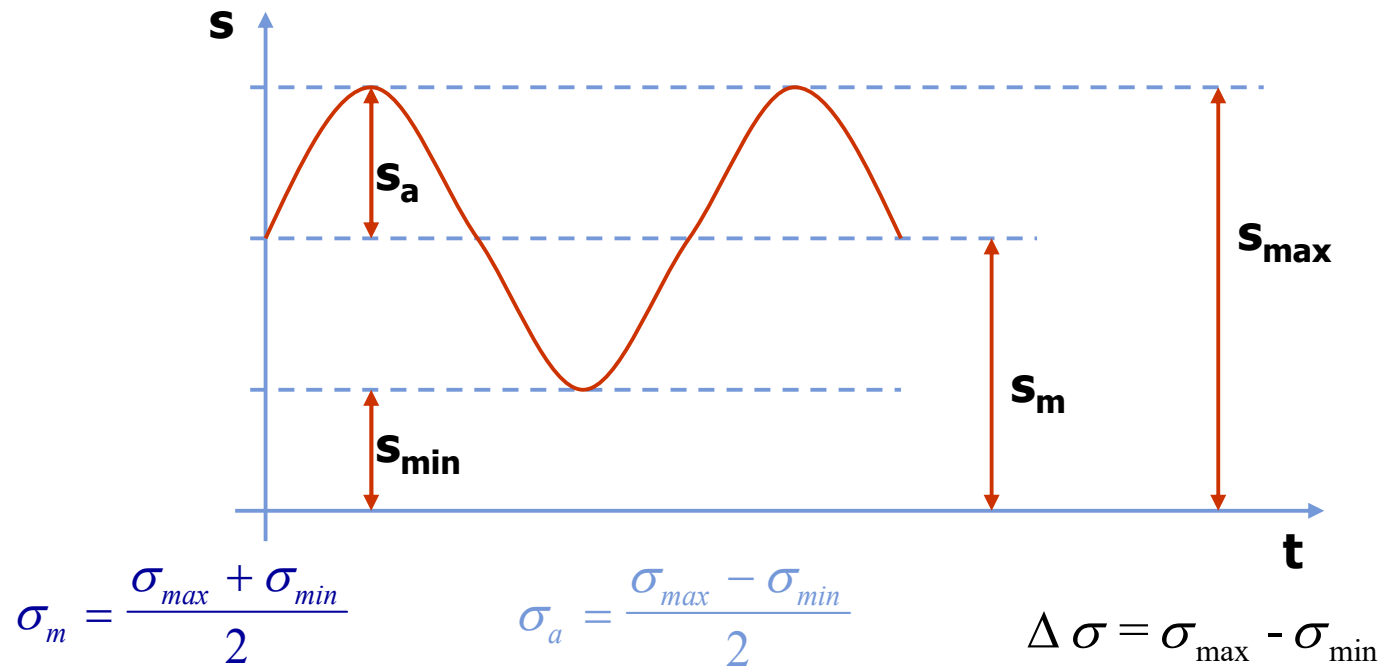
Curva final



RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

- Carga cíclica con tensión media no nula



Tensión Media

Tensión Alternante

Rango

R relación de tensiones y A relación de amplitudes.

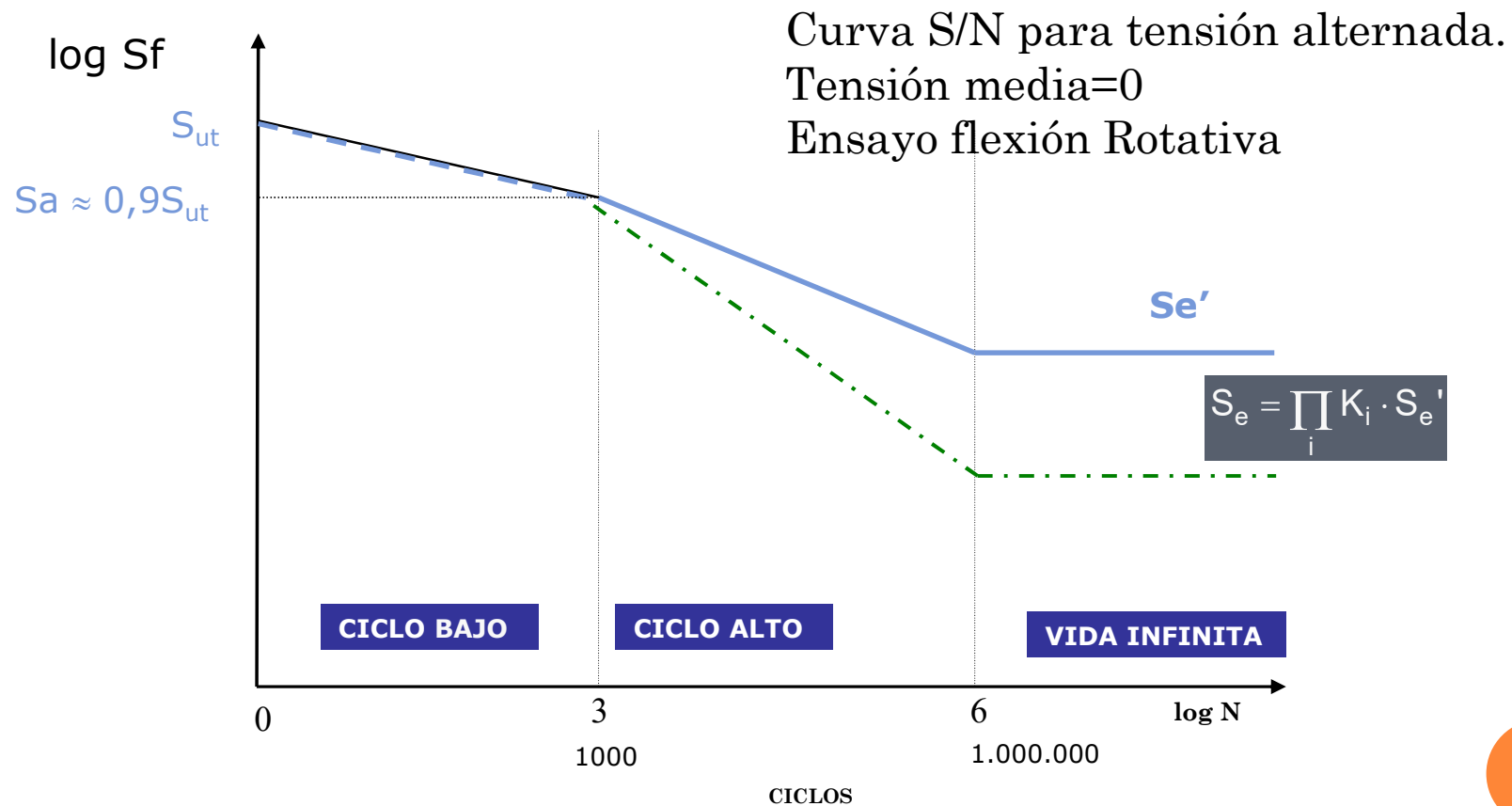
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

116

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

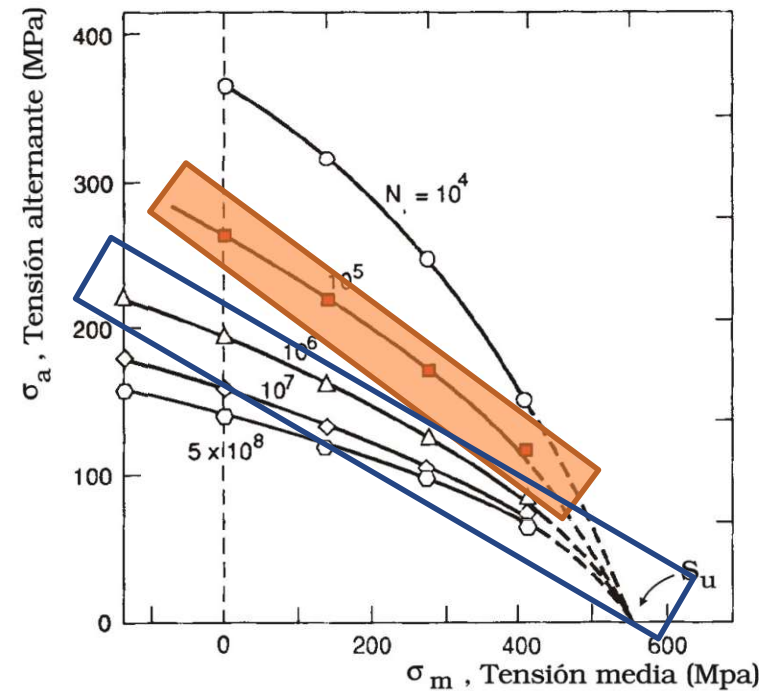
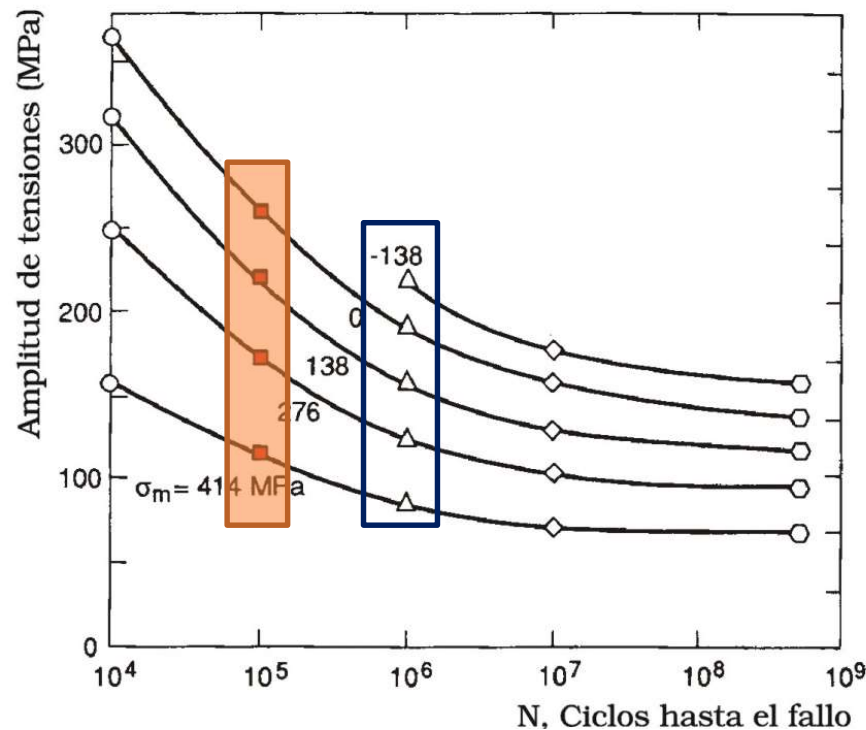
- Gráfico S-N diferente para cada tensión media



RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

- Cuando no existen datos se hacen estimaciones



σ_m de tracción $\Rightarrow$ reduce vida

σ_m de compresión $\Rightarrow$ puede incrementar la vida

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

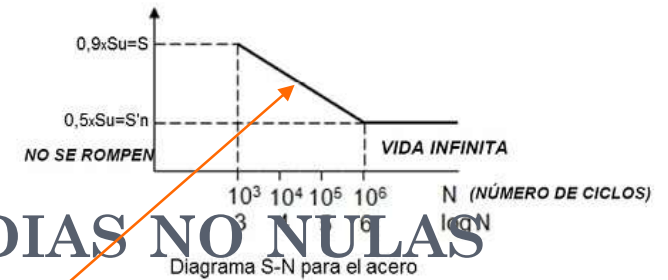
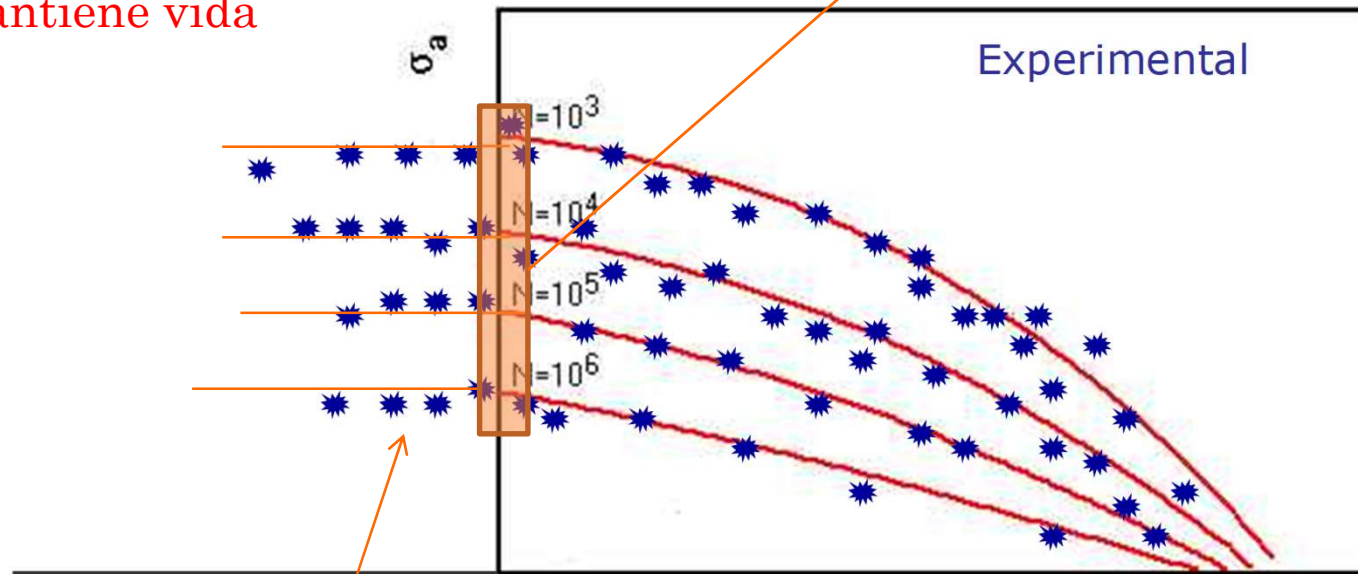
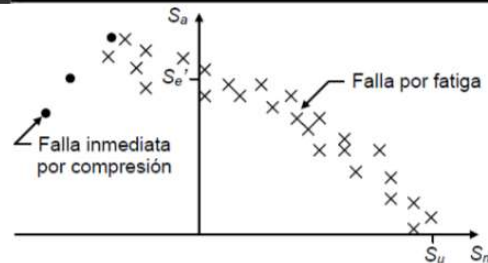


Diagrama de Haigh

Compresión. Tensión alternante Tracción. Menor vida
Mantiene vida

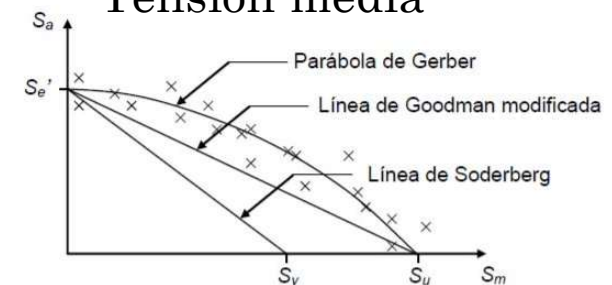


Tensiones medias de compresión



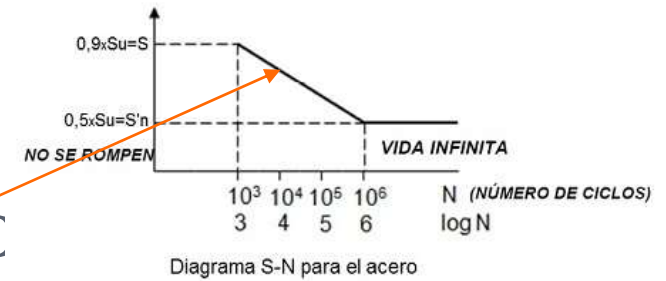
(a) Diagrama S_m-S_a (esfuerzos normales)

Tensión media



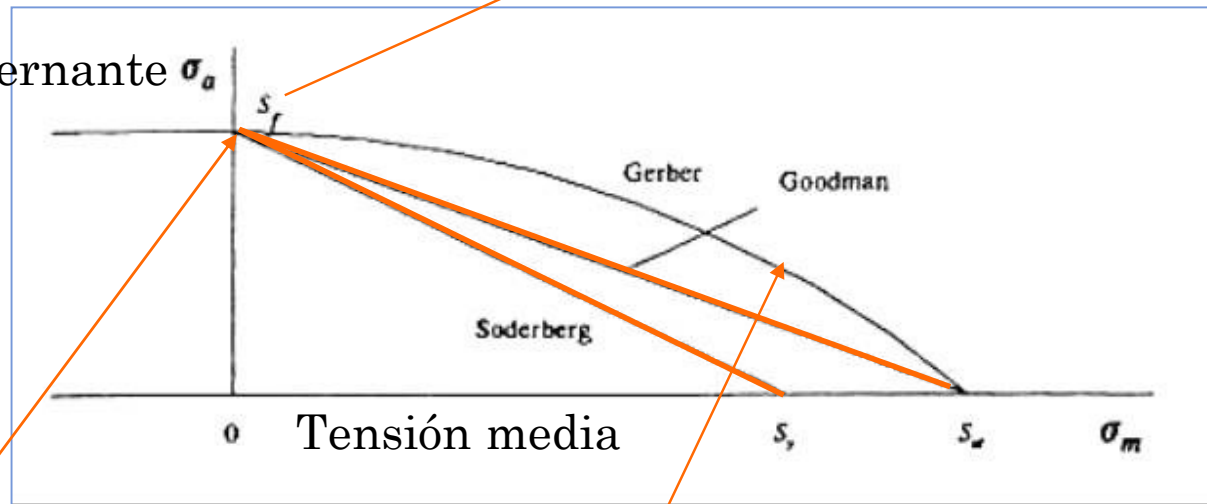
RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEI



○ Criterios de fallo

Tensión alternante σ_a



Un gráfico diferente para cada N ciclos

Criterios de Fallo

$S_e = S_n = S_{en} = S_N$

curva

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

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

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

Goodman

Soderberg

Gerber

$$\frac{\sigma_a}{S_n} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{CS}; \text{ ó }$$

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

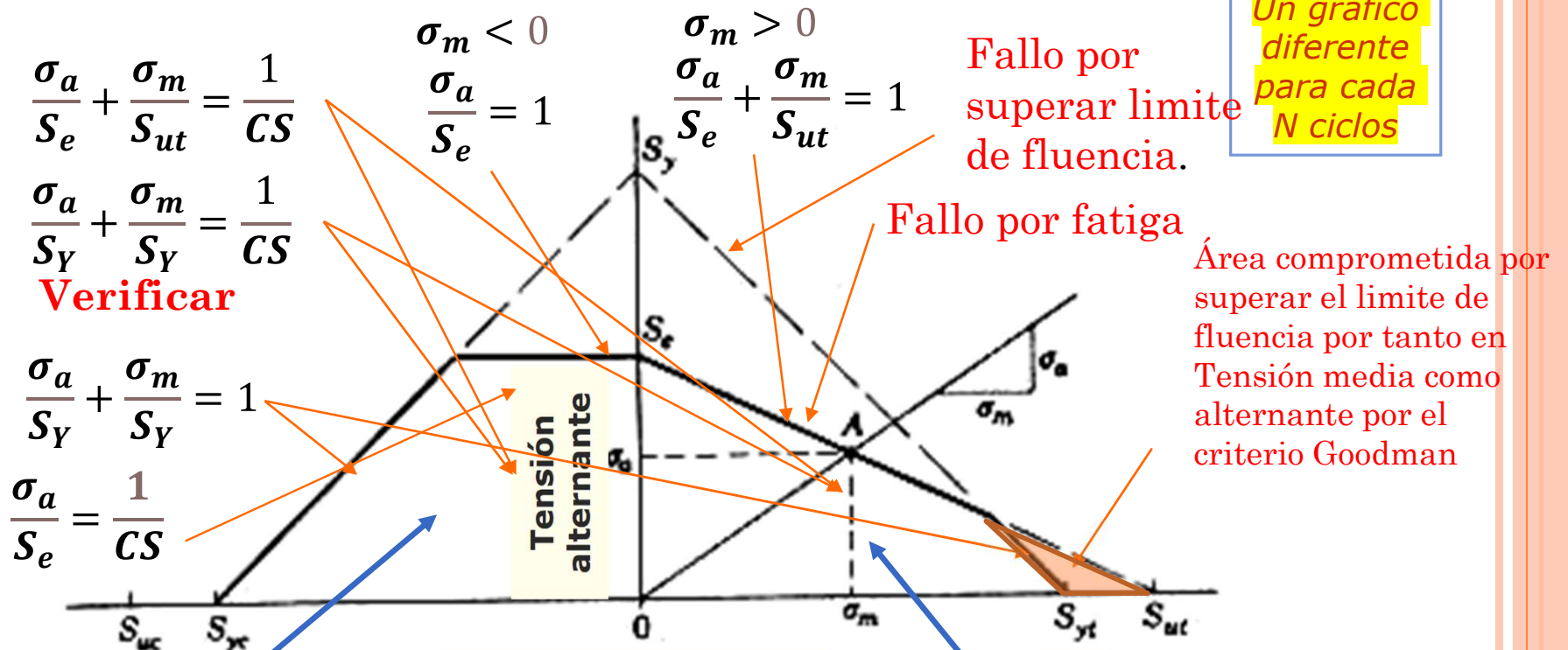
$$\frac{\sigma_a}{S_n} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{CS}; \text{ ó }$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{y20}} = \frac{1}{CS}$$

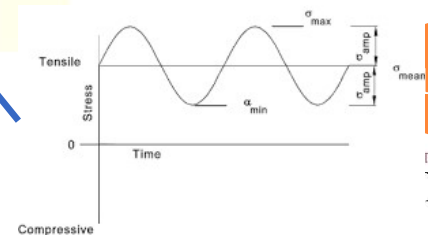
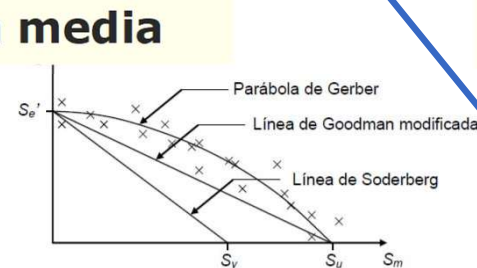
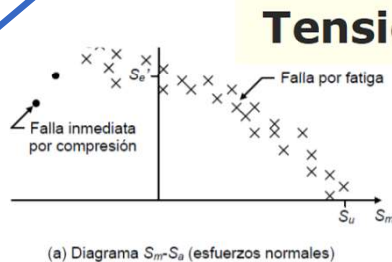
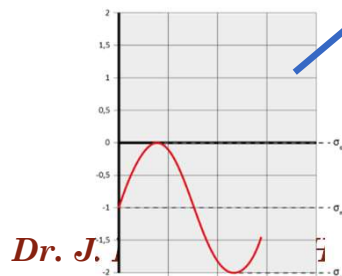
RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

Diagrama de Goodman Modificado



Un gráfico diferente para cada N ciclos

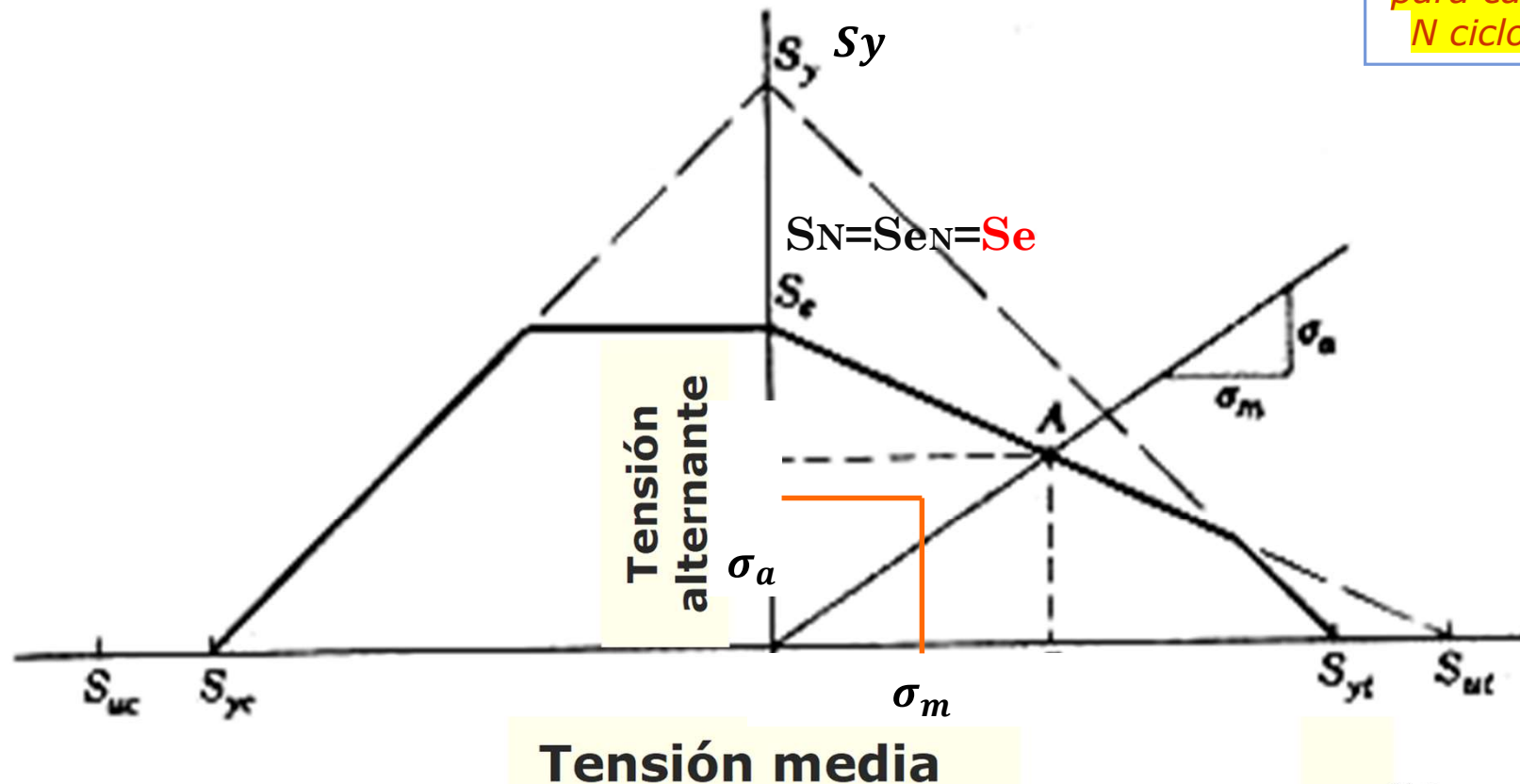


RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

- Diagrama de Goodman Modificado.
- Nomenclatura

Un gráfico diferente para cada N ciclos



RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

- Otros criterios. Diagrama de Goodman modificado

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

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \left(\frac{\sigma_m}{S_{yt}}\right)^4 = 1 \leftarrow \text{Bagci}$$

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

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

○ Diagrama de Smith o de Goodman

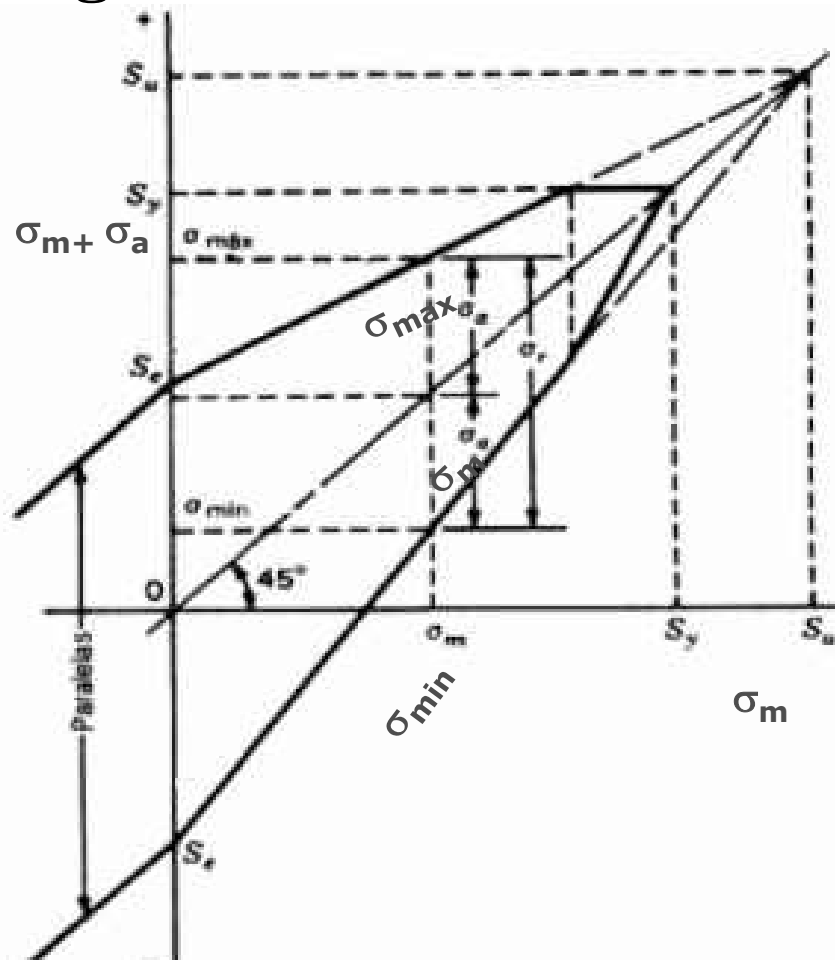
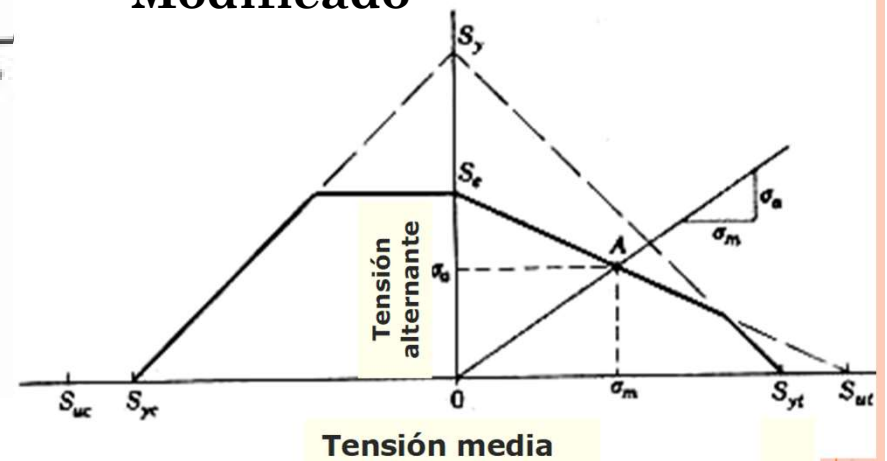


Diagrama de Goodman Modificado



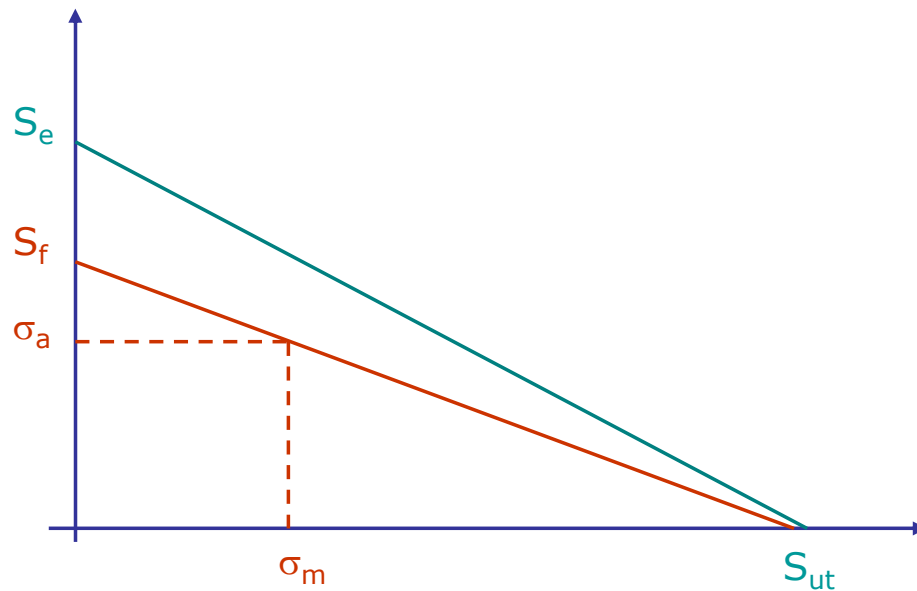
RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

○ Tensión alternante equivalente

- Es el “*límite de fatiga S_f que equivale a una combinación dada (σ_m, σ_a)* ”

Para poder utilizar la curva S-N



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

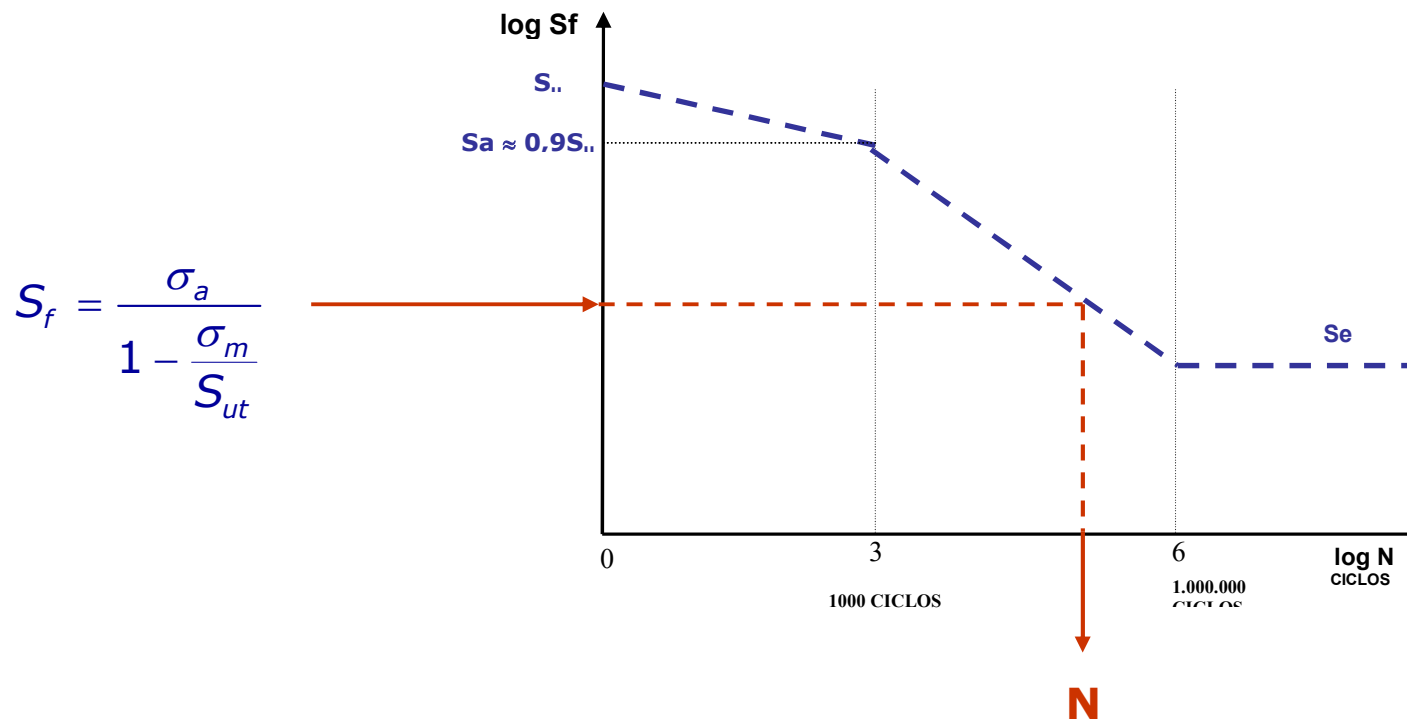
$$S_f = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

○ Tensión alternante equivalente

- Es el “límite de fatiga S_f que equivale a una combinación dada (σ_m , σ_a)”

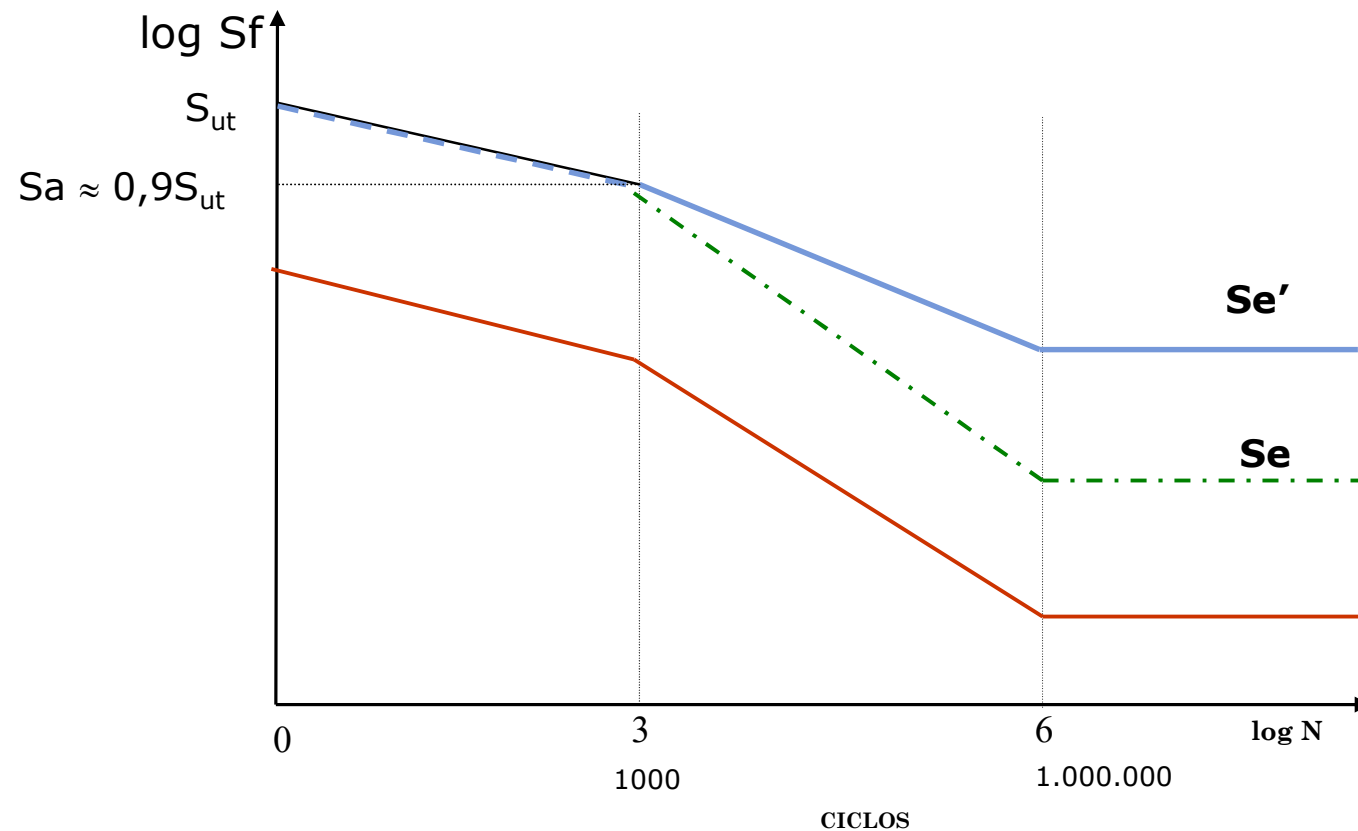


RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

○ Reducción de la Resistencia a Fatiga

- Efecto sobre la resistencia y la duración

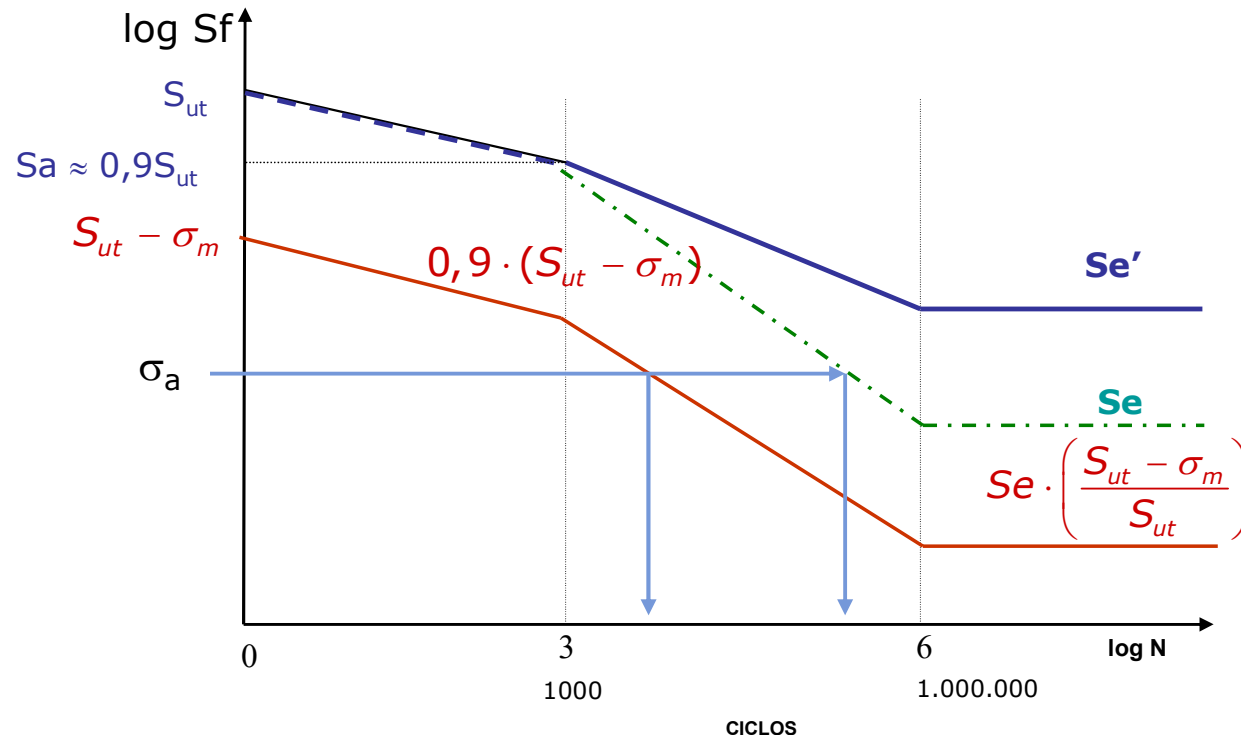


RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

○ Reducción de la Resistencia a Fatiga

- Efecto sobre la resistencia y la duración



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

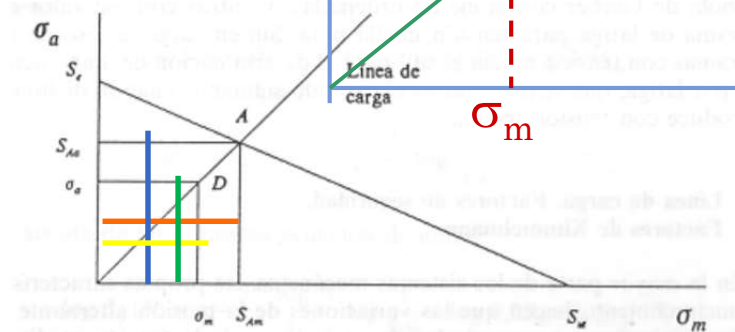
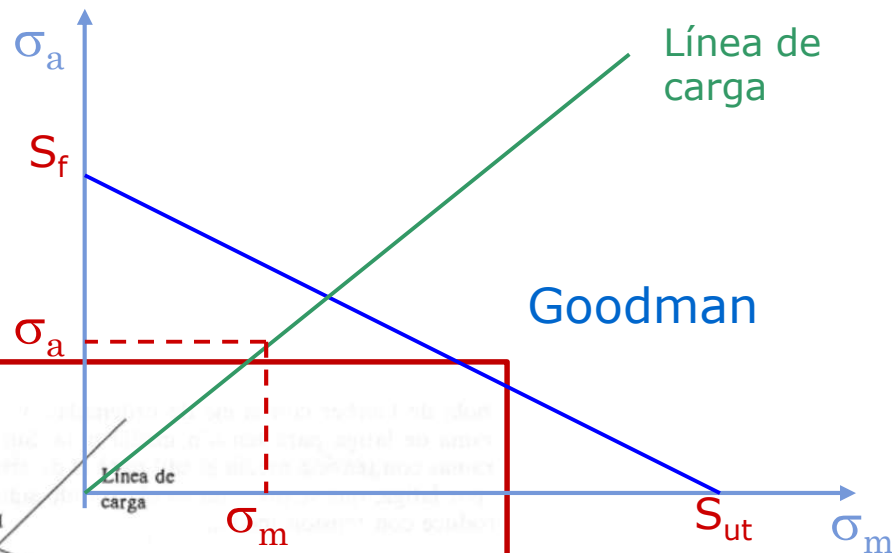
128

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

Coeficiente de seguridad “n”

- “n” es común para tensiones media y alternante



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

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

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

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

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

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

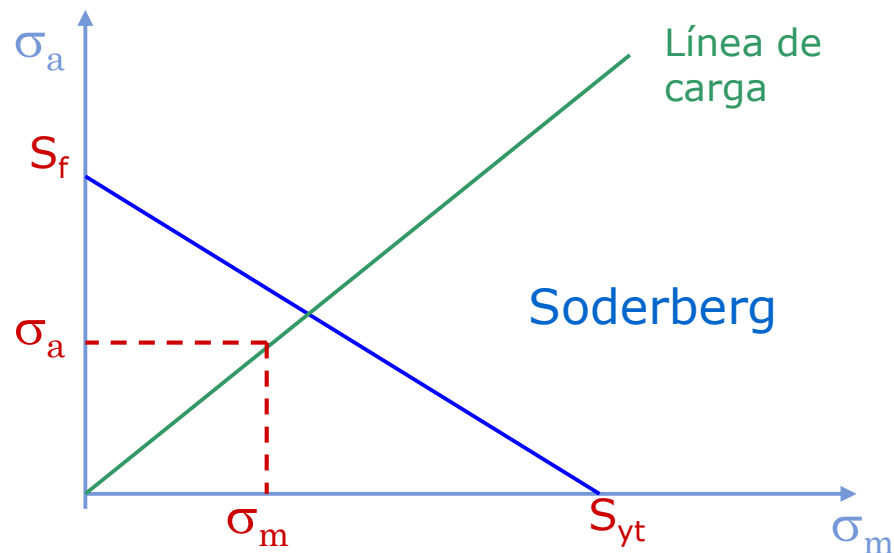
CS

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

○ Coeficiente de seguridad “n”

- “n” es común para tensiones media y alternante



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

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

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

CS

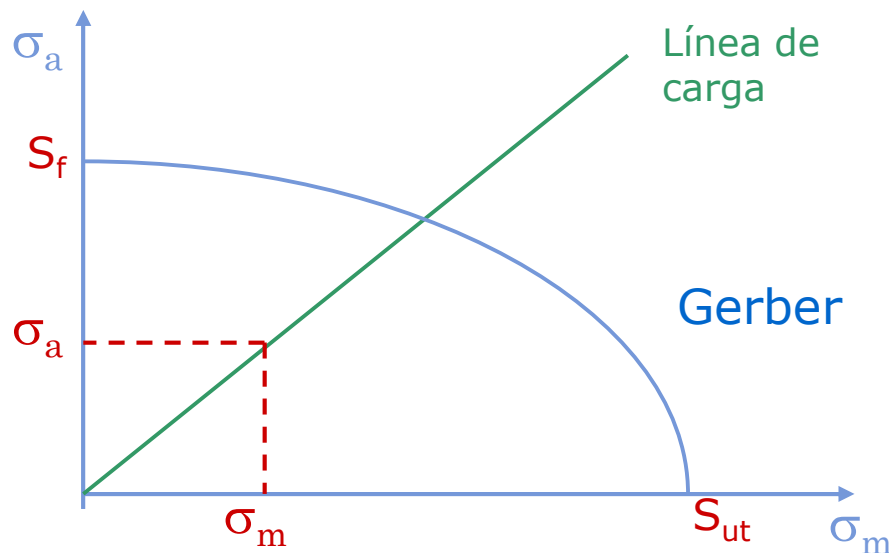
130

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

○ Coeficiente de seguridad “n”

- “n” es común para tensiones media y alternante



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

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

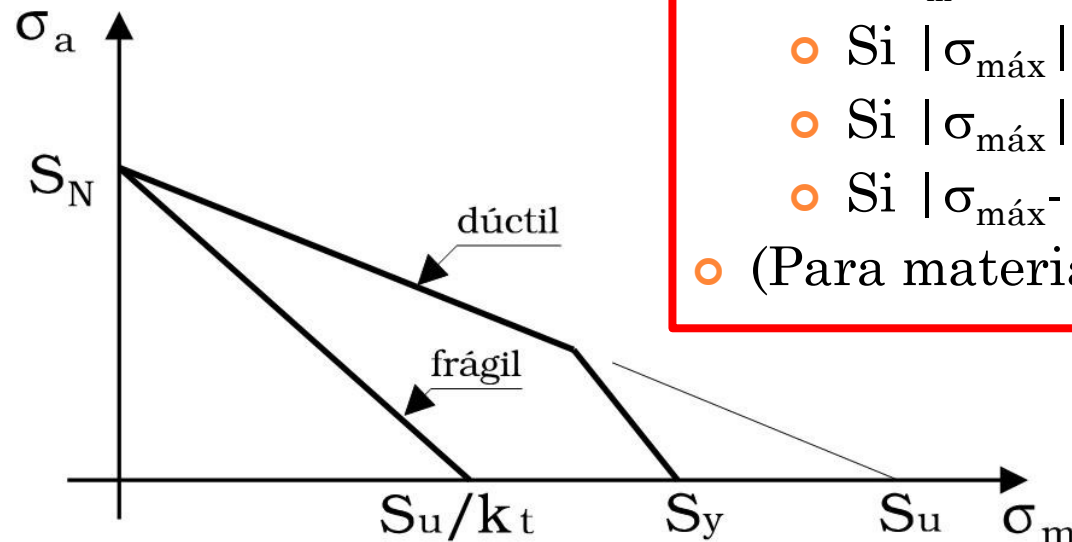
Lo normal es no utilizar materiales frágiles que trabajen a fatiga.

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

○ Entallas con tensión media no nula

- Para $\sigma_m = 0$ la entalla divide el límite de fatiga S_e por K_f
- Para $\sigma_a = 0$
 - Material dúctil -> No hay corrección
 - Material frágil -> Se reduce la resistencia a S_u/K_f

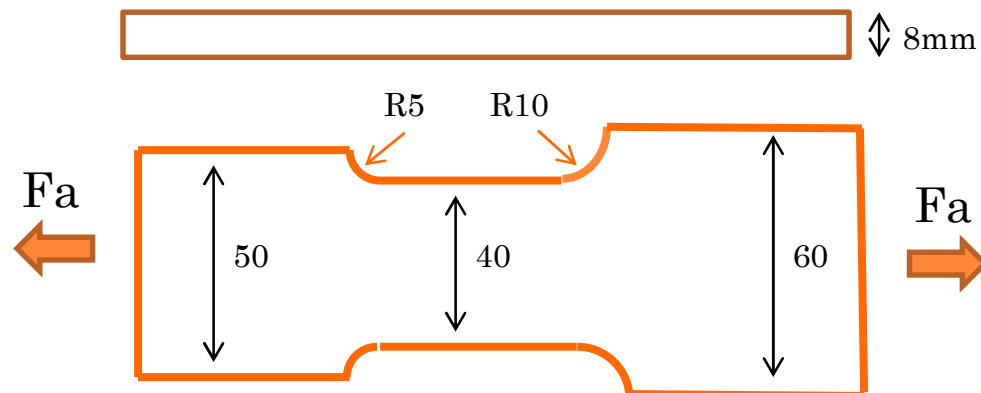


- Para $\sigma_m \neq 0$, se define K_{fm}
 - Si $|\sigma_{m\acute{a}x}| < \sigma_y$, $K_{fm} = K_f$
 - Si $|\sigma_{m\acute{a}x}| > \sigma_y$, $K_{fm} = (\sigma_y - K_f \cdot \sigma_a) / |\sigma_m|$
 - Si $|\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{m}n}| > 2\sigma_y$, $K_{fm} = 0$
- (Para material elastoplástico perfecto)

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

- **Ejercicio:** La pieza mostrada en la figura (unidades en mm) se mecaniza a partir de una placa de acero laminado en frío con $S_{ut}=545 \text{ Mpa}$ y $S_y=365 \text{ MPa}$. La carga axial que se muestra es totalmente alternante: $F_a=6500 \text{ N}$. La temperatura del proceso es de 60°C y se requiere una fiabilidad de 99% en el cálculo.
- Se pide:
 - A) Sección donde probablemente fallará la pieza
 - B) Determinar el factor de seguridad de dicha sección para $N=450.000$ Ciclos y para vida infinita
 - **C) Si se aplica una precarga a tracción $F_m=+1500 \text{ N}$, recalcular los factores de seguridad**



RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

- **Ejercicio:** $S_{ut}=545$ Mpa y $S_y=365$ MPa. La carga axial alterante: $F_a=6500$ N.
- **C) Si se aplica una precarga a tracción $F_m=+1500$ N, recalculer los factores de seguridad.**

- $F_{m\acute{a}x}$ $F_{m\acute{a}n}=$

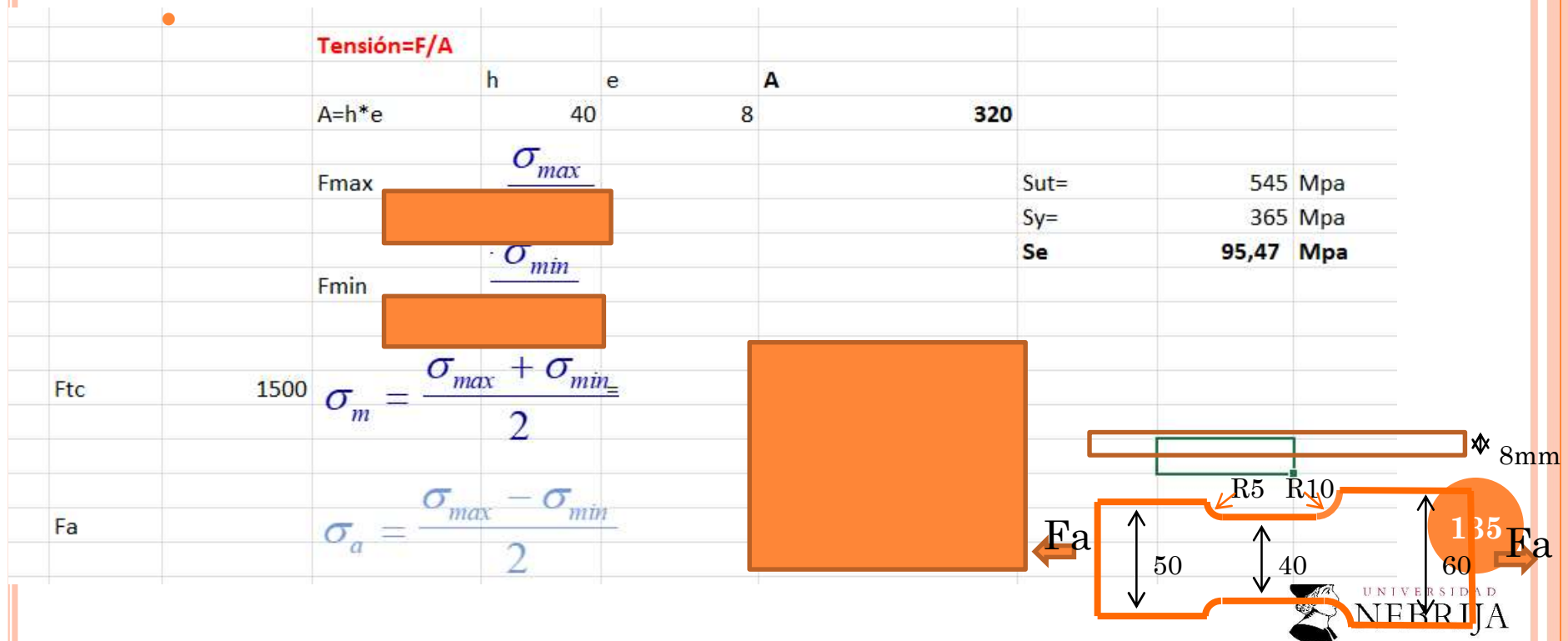
Tensión=F/A		h	e	A			
	$A=h \cdot e$	40	8	320			
	F_{max}	σ_{max}			$S_{ut}=$	545	Mpa
					$S_y=$	365	Mpa
	F_{min}	σ_{min}			S_e	95,47	Mpa
F_{tc}	1500	$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$					
F_a		$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$					

Diagram of a mechanical part with dimensions and stress analysis. The part has a top width of 8mm, a central section with a width of 50mm and a height of 40mm, and a bottom section with a width of 60mm and a height of 134mm. The part is subjected to an axial load F_a . The stress analysis shows a maximum stress σ_{max} and a minimum stress σ_{min} . The mean stress σ_m and stress amplitude σ_a are calculated. The part is made of a material with $S_{ut}=545$ Mpa, $S_y=365$ Mpa, and $S_e=95,47$ Mpa.

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

- **Ejercicio:** $S_{ut}=545$ Mpa y $S_y=365$ MPa. La carga axial alterante: $F_a=6500$ N.
- **C) Si se aplica una precarga a tracción $F_m=+1500$ N, recalcular los factores de seguridad.**
 - $F_{\max} = 8000$ N. $F_{\min} = -5000$ N.



RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

- **Ejercicio:** $S_{ut}=545$ Mpa y $S_y=365$ MPa. La carga axial alternante: $F_a=6500$ N.
- **C) Si se aplica una precarga a tracción $F_m=+1500$ N, recalcular los factores de seguridad.**
 - $F_{m\acute{a}x} = 8000$ N. $F_{min} = -5000$ N.

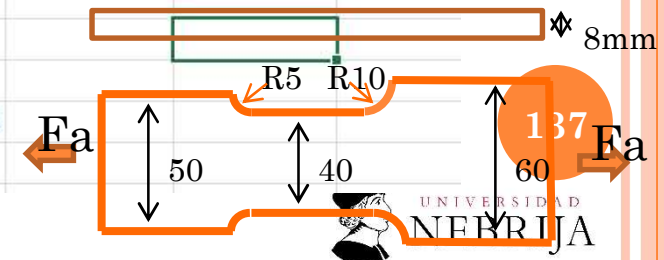
Tensión=F/A					
		h	e	A	
	$A=h*e$	40	8	320	
	F_{max}	σ_{max}			$S_{ut}=545$ Mpa
	8000	25			$S_y=365$ Mpa
	F_{min}	σ_{min}			Se 95,47 Mpa
	-5000	-15,625			
F_{tc}	1500	$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$			
			2		
F_a		$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$			
			2		

RESISTENCIA A LA FATIGA

7. ANÁLISIS CON TENSIONES MEDIAS NO NULAS

- **Ejercicio:** $S_{ut}=545$ Mpa y $S_y=365$ MPa. La carga axial alternante: $F_a=6500$ N.
- **C) Si se aplica una precarga a tracción $F_m=+1500$ N, recalcular los factores de seguridad.**
 - $F_{\text{máx}} = 8000$ N. $F_{\text{min}} = -5000$ N.

Tensión=F/A				
	h	e	A	
A=h*e	40	8	320	
Fmax	$\sigma_{\max}$			Sut= 545 Mpa
8000	25			Sy= 365 Mpa
Fmin	$\sigma_{\min}$			Se 95,47 Mpa
-5000	-15,625			
Ftc 1500	$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$		$\sigma_m = 4,6875$	
Fa	$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$		$\sigma_a = 20,3125$	



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- B) Determinar el factor de seguridad de dicha sección para N=450.000 Ciclos y para vida infinita
- La carga axial alternante: Fa=6500N.
- Fmáx = 8000 N. Fmin= -5000 N

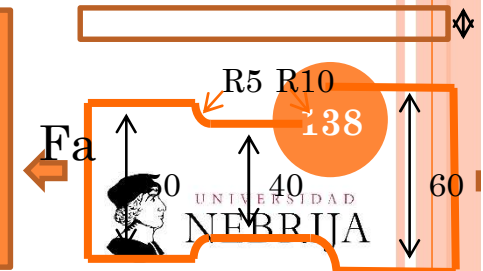
Factor de seguridad

$$CS = n_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_d}$$

donde: σ_y es el esfuerzo normal permisible y σ_d es el esfuerzo normal obtenido en el diseño.

N	450.000
Sn	112,94
Sd	20,3125
CS= ns=	5,56

N	1.000.000
Se	95,47
Sd	20,3125
CS= ns=	4,70



$\sigma_a =$	20,3125	$\sigma_m =$	4,6875		
Sn	=	112,94	Sut	=	545,00

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

$\sigma_a =$	20,3125	$\sigma_m =$	4,6875		
Se	=	95,47	Sut	=	545,00

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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- B) Determinar el factor de seguridad de dicha sección para N=450.000 Ciclos y para vida infinita
- La carga axial alternante: Fa=6500N.
- Fmáx = 8000 N. Fmin= -5000 N

Factor de seguridad

$$CS = n_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_d}$$

donde: σ_y es el esfuerzo normal permisible y σ_d es el esfuerzo normal obtenido en el diseño.

$$\sigma_a = 20,3125 \quad \sigma_m = 4,6875$$

$$S_n = 112,94 \quad S_{ut} = 545,00$$

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

$$\frac{20,3125}{112,94} + \frac{4,69}{545} = \frac{1}{cs(450000)}$$

$$cs(450000) = 5,31$$

$$\sigma_a = 20,3125 \quad \sigma_m = 4,6875$$

$$S_e = 95,47 \quad S_{ut} = 545,00$$

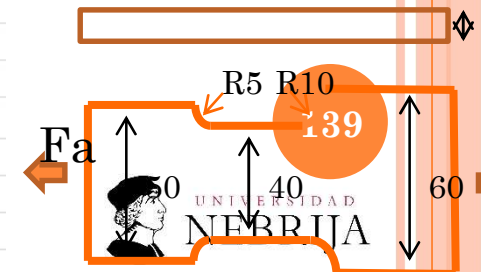
$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{CS}$$

$$\frac{20,3125}{95,47} + \frac{4,69}{545} = \frac{1}{cs(1000000)}$$

$$cs(1000000) = 4,52$$

N	450.000
Sn	112,94
Sd	20,3125
CS= ns=	5,56

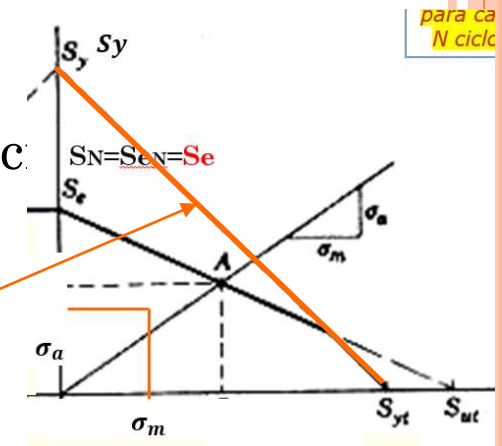
N	1.000.000
Se	95,47
Sd	20,3125
CS= ns=	4,70



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- B) Determinar el factor de seguridad de dicha secc. N=450.000 Ciclos y para vida infinita
- La carga axial alternante: Fa=6500N.
- Fmáx = 8000 N. Fmin= -5000 N



Verificación Fluencia

$$\sigma_a = 20,3125$$

$$\sigma_m = 4,6875$$

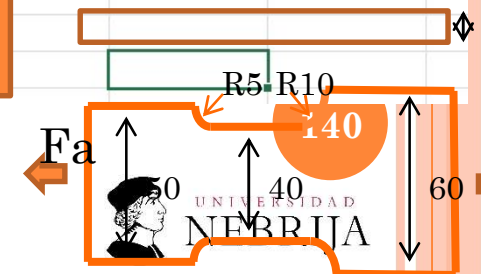
Sy	=	365,00	Sy	=	365,00
----	---	--------	----	---	--------

$$\frac{\sigma_a}{S_y} + \frac{\sigma_m}{S_y} < 1$$

$$\frac{\sigma_a}{S_y} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{CS}$$

N	450000
Sn	112,94

1 Cumple

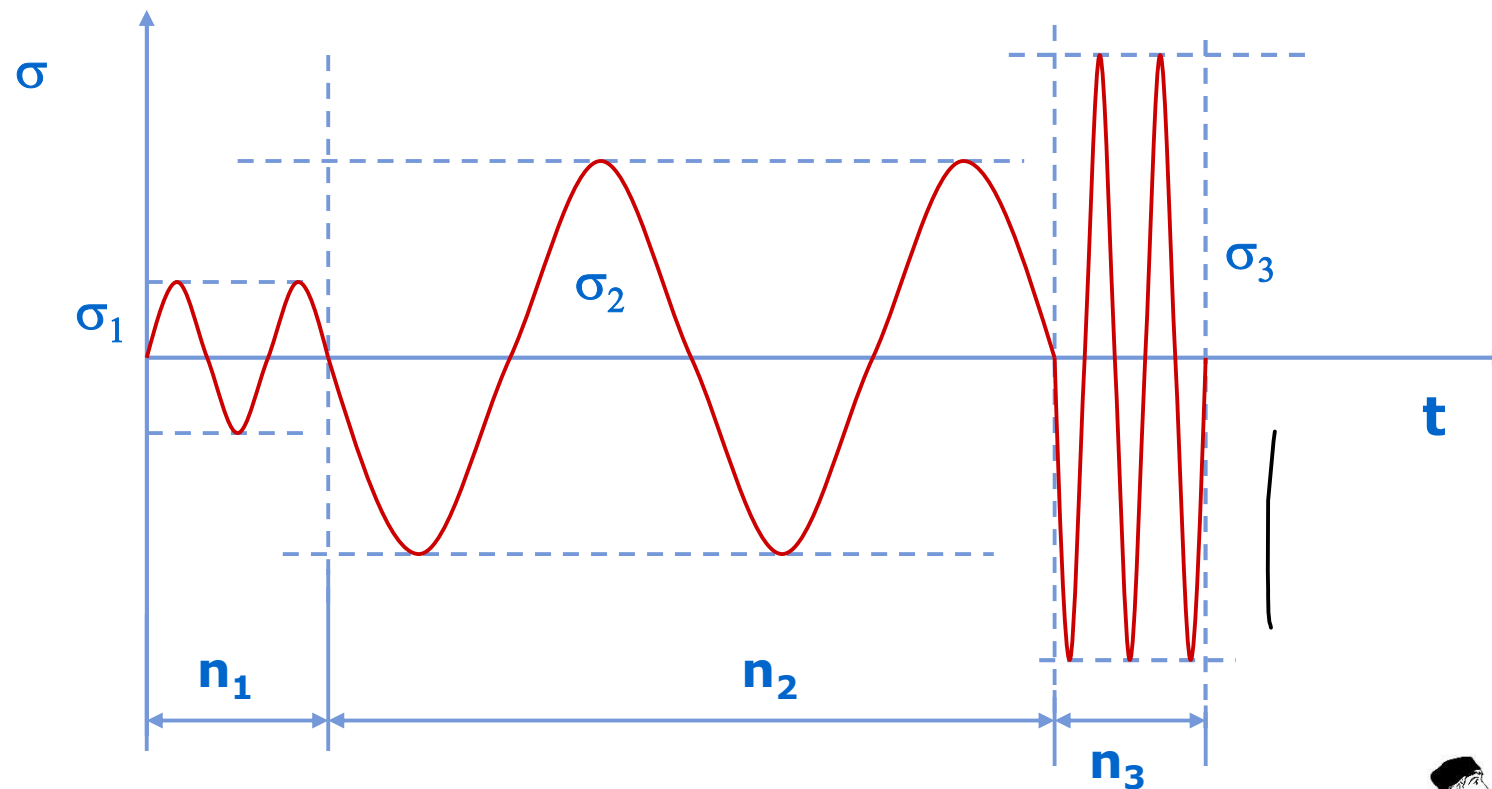


RESISTENCIA A LA FATIGA

8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

○ Regla de Miner (o de Palmgren-Miner)

- Amplitudes variables



RESISTENCIA A LA FATIGA

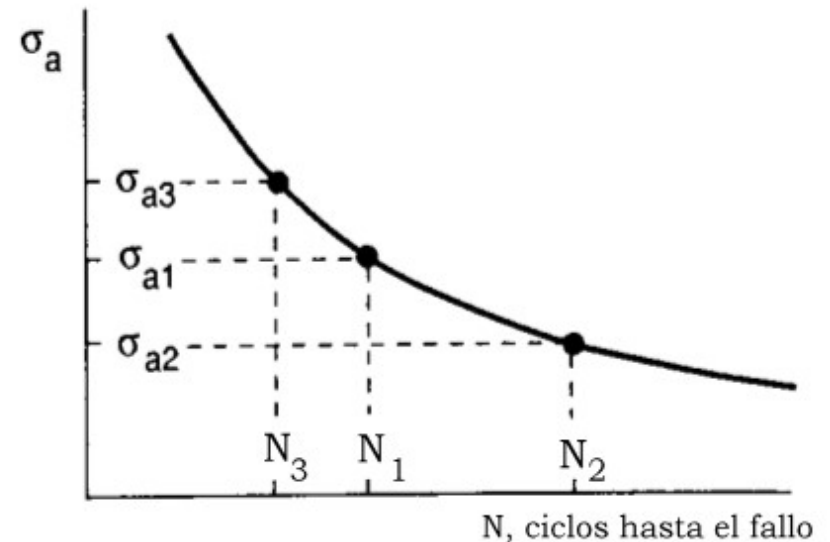
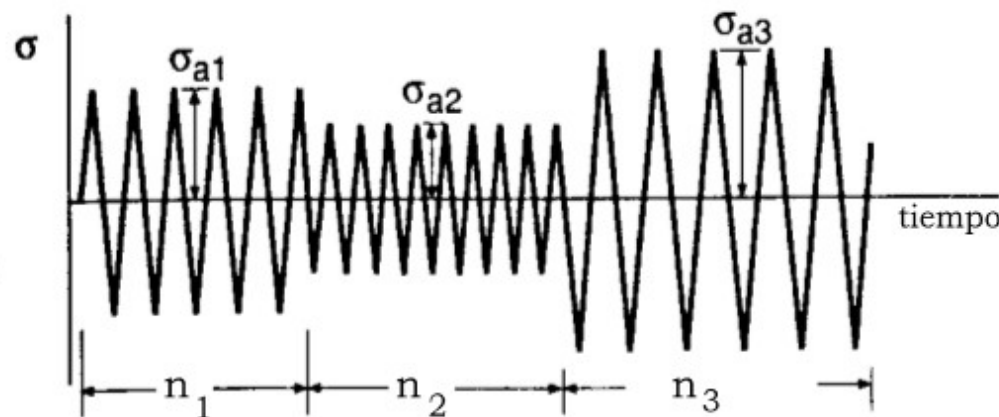
8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

Regla de Miner (o de Palmgren-Miner)

- Limitación: No considera la secuencia de aplicación

Fundamentos de fatiga

Con éste se construye la regla de Palmgren-Miner de daño acumulado, que pondera ciclos y cargas.



$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1$$

Acumulación de daño.

N_n = nº ciclos para llegar a la rotura por fatiga a una tensión determinada,
 n_n = nº ciclos realizados para una tensión aplicada.

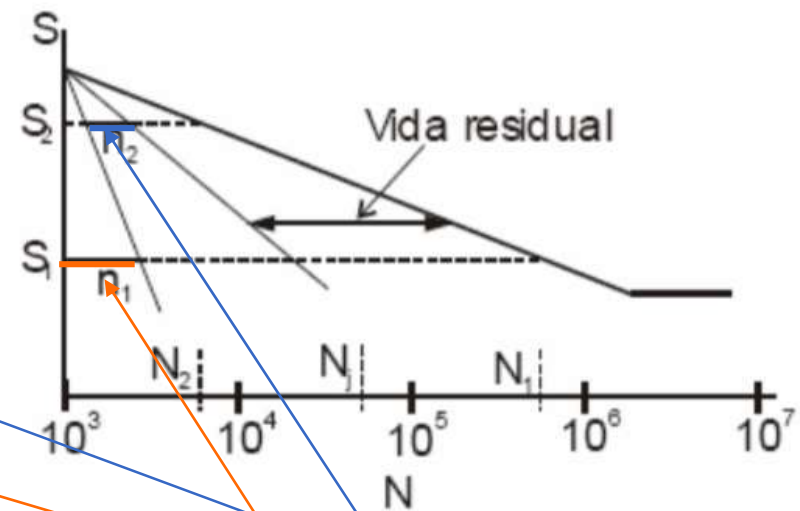
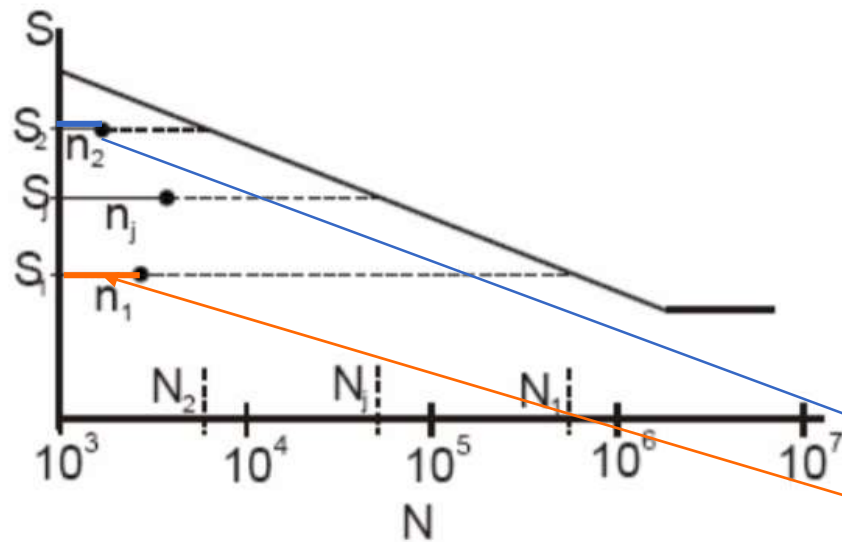
REGLA DE MINER

Porcentaje de vida ocupada con el nivel $S_1 \Rightarrow n_j/N_j$

$$\text{Daño} = D_j = \frac{n_j}{N_j}$$

$$\text{Daño total} = D = \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_j}$$

Fallo $\Rightarrow D = 1$



$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1$$

RESISTENCIA A LA FATIGA

8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA



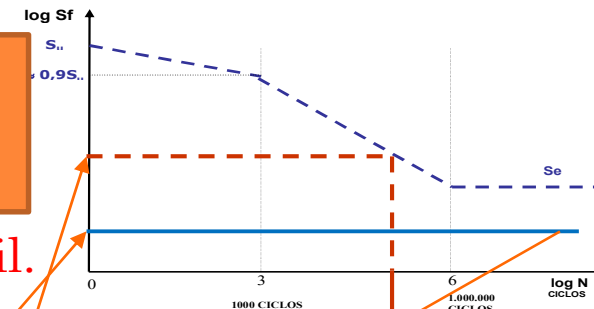
○ Regla de Miner (o de Palmgren-Miner)

- CASO. Avión. Las aceleraciones experimentadas y recopiladas en un período de **3000 Hs** de operación, debidas principalmente a ráfagas, establecieron ciertos niveles de tensiones en un componente.

Conocidas las características de la aeronave y las aceleraciones, se determinaron las tensiones en el herraje de toma de ala - montante.



A este ritmo lleva consumido el 60% de su vida útil.



Banda de la ráfaga (fps) (en 3000 Hs)	Número de encuentros (n)	Tensión (PSI)	Ciclos hasta la falla (N)
3-5	910.000	3.000	Infinitos
5-7	72.000	4.800	$3 \cdot 10^6$
7-12	14.100	6.550	$1,5 \cdot 10^6$
12-17	5.500	8.780	$4 \cdot 10^5$
17-20	7.800	10.000	$1,5 \cdot 10^4$

RESISTENCIA A LA FATIGA

8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA



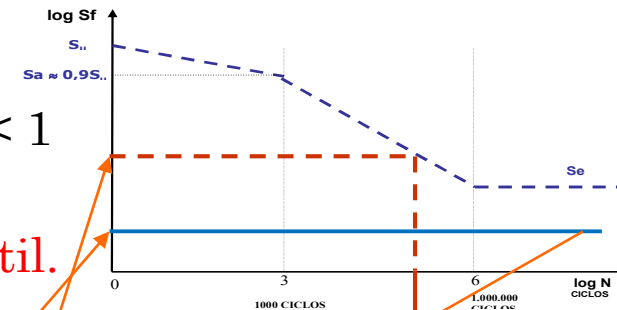
○ Regla de Miner (o de Palmgren-Miner)

- CASO. Avión. Las aceleraciones experimentadas y recopiladas en un período de **3000 Hs** de operación, debidas principalmente a ráfagas, establecieron ciertos niveles de tensiones en un componente.

Conocidas las características de la aeronave y las aceleraciones, se determinaron las tensiones en el herraje de toma de ala - montante.

$$\sum \frac{910000}{\infty} + \frac{72000}{3 \cdot 10^6} + \frac{14100}{1.5 \cdot 10^6} + \frac{5500}{4 \cdot 10^5} + \frac{7800}{1.5 \cdot 10^4} \approx 0,6 < 1$$

A este ritmo lleva consumido el 60% de su vida útil.



Banda de la ráfaga (fps) (en 3000 Hs)	Número de encuentros (n)	Tensión (PSI)	Ciclos hasta la falla (N)
3-5	910.000	3.000	Infinitos
5-7	72.000	4.800	$3 \cdot 10^6$
7-12	14.100	6.550	$1,5 \cdot 10^6$
12-17	5.500	8.780	$4 \cdot 10^5$
17-20	7.800	10.000	$1,5 \cdot 10^4$

RESISTENCIA A LA FATIGA

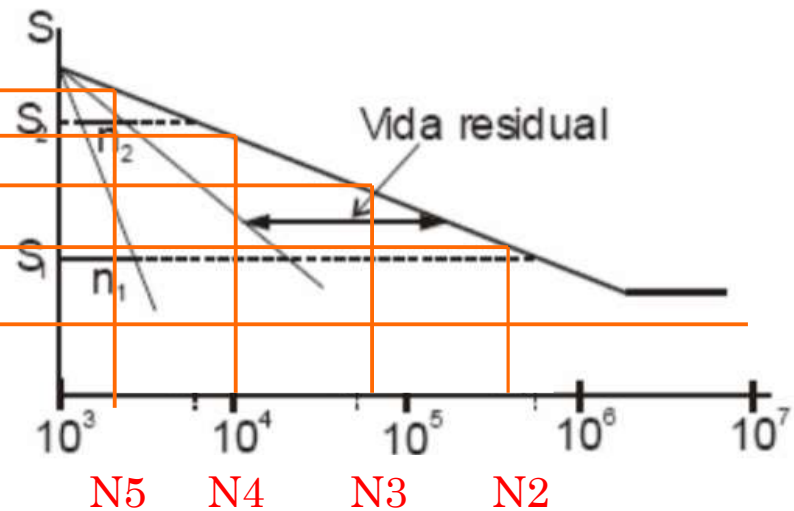
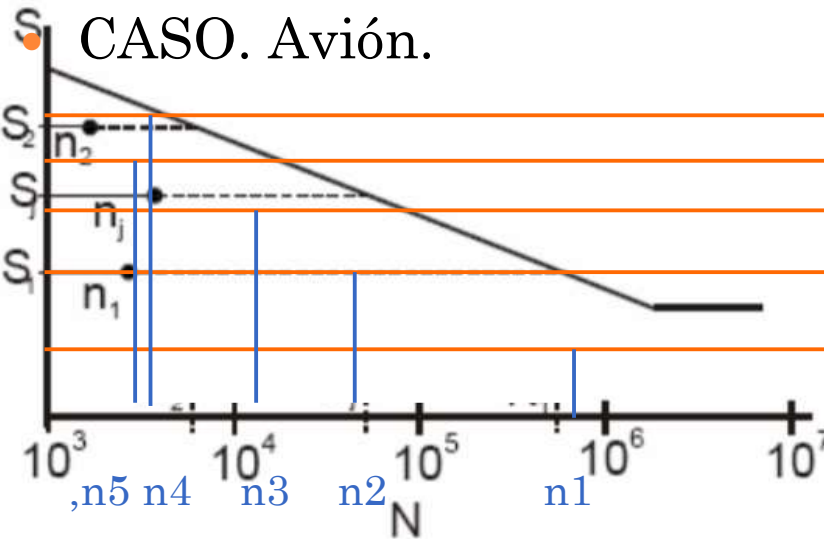
8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA



Regla de Miner (o de Palmgren-Miner)

CASO. Avión.

Sn5
Sn4
Sn3
Sn2
Sn1



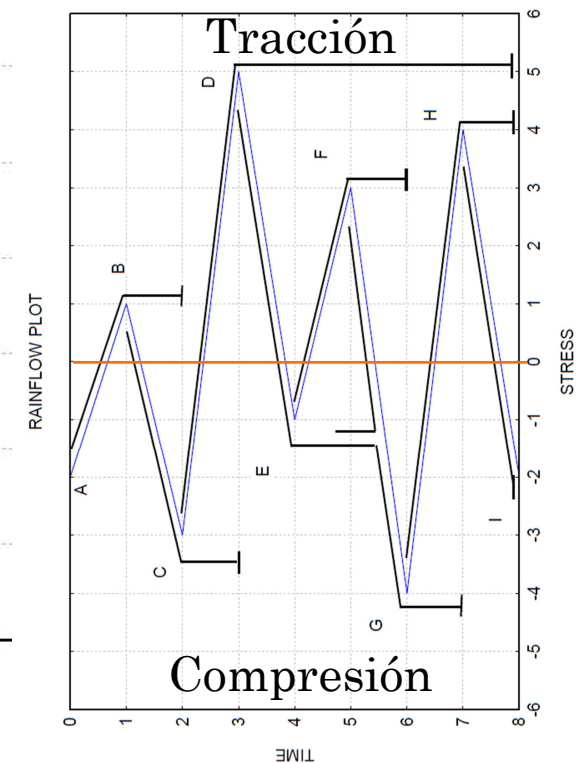
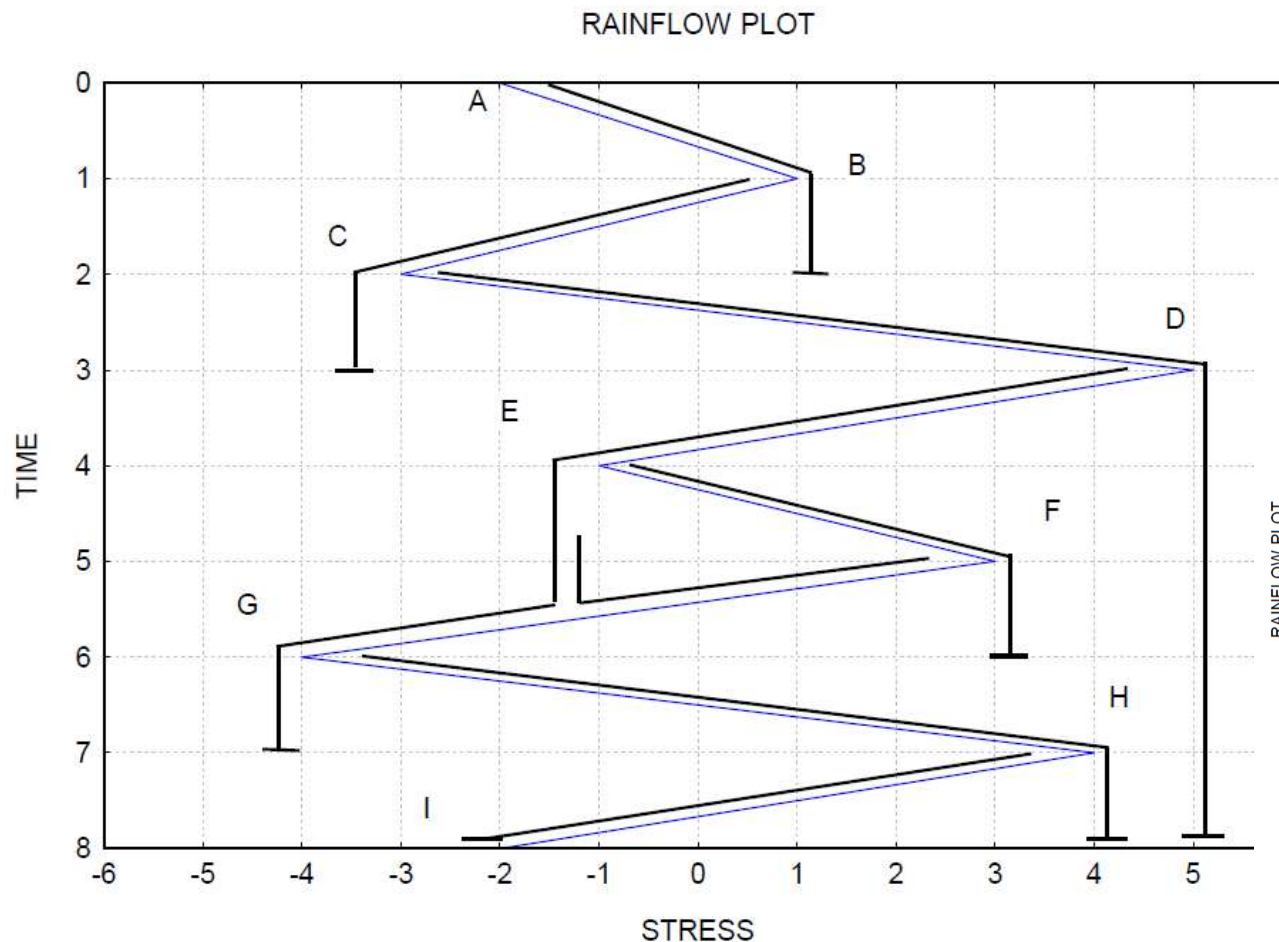
Banda de la ráfaga (fps) (en 3000 Hs)	Número de encuentros (n)	Tensión (PSI)	Ciclos hasta la falla (N)
Sn1 3-5	,n1 910.000	3.000	N1 Infinitos
Sn2 5-7	,n2 72.000	4.800	N2 3 10^6
Sn3 7-12	,n3 14.100	6.550	N3 1,5 10^6
Sn4 12-17	,n4 5.500	8.780	N4 4 10^5
Sn5 17-20	,n5 7.800	10.000	N5 1,5 10^4

$$\sum \frac{910000}{\infty} + \frac{72000}{3 \cdot 10^6} + \frac{14100}{1,5 \cdot 10^6} + \frac{5500}{4 \cdot 10^5} + \frac{7800}{1,5 \cdot 10^4}$$

RESISTENCIA A LA FATIGA

8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

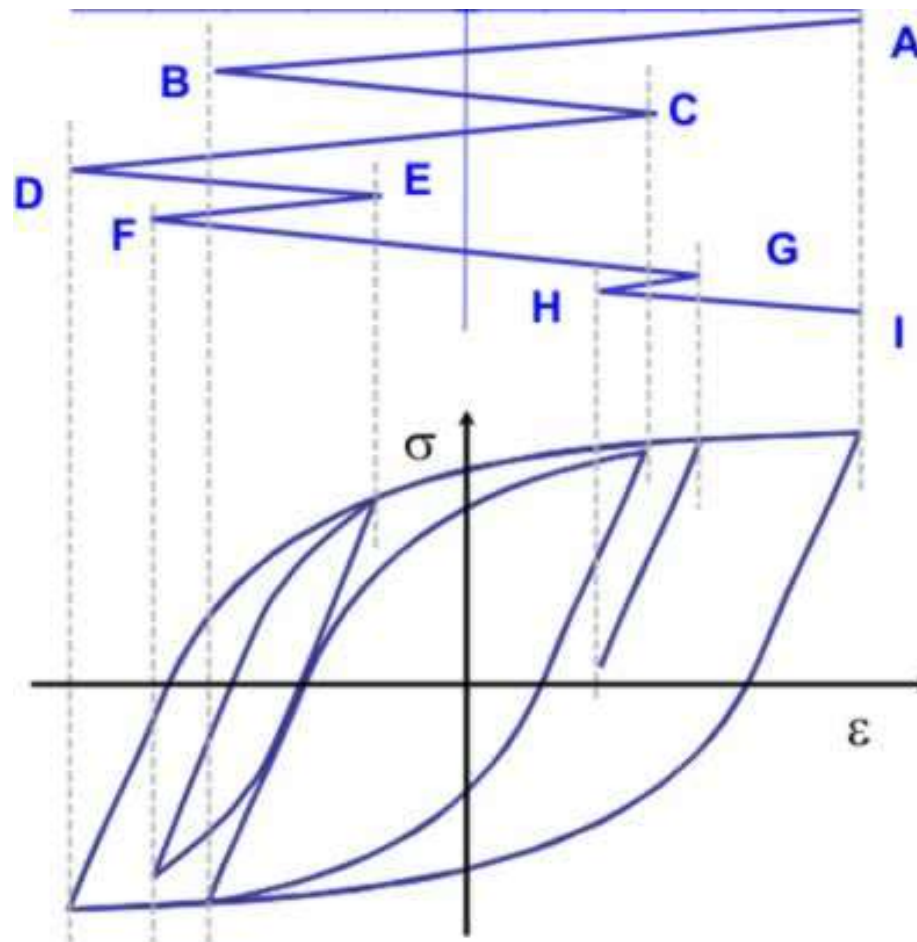
- Método Rainflow (Algoritmo ENDO)



RESISTENCIA A LA FATIGA

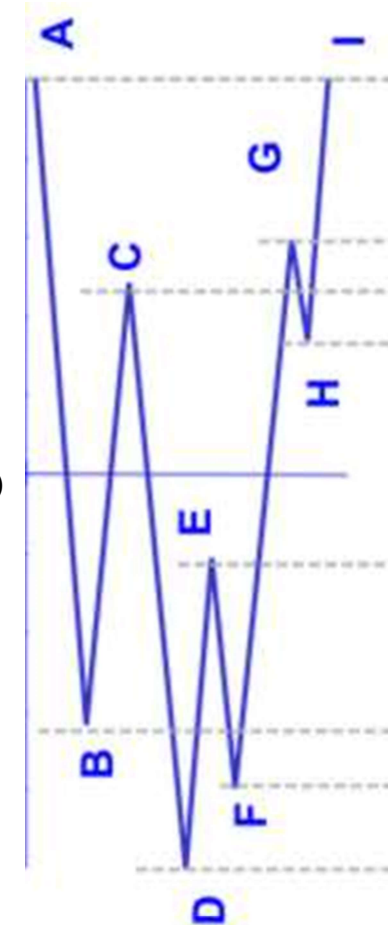
8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

○ Método Rainflow



Tensión

0

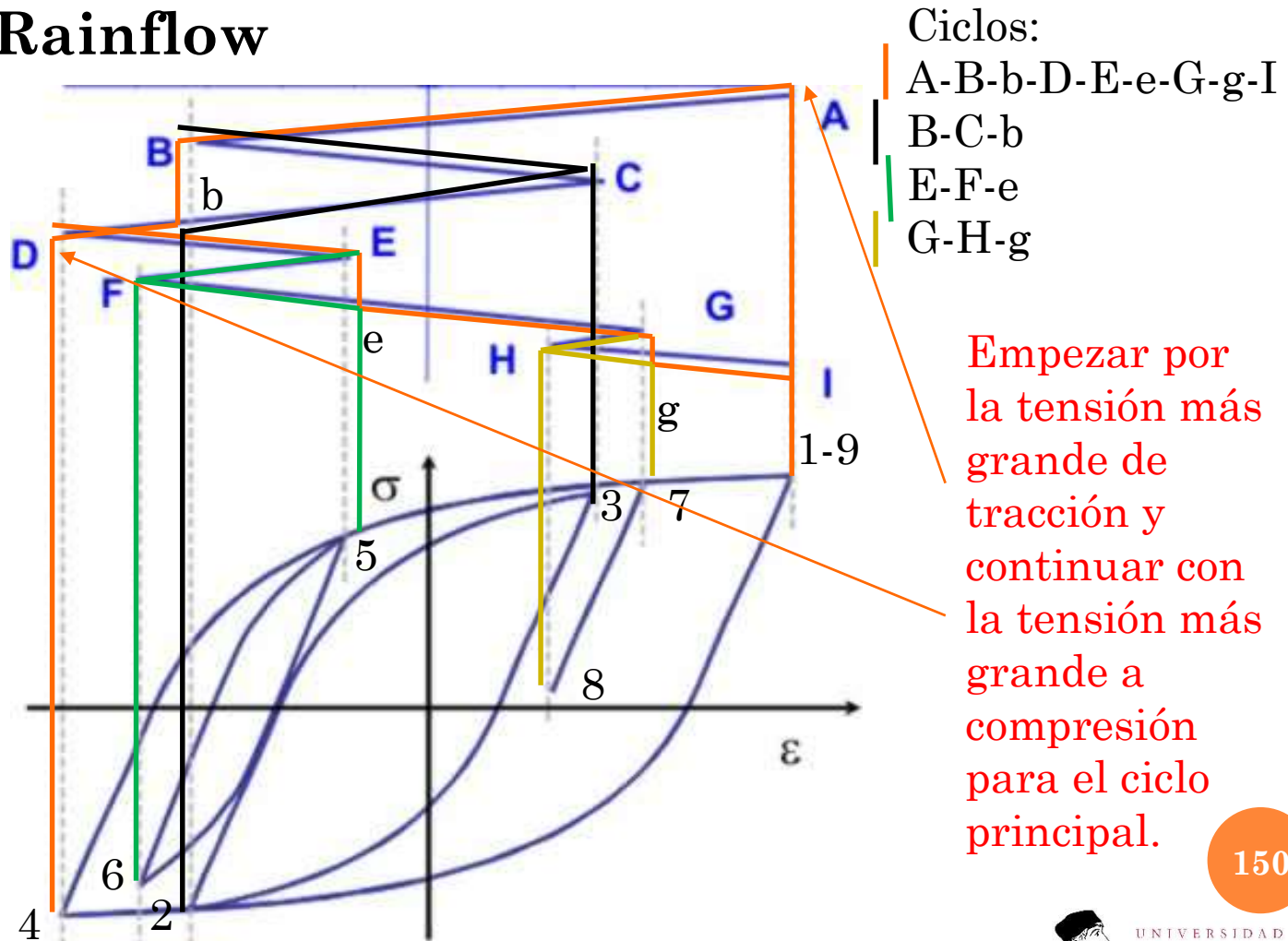


Tiempo

RESISTENCIA A LA FATIGA

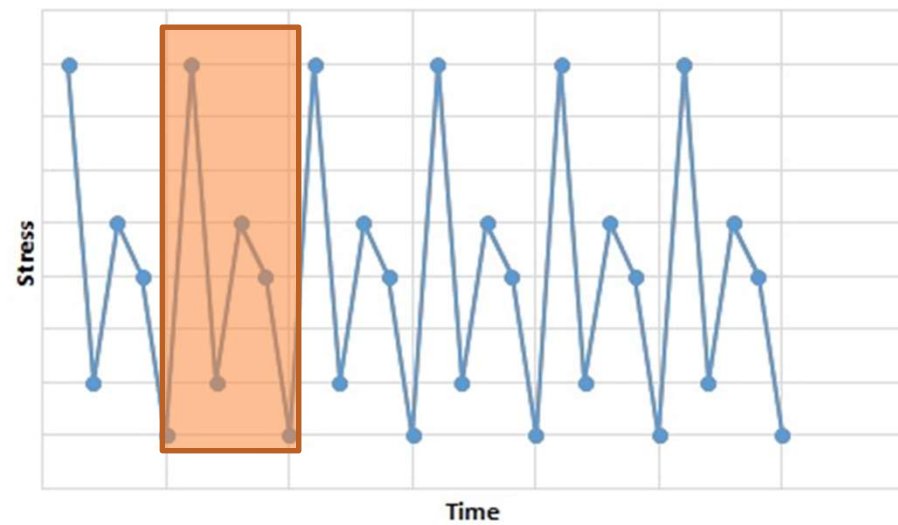
8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

○ Método Rainflow

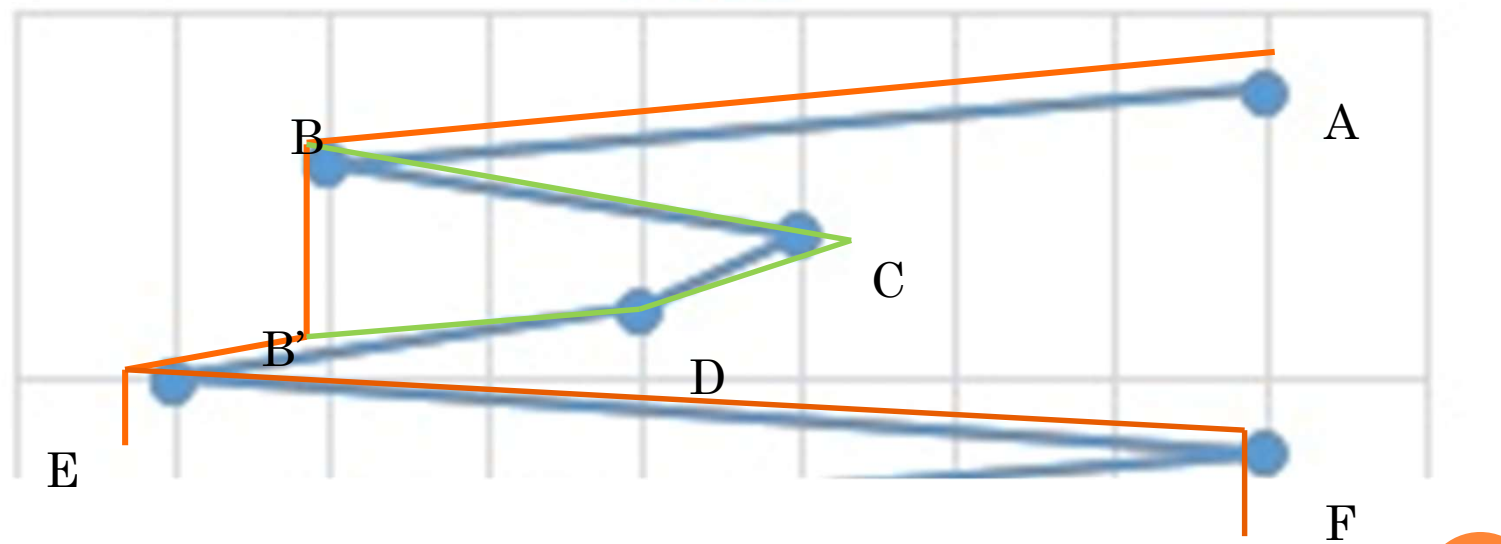


150

Ciclo



- 1 A-B-B'-E-F
- 2 B-C-D-B' = B-C-B'

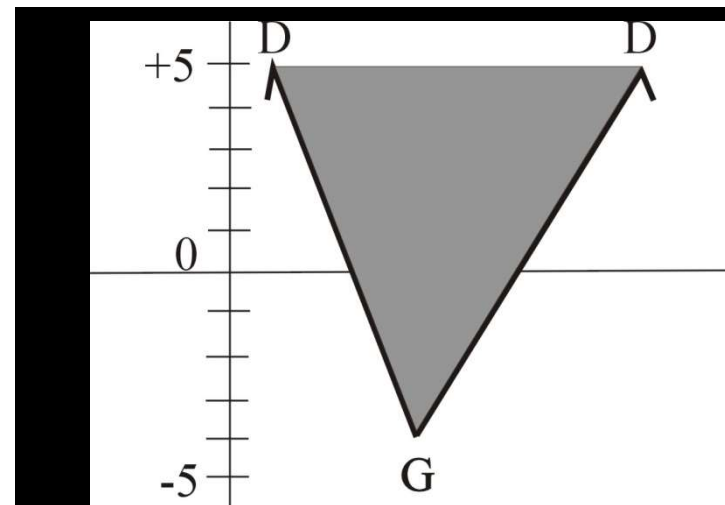


RESISTENCIA A LA FATIGA

8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

○ Método Rainflow (Algoritmo ASTM o Rainfill)

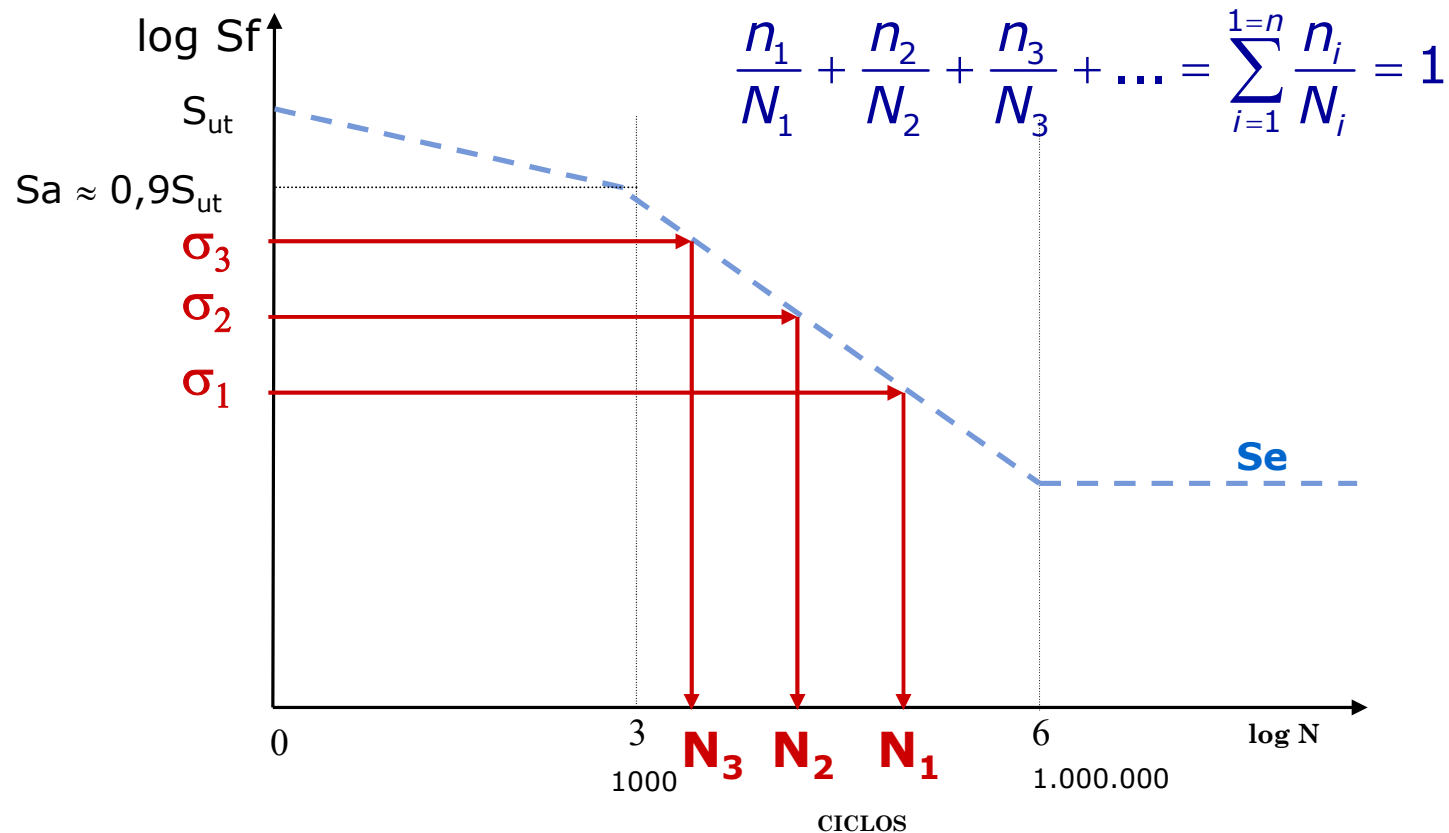
- Conteo de ciclos para historias temporales irregulares
- Ciclo: Secuencia pico-valle-pico o valle-pico-valle (XYZ) si $\Delta\sigma_{YZ} \geq \Delta\sigma_{XY}$
- Tensiones máxima y mínima: σ_x y σ_y
- Proceso
 1. Reordenar la secuencia: inicio en la tensión máxima
 2. Contar y eliminar ciclos
 3. Comenzar desde el principio



RESISTENCIA A LA FATIGA

8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

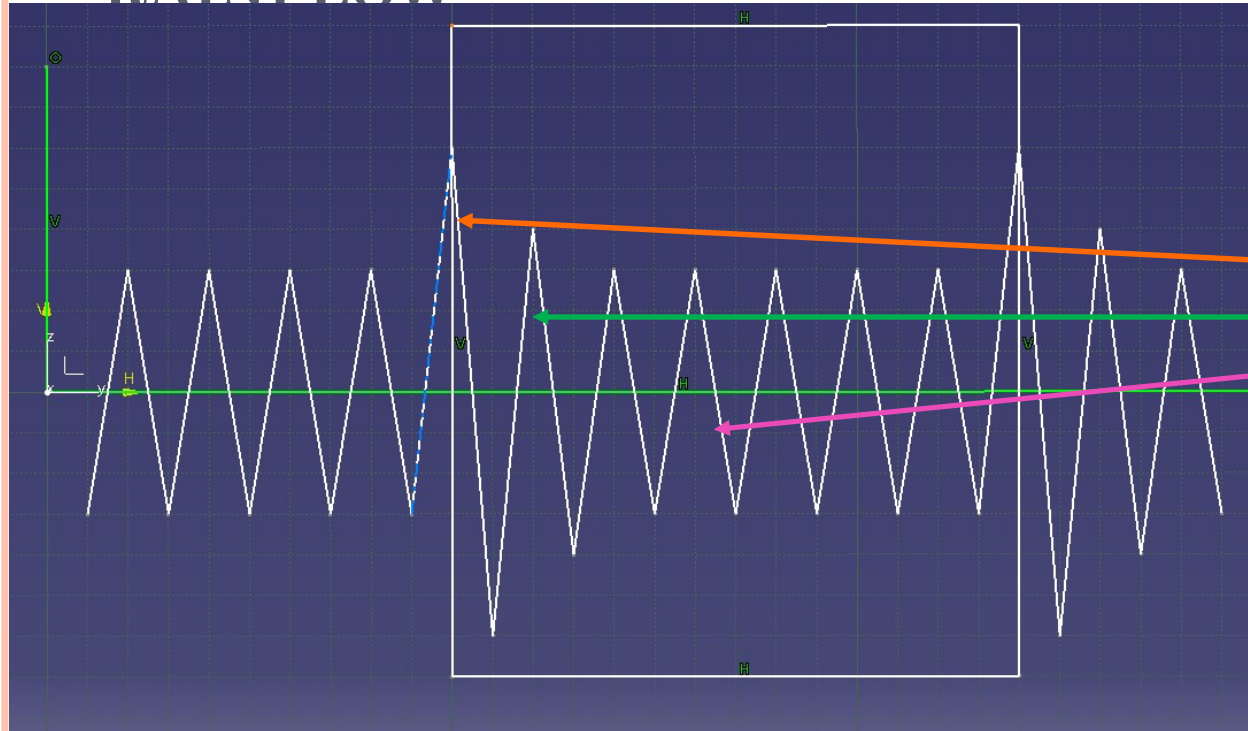
○ Método Rainflow. Regla de Miner



RESISTENCIA A LA FATIGA

8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA MINER

RAINFLOW



Ciclos.

1 – n_1 – 1 vez ciclo - n

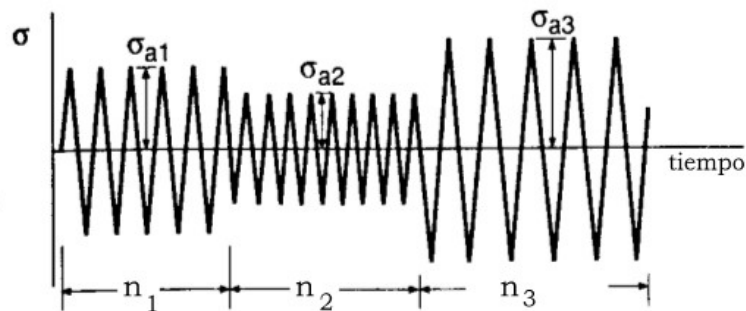
2 – n_2 – 1 vez ciclo - n

3 – n_3 – 5 veces ciclo – $5n$

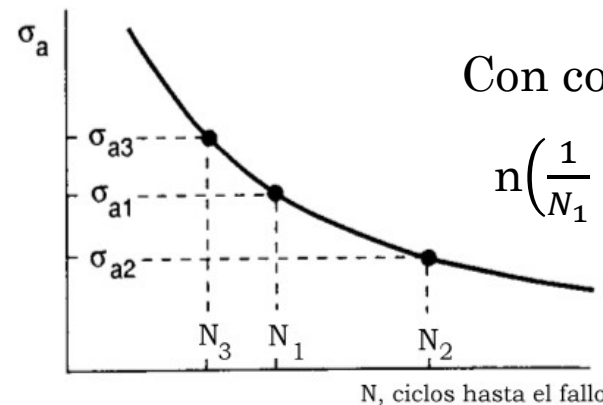
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1;$$

$$\frac{n}{N_1} + \frac{n}{N_2} + \frac{5n}{N_3} = 1;$$

$$n \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} + \frac{5}{N_3} \right) = 1$$



$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1$$



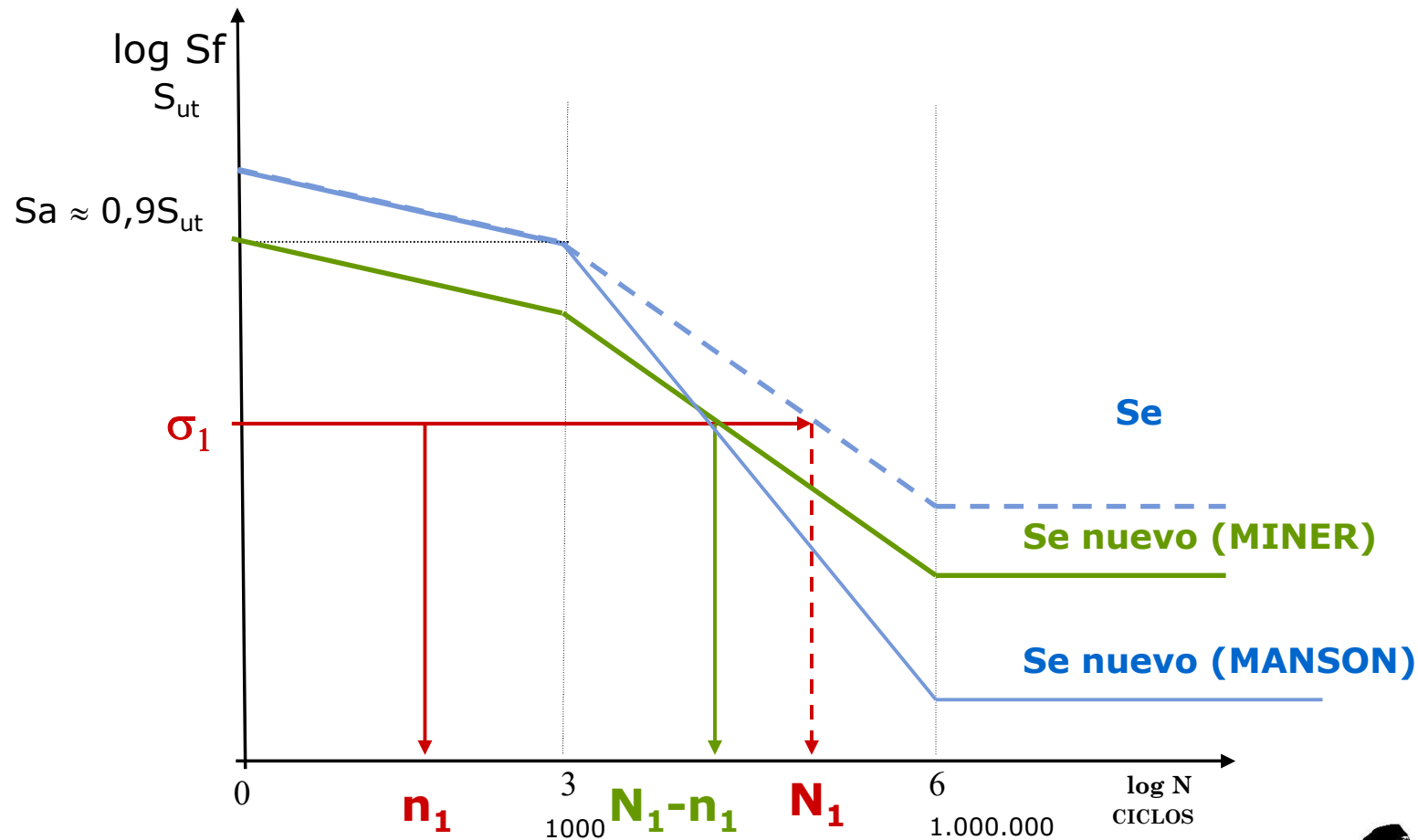
Con coeficiente de seguridad

$$n \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} + \frac{5}{N_3} \right) = \frac{1}{CS}$$

154

8. DAÑO ACUMULADO POR FATIGA

○ Método Rainflow. Regla de Miner



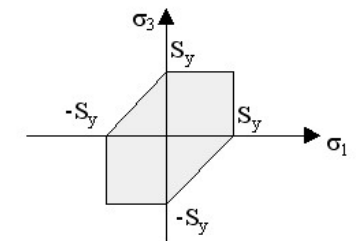
RESISTENCIA A LA FATIGA

9. TENSIONES MULTIAXIALES

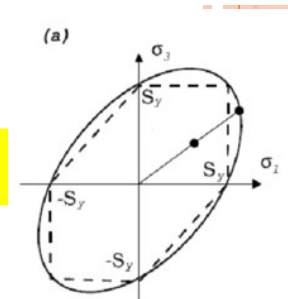
- Son usuales estados de tensiones complejos
- Planteamiento mediante tensiones estáticas equivalentes
- Válido para tensiones en fase o desfasadas 180°
- Para cada tensión ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \dots$) se calcula la equivalente estática.

$$\sigma_{ieq} = \sigma_{im} + \frac{S_y}{S_N} \sigma_{ia}$$

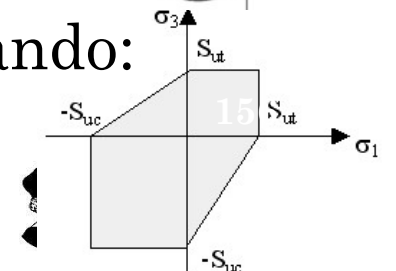
$$\tau_{ieq} = \tau_{im} + \frac{S_{sy}}{S_{SN}} \tau_{ia}$$



- Se utiliza un criterio de fallo estático de tensiones multiaxiales (MTT, (máxima tensión tangencial TRESCA), ED (Energía Distorsión Von Mises), ... Coulomb-Mohr)



- Limitaciones. El procedimiento no es válido cuando:
 - Los ejes principales giran durante la carga cíclica
 - Diferente frecuencia o fase de las cargas



RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- Considerando los factores modificativos del límite de fatiga K_a , K_b , K_c , K_d y K_e , ¿cuál de las siguientes respuestas es cierta?
 - a) Ninguno de estos factores modificativos del límite de fatiga pueden tomar valores mayores que la unidad
 - b) K_a y K_b pueden tomar valores mayores que la unidad
 - c) K_b y K_d pueden tomar valores mayores que la unidad
 - d) Solamente K_e puede tomar valores mayores que la unidad

K_a : Factor de **acabado superficial**

K_b : Factor de **tamaño**

K_c : Factor de **modificación de carga**

K_d : Factor de **temperatura**

K_e : Factor de **fiabilidad**

RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- Considerando los factores modificativos del límite de fatiga K_a , K_b , K_c , K_d y K_e , ¿cuál de las siguientes respuestas es cierta?
 - a) Ninguno de estos factores modificativos del límite de fatiga pueden tomar valores mayores que la unidad
 - b) K_a y K_b pueden tomar valores mayores que la unidad
 - c) K_b y K_d pueden tomar valores mayores que la unidad
 - d) Solamente K_e puede tomar valores mayores que la unidad

K_a : Factor de **acabado superficial**

K_b : Factor de **tamaño**

K_c : Factor de **modificación de carga**

K_d : Factor de **temperatura**

K_e : Factor de **fiabilidad**

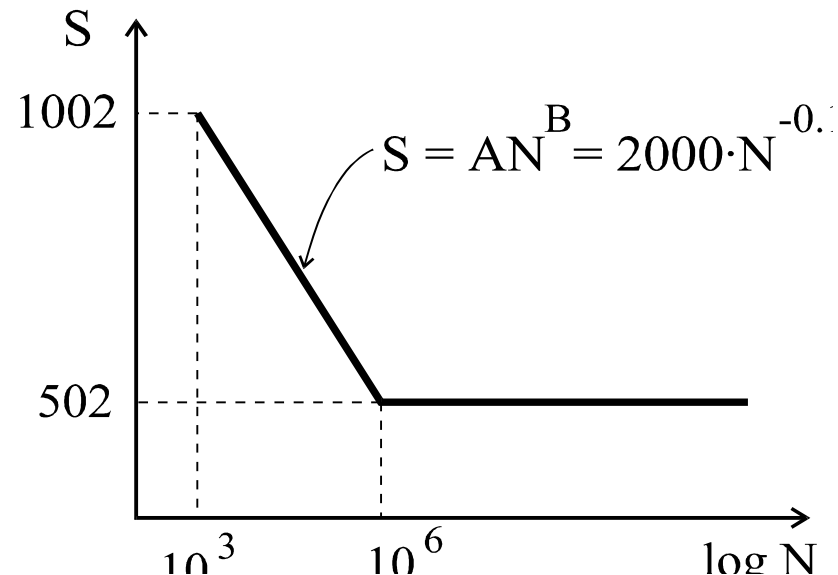
$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

1,24	3	-0,107	1,10247744
------	---	--------	------------

RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

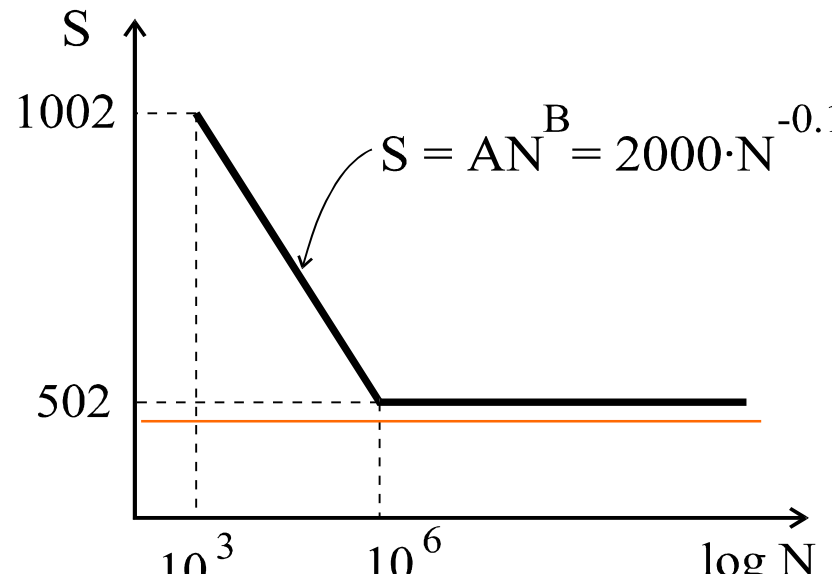
- El diagrama S-N de una probeta de acero es el de la gráfica. Si la probeta se somete a una tensión alternante pura de 450 MPa
 - a) Fallará aproximadamente a los $3 \cdot 10^6$ ciclos.
 - b) Durará más de $3,5 \cdot 10^6$ ciclos.
 - c) Durará menos de $2,5 \cdot 10^6$ ciclos.



RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- El diagrama S-N de una probeta de acero es el de la gráfica. Si la probeta se somete a una tensión alternante pura de 450 MPa
 - a) Fallará aproximadamente a los $3 \cdot 10^6$ ciclos.
 - b) Durará más de $3,5 \cdot 10^6$ ciclos.
 - c) Durará menos de $2,5 \cdot 10^6$ ciclos.



RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- En una pieza de material dúctil con $S_u=1000\text{MPa}$ y una entalla (concentrador de tensiones) con $K_t=2$ sometida a una carga variable $\sigma_a=100\text{MPa}$ y $\sigma_m=200\text{MPa}$, el coeficiente de seguridad a fatiga, sabiendo que la tensión de fatiga es $S_N=500\text{MPa}$ será:
 - a) 2.5
 - b) 3.333
 - c) 1.167
 - d) 4

RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- En una pieza de material dúctil con $S_u=1000\text{MPa}$ y una entalla (concentrador de tensiones) con $K_t=2$ sometida a una carga variable $\sigma_a=100\text{MPa}$ y $\sigma_m=200\text{MPa}$, el coeficiente de seguridad a fatiga, sabiendo que la tensión de fatiga es $S_N=500\text{MPa}$ será:

- a) 2.5
- b) 3.333
- c) 1.167
- d) 4

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

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

Es aplicable?

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

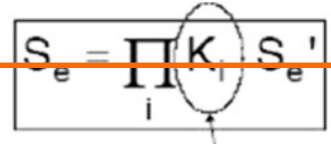
$$S_e = \prod_i (K_i) S_e'$$

RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- En una pieza de material dúctil con $S_u=1000\text{MPa}$ y una entalla (concentrador de tensiones) con $K_t=2$ sometida a una carga variable $\sigma_a=100\text{MPa}$ y $\sigma_m=200\text{MPa}$, el coeficiente de seguridad a fatiga, sabiendo que la tensión de fatiga es $S_N=500\text{MPa}$ será:

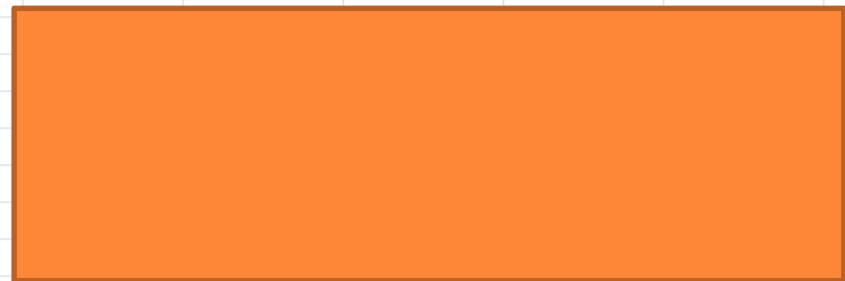
a) 2.5 ~~$S_e' = 0.5 S_{ut}$~~ ~~$S_{ut} \leq 1400\text{MPa}$~~ No dice que sea acero.

b) 3.333 $S_u=1000\text{MPa}$ Nos dan directamente S_N 

c) 1.167 $S_N=500\text{MPa}$

d) 4

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



RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- En una pieza de material dúctil con $S_u=1000\text{MPa}$ y una entalla (concentrador de tensiones) con $K_t=2$ sometida a una carga variable $\sigma_a=100\text{MPa}$ y $\sigma_m=200\text{MPa}$, el coeficiente de seguridad a fatiga, sabiendo que la tensión de fatiga es $S_N=500\text{MPa}$ será:

a) 2.5 ~~$S_e' = 0.5 S_{ut}$~~ ~~$S_{ut} \leq 1400\text{MPa}$~~ No dice que sea acero.

b) 3.333 $S_u=1000\text{MPa}$ Nos dan directamente S_N ~~$S_e = \prod_i K_i S_e'$~~

c) 1.167 $S_N=500\text{MPa}$

d) 4

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

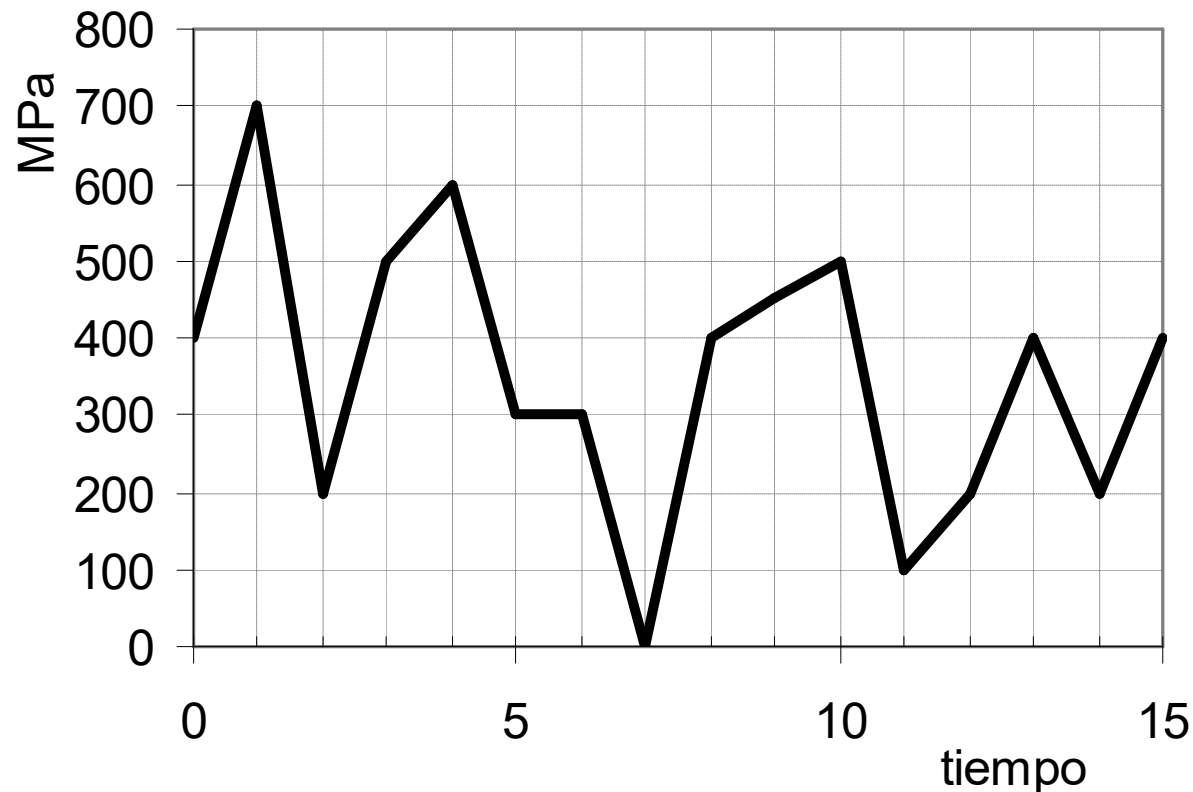
$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{CS}$	100	+	200	=	1
	500		1000		CS
	0,2	+	0,2	=	1
					CS
			CS		2,5

RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- ¿Cuál es el valor mínimo de tensión media de los tipos de carga que aparecen en la secuencia de la figura?

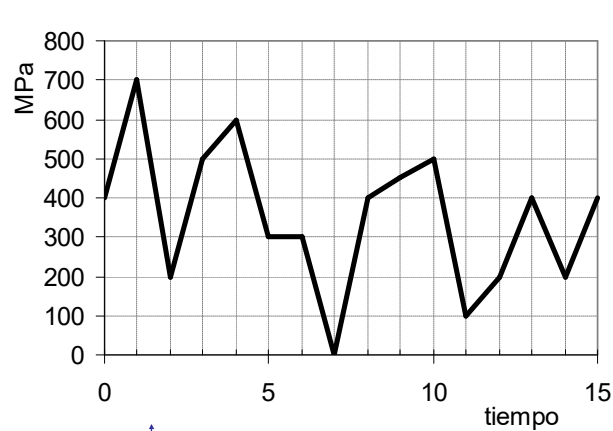
- a) 300 MPa
- b) 150 MPa
- c) 200 MPa
- d) 250 MPa



RESISTENCIA A LA FATIGA

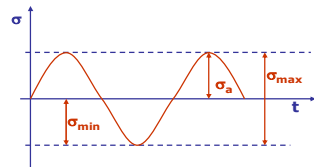
10. EJEMPLOS

- ¿Cuál es el valor mínimo de tensión media de los tipos de carga que aparecen en la secuencia de la figura?

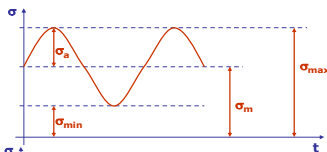


$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

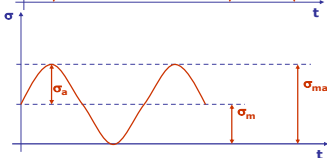
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$



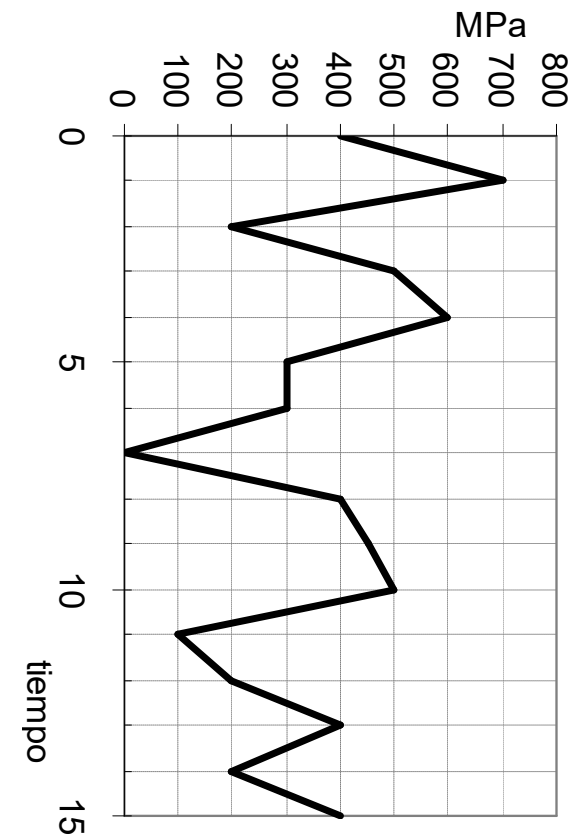
ALTERNANTE



FLUCTUANTE



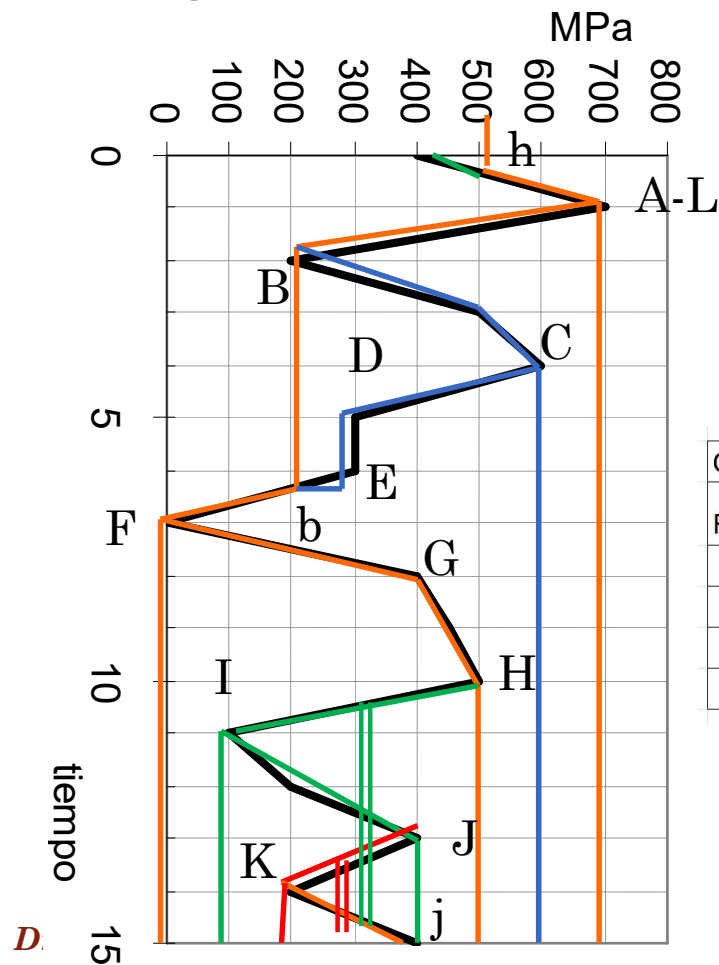
PULSANTE



RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- ¿Cuál es el valor mínimo de tensión media de los tipos de carga que aparecen en la secuencia de la figura?



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

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

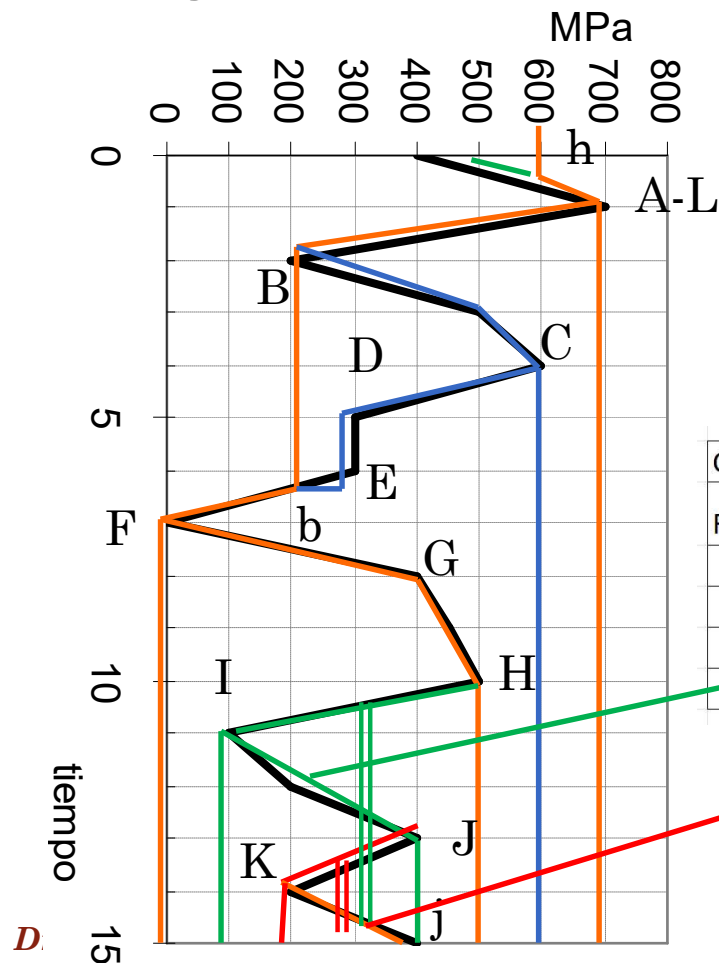
- 1 A-B-b-F-G-H-h-L=A-B-b-F-H-h-L
- 2 B-C-D-E-b=B-C-b
- 3 H-I-J-j-h
- 4 J-K-j

CICLO	1	2	3	4
RECORRIDO	A-B-b-F-H-h-L	B-C-b	H-I-J-j-h	J-K-j
σ_{max}	700	600	500	400
σ_{min}	0	200	100	200
$\sigma_a =$	350	200	200	100
$\sigma_m =$	350	400	300	300

RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- ¿Cuál es el valor mínimo de tensión media de los tipos de carga que aparecen en la secuencia de la figura?



- a) 300 MPa
- b) 150 MPa
- c) 200 MPa
- d) 250 MPa

CICLO	1	2	3	4
RECORRIDO	A-B-b-F-H-h-L	B-C-b	H-I-J-j-h	J-K-j
σ_{max}	700	600	500	400
σ_{min}	0	200	100	200
$\sigma_a =$	350	200	200	100
$\sigma_m =$	350	400	300	300

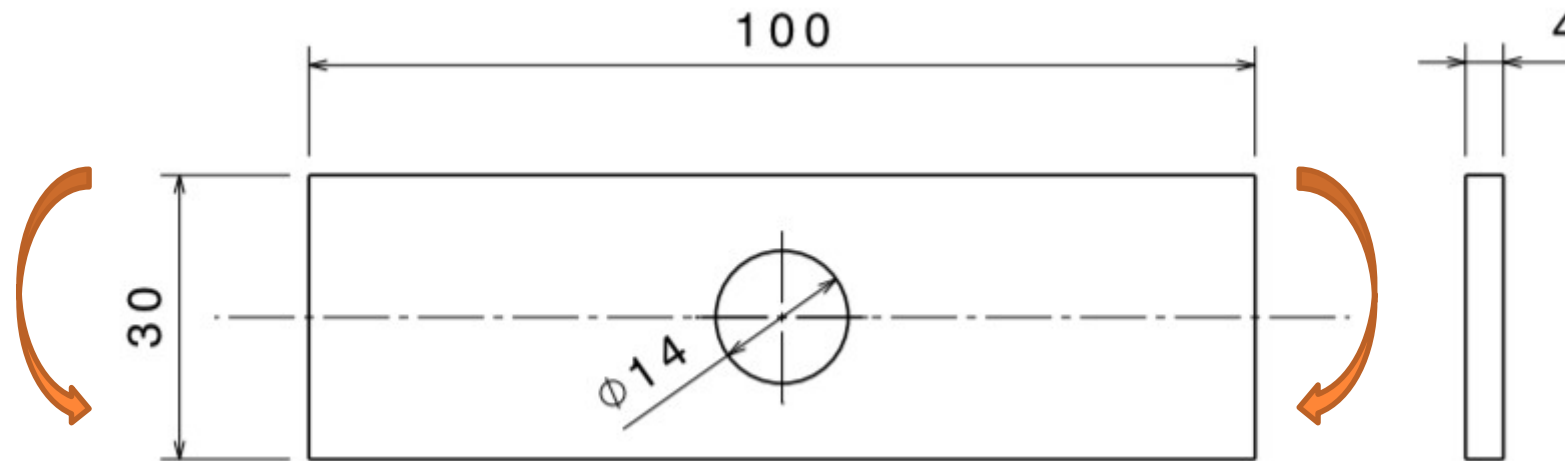
RESISTENCIA A LA FATIGA

10. EJEMPLOS

- Ejemplos 6-1 a 6-20 Shigley.

RESISTENCIA A LA FATIGA

- Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente, sometida a flexión alternante, con una temperatura de operación de 475°C máxima y un factor de confiabilidad del 99.99%
 - 1° Dibuje el diagrama S-N estimado.
 - 2° Si se desea que la pieza aguante 600.000 ciclos ¿Cuál es la máxima tensión teórica que podría soportar?
 - ¿A que valor de flexión corresponde esa tensión?
 - Si deseamos tener un factor de seguridad de 2 con respecto al límite de fatiga del material (para asegurar vida infinita) ¿Cuál será la flexión alternante máxima que podríamos aplicar a la pieza?



Nota: Para obtener las características del acero y para obtener los factores de concentración de tensiones es necesario consultar las tablas A20 y A15, respectivamente, del apéndice A del Shigley. El alumno debe fotocopiar y tener a mano dichos anexos para futuros ejercicios y exámenes.

○ acero AISI
1018
laminada en
caliente

Tabla A-20

Resistencias mínimas determinísticas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD) [Las resistencias listadas son valores ASTM mínimos estimados en el intervalo de tamaños de 18 a 32 mm ($\frac{3}{4}$ a $1\frac{1}{4}$ pulg). Estas resistencias resultan adecuadas para usarse con el factor de diseño definido en la sección 1-10, a condición que los materiales se ajusten a los requisitos ASTM A6 o A568 o que se requieran en las especificaciones de compra. Recuerde que un sistema de numeración no es una especificación] Fuente: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS núm.	SAE y/o AISI núm.	Procesa- miento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 pulg, %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

- acero AISI 1018 laminada en caliente
- Su=400 MPa
- Sy=220 MPa

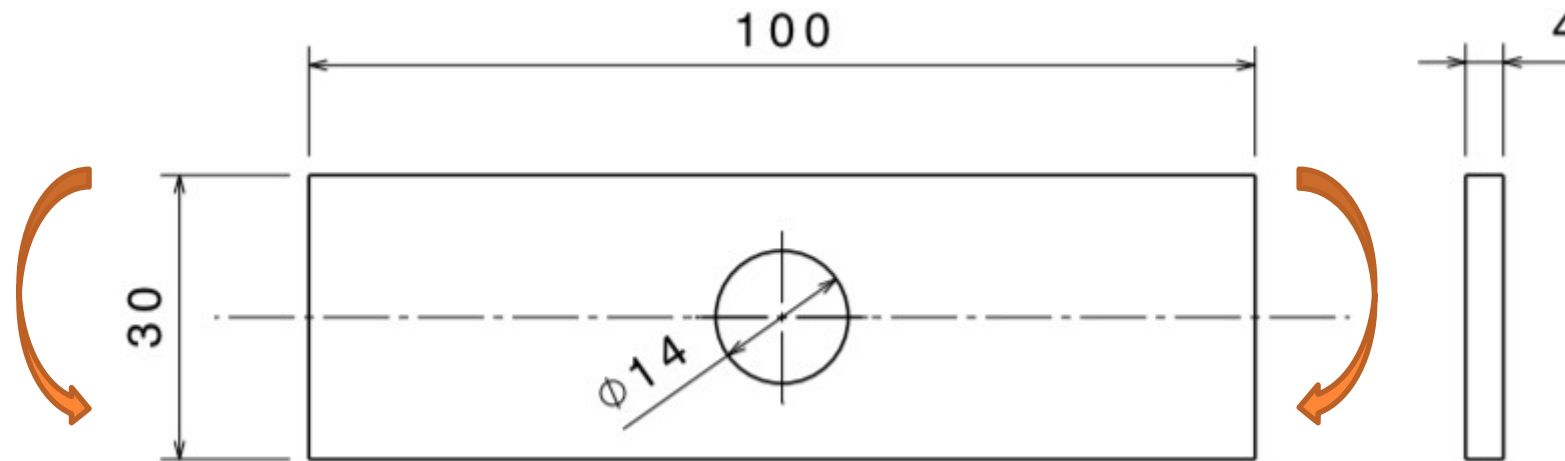
Tabla A-20

Resistencias mínimas determinísticas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD). [Las resistencias listadas son valores ASTM mínimos estimados en el intervalo de tamaños de 18 a 32 mm ($\frac{3}{4}$ a $1\frac{1}{4}$ pulg). Estas resistencias resultan adecuadas para usarse con el factor de diseño definido en la sección 1-10, a condición que los materiales se ajusten a los requisitos ASTM A6 o A568 o que se requieran en las especificaciones de compra. Recuerde que un sistema de numeración no es una especificación] Fuente: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS núm.	SAE y/o AISI núm.	Procesamiento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 pulg, %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

RESISTENCIA A LA FATIGA

- Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente, sometida a flexión alternante, con una temperatura de operación de 475°C máxima y un factor de confiabilidad del 99.99%
 - 1° Dibuje el diagrama S-N estimado.
 - $S_u = 400 \text{ MPa}$
 - $S_y = 220 \text{ MPa}$.
 - Flexión alternante,



Nota: Para obtener las características del acero y para obtener los factores de concentración de tensiones es necesario consultar las tablas A20 y A15, respectivamente, del apéndice A del Shigley. El alumno debe fotocopiar y tener a mano dichos anexos para futuros ejercicios y exámenes.

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

○ Valor de S_m (en 10^3 ciclos) ¿Cómo se obtiene?

- Bibliografía
- Ensayos anteriores
- Aproximaciones

A flexión

$$S_m = 0.9 S_{ut}$$

Axial

$$S_m = 0.75 S_{ut}$$

Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente, sometida a flexión alternante, 1º Dibuje el diagrama S-N estimado.

$S_u = 400 \text{ MPa}$

$S_y = 220 \text{ Mpa.}$

Flexión alternante,.

En función esfuerzo

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

○ Valor de S_m (en 10^3 ciclos) ¿Cómo se obtiene?

- Bibliografía
- Ensayos anteriores
- Aproximaciones

A flexión

$$S_m = 0.9 S_{ut}$$

Axial

$$S_m = 0.75 S_{ut}$$

Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente, sometida a flexión alternante, $S_u=400$ MPa, $S_y=220$ Mpa. Flexión alternante,.

En función esfuerzo

RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

○ Valor de S'_e (en 10^6 ciclos) . ¿Cómo se obtiene?

- Bibliografía
- Ensayos anteriores
- Aproximaciones

Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente, sometida a flexión alternante,
 $S_u=400$ MPa
 $S_y=220$ Mpa.
Flexión alternante,.

Aceros

$$S'_e = 0.5 S_{ut}$$
$$S'_e = 700 \text{ MPa}$$

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

Hierros

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$
$$S'_e = 160 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 400 \text{ MPa}$$
$$S_{ut} \geq 400 \text{ MPa}$$

Aluminios

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$
$$S'_e = 130 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 330 \text{ MPa}$$
$$S_{ut} \geq 330 \text{ MPa}$$

Aleaciones cobre

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$
$$S'_e = 100 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 280 \text{ MPa}$$
$$S_{ut} \geq 280 \text{ MPa}$$

En función material



RESISTENCIA A LA FATIGA

5. DIAGRAMA S-N

- Valor de S'_e (en 10^6 ciclos) . ¿Cómo se obtiene?

- Bibliografía
- Ensayos anteriores
- Aproximaciones

Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente, sometida a flexión alternante,
 $S_u=400$ MPa
 $S_y=220$ Mpa.
 Flexión alternante,.

Aceros

$$S'_e = 0.5 S_{ut}$$

$$S'_e = 700 \text{ MPa}$$

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

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

Hierros

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$

$$S'_e = 160 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 400 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \geq 400 \text{ MPa}$$

Aluminios

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$

$$S'_e = 130 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 330 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \geq 330 \text{ MPa}$$

Aleaciones cobre

$$S'_e = 0.4 S_{ut}$$

$$S'_e = 100 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \leq 280 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} \geq 280 \text{ MPa}$$

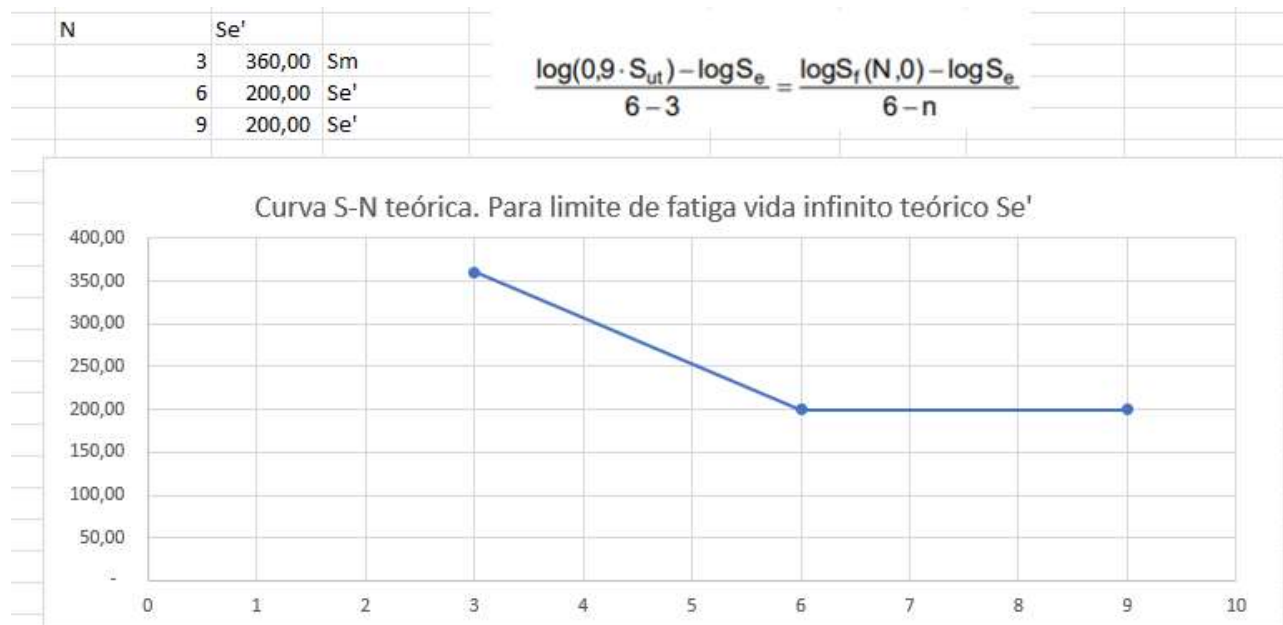
En función material



RESISTENCIA A LA FATIGA

- Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente, sometida a flexión alternante, con una temperatura de operación de 475°C máxima y un factor de confiabilidad del 99.99%
 - 1º Dibuje el diagrama S-N estimado.

Acero AISI 1018						
laminado en caliente						
Sut=	400 Mpa					
Sy=	220 Mpa					
1 Sm	Flexión	Sm = 0.9 Sut	0,9	360	360	Mpa
S'e						
1 Aceros	Se' = 0.5 Sut	Sut < 1400 MPa	200	S'e=	200	Mpa



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

Sut en MPa

Si $K_a > 1 \rightarrow K_a = 1$

○ **Ka: Factor de acabado superficial**

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

○ Ensayo de probeta rotatoria

- **Probeta pulida (a espejo)** con pulimento fino en dirección axial

○ Pieza real

- Peor acabado superficial $\Rightarrow \downarrow S_e$

Hierro Fundido

$K_a = 1$

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

○ Función de:

- Calidad del acabado superficial
- Resistencia última del material ($\uparrow S_u \Rightarrow \downarrow S_e$)

Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente,

- **Para ciclos bajos (<1000) se puede tomar siempre $K_a = 1$**

Acabado superficial	Coefficiente 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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

Sut en MPa

Si $K_a > 1 \rightarrow K_a = 1$

○ Ka: Factor de acabado superficial

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

• Ensayo de probeta rotatoria

- **Probeta pulida (a espejo)** con pulimento fino en dirección axial

• Pieza real

- Peor acabado superficial $\Rightarrow \downarrow S_e$

Hierro Fundido

$K_a = 1$

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

• Función de:

- Calidad del acabado superficial
- Resistencia última del material ($\uparrow S_u \Rightarrow \downarrow S_e$)

Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente,

- **Para ciclos bajos (<1000) se puede tomar siempre $K_a = 1$**

Acabado superficial	Coefficiente 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

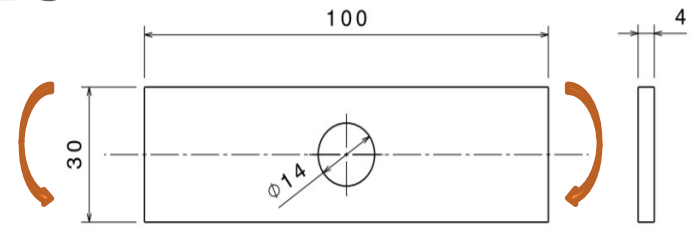
$K_a = 0,781$

180

UNIVERSIDAD
TEBRIJA

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN



○ **K_b**: Factor de tamaño

- Ensayo de probeta rotatoria
 - Probeta con sección circular, diámetro normalizado (7.5 a 12.5 mm)
- Pieza real
 - Sección circular / diámetro diferente
 - En 10³: K_b = 1 (no influye el tamaño)
 - En 10⁶: el diámetro de probeta influye en flexión y torsión, no con carga axial
- Flexión / Torsión [Shigley. Pag. 280]

$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

$$2,79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$$

$$K_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$$

$$51 \leq d \text{ (mm)} \leq 254$$

$$K_b = 0,6$$

$$d \text{ (mm)} > 254$$

- Carga Axial
 - K_b=1 (Sólo para sección circular. Pero ver K_c)

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ **Kb: Factor de tamaño**

- Ensayo de probeta rotatoria
 - Probeta con sección circular, diámetro normalizado (7.5 a 12.5 mm)
- Pieza real
 - Sección circular / diámetro diferente
 - En 10^3 : $K_b = 1$ (no influye el tamaño)
 - En 10^6 : el diámetro de probeta influye en flexión y torsión, no con carga axial
- Flexión / Torsión [Shigley. Pag. 280]

$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

$$2,79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$$

$$K_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$$

$$51 \leq d \text{ (mm)} \leq 254$$

$$K_b = 0,6$$

$$d \text{ (mm)} > 254$$

- Carga Axial
 - $K_b=1$ (Sólo para sección circular. Pero ver K_c)

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Kb: Factor de tamaño

- Diámetro efectivo: *“Diámetro que se obtiene al igualar el volumen de material sometido a esfuerzo igual o superior a 95% del esfuerzo máximo con el mismo volumen en la muestra de viga rotativa”.*
- Sección de viga rotatoria (caso más crítico)

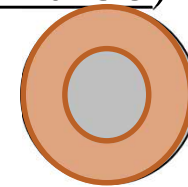
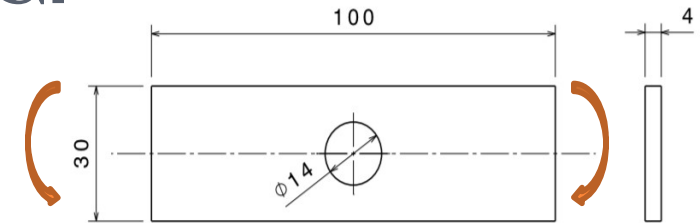
$$A_{0,95} = \frac{\pi}{4} [d^2 - (0,95 \cdot d)^2] = 0,0766 \cdot d^2 \quad (I)$$

- Sección rectangular hxb
(Ejemplo sólo para flexión)

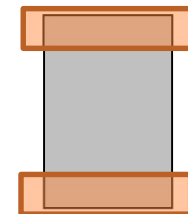
$$A_{0,95} = 0,05 \cdot h \cdot b$$

$$(I) = (II) \longrightarrow$$

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



(II)



SECCIÓN NO
CIRCULAR
(Ejemplo:
Sección
rectangular)

183

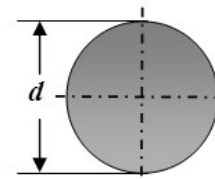
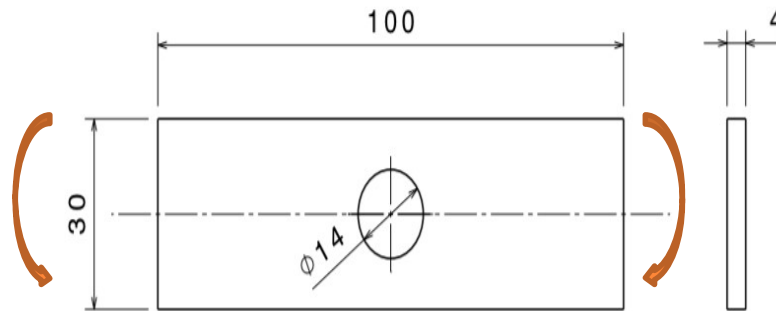
$$(I) = (II) \longrightarrow$$

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

RESISTENCIA A LA FATIGA

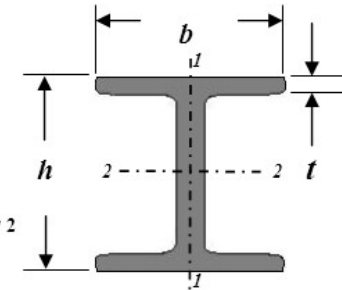
6. ECUACIÓN DE MARIN

o Kb: Factor de tamaño



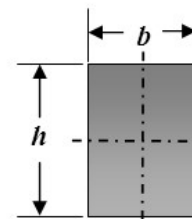
rotativa
 $A_{95} = 0.0766d^2$
 no rotativo
 $A_{95} = 0.010462d^2$

a) Redondo sólido o hueco



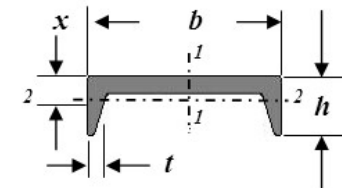
no rotativo
 $A_{95 \ 1-1} = 0.10bt$,
 $A_{95 \ 2-2} = 0.05bh$,
 $t > 0.025b$

b) Viga en I



no rotativo
 $A_{95} = 0.05bh$

c) Rectangular sólido



no rotativo
 $A_{95 \ 1-1} = 0.05bh$,
 $t > 0.025b$
 $A_{95 \ 2-2} = 0.05bx + t(h-x)$

d) Viga en I

1 Sección cuadrada	b	30 mm	h	4 mm
$A_{0.95\sigma} = \frac{\pi}{4} [d^2 - (0.95d)^2] = 0.0766d^2$				
d2	-0,95^2d2	d2-(0,95d)^2	PI/4	A0.95 Cil rot
1	0,9025	0,0975	0,7854	0,0766
A0.95 Cil rot	=	A0.95 Rectangular		

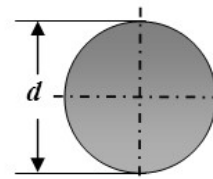
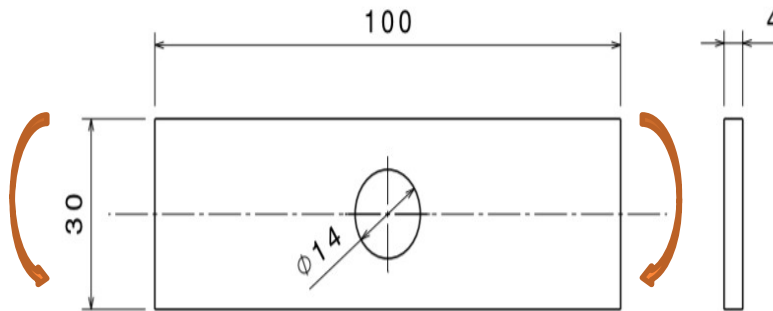
$$(I) = (II) \longrightarrow$$

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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

o Kb: Factor de tamaño



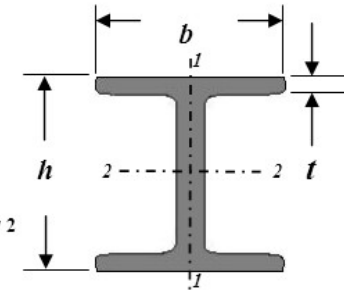
rotativa

$$A_{95} = 0.0766d^2$$

no rotativo

$$A_{95} = 0.010462d^2$$

a) Redondo sólido o hueco



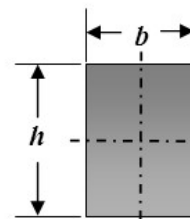
no rotativo

$$A_{95 \ 1-1} = 0.10bt,$$

$$A_{95 \ 2-2} = 0.05bh,$$

$$t > 0.025b$$

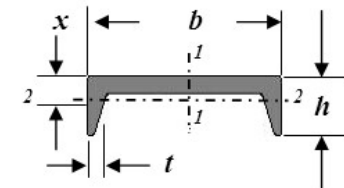
b) Viga en I



no rotativo

$$A_{95} = 0.05bh$$

c) Rectangular sólido



no rotativo

$$A_{95 \ 1-1} = 0.05bh,$$

$$t > 0.025b$$

$$A_{95 \ 2-2} = 0.05bx + t(h-x)$$

d) Viga en I

1 Sección cuadrada	b	30 mm	h	4 mm
$A_{0.95\sigma} = \frac{\pi}{4}[d^2 - (0.95d)^2] = 0.0766d^2$				
d2	-0.95^2d2	d2-(0.95d)^2	PI/4	A0.95 Cil rot
1	0.9025	0.0975	0.7854	0.0766
			0.0766	
A0.95 Cil rot	=	A0.95 Rectangular		
0.0766	de2	=	0.05 hb	tabla
	de2	=	0.653 hb	b h hb^1/2
	de	=	0.808 hb^1/2	30 4 10.95
		de=	0.808	10.95 8.85

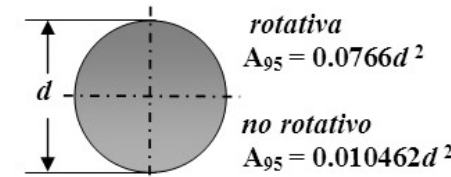
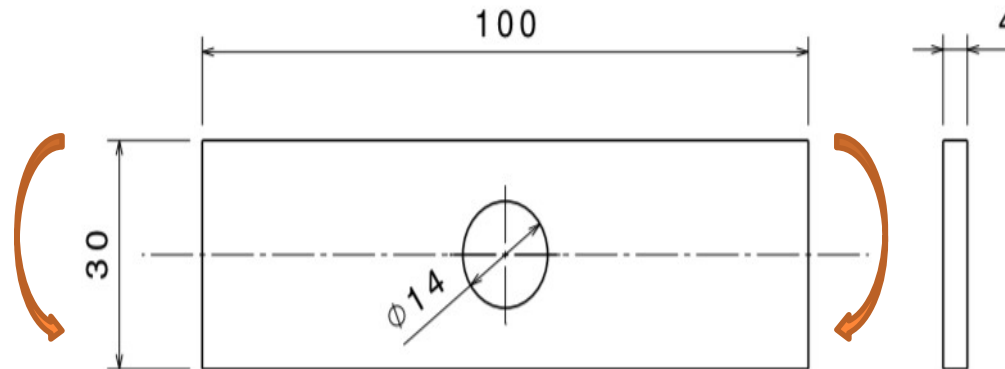
$$(I) = (II) \longrightarrow$$

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

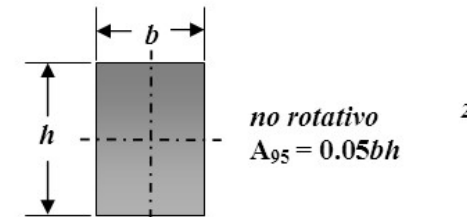
RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- Kb: Factor de tamaño



a) Redondo sólido o hueco



c) Rectangular sólido

$$2,79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$$

$$51 \leq d \text{ (mm)} \leq 254$$

$$d \text{ (mm)} > 254$$

$$0,808 \quad 10,95 \quad 8,85$$

$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$$

$$K_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$$

$$K_b = 0,6$$

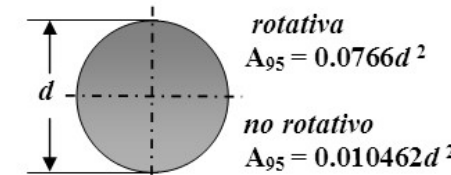
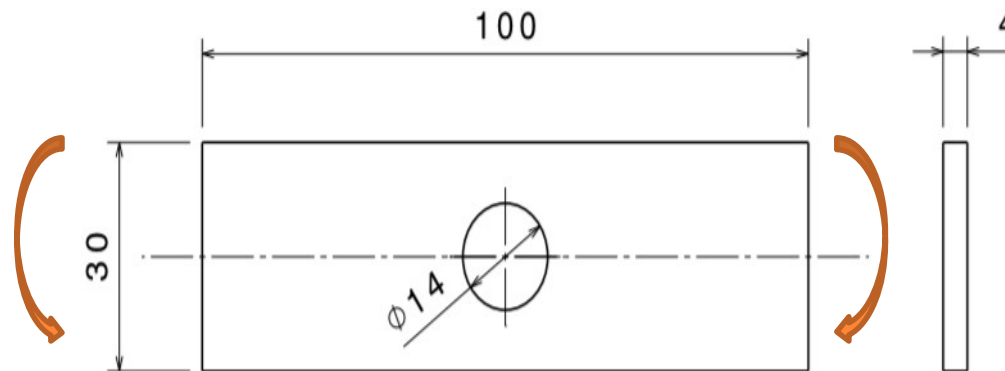
$$(I) = (II) \longrightarrow$$

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

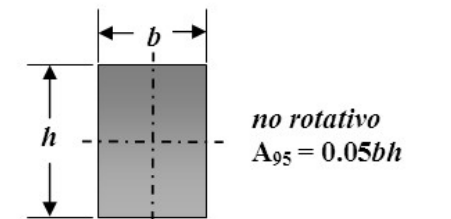
RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- Kb: Factor de tamaño



a) Redondo sólido o hueco



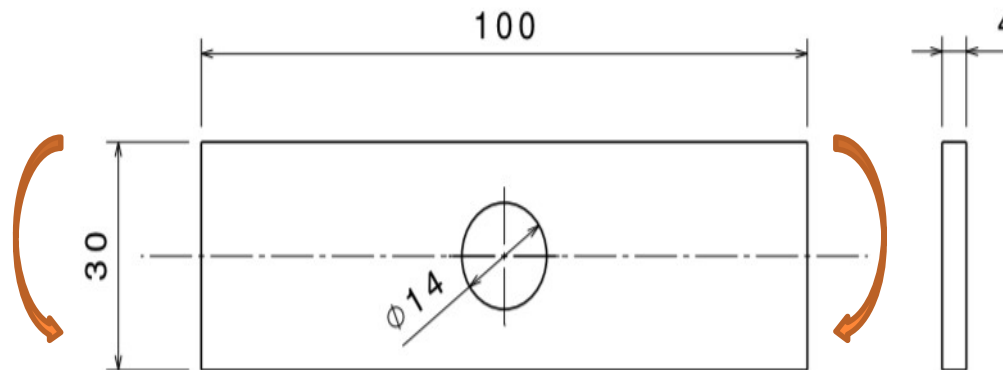
c) Rectangular sólido

			de=	0,808	10,95	8,85
$2,79 \leq d \text{ (mm)} \leq 51$	1	1,240	0,98	$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}$		
	-	0,107	-	$K_b = 1,51 \cdot d^{-0,157}$		
$51 \leq d \text{ (mm)} \leq 254$	0	1,510	-			
	-	0,157		$K_b = 0,6$		
$d \text{ (mm)} > 254$	0	0,600				
	Kb		0,98			

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

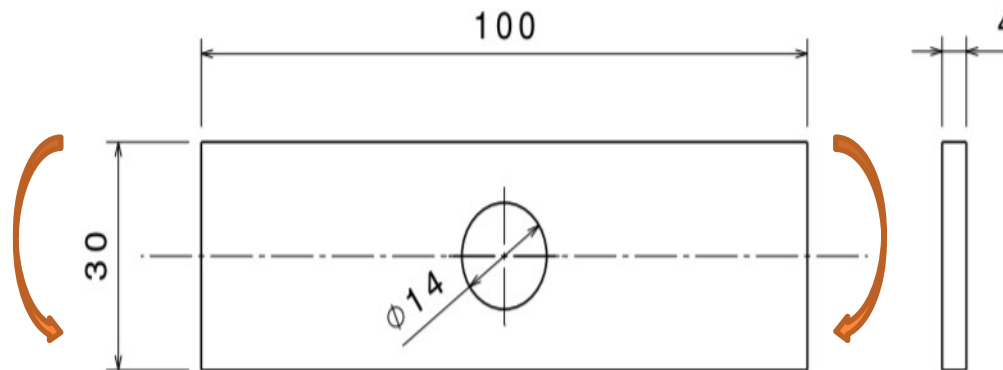
- **Kc: Factor de modificación de carga**
 - Carga a flexión: $K_c = 1$
 - Carga axial: $K_c = 0,85$ (Otros autores $K_c=0,7$)
 - Carga torsión (sólo para fatiga torsional): $K_c = 0.59$
 - Carga torsión combinada con flexión: $K_c = 1$



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- **Kc: Factor de modificación de carga**
 - Carga a flexión: **$K_c = 1$**
 - Carga axial: $K_c = 0,85$ (Otros autores **$K_c=0,7$**)
 - Carga torsión (sólo para fatiga torsional): **$K_c = 0.59$**
 - Carga torsión combinada con flexión: **$K_c = 1$**



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Kd: Factor de temperatura

475°C

- Aplicable también para ciclos bajos (<1000)
- Fórmulas únicamente para Aceros

Norton Pag. 381

- $T \leq 450^{\circ}\text{C}$ $K_d=1$
- $450^{\circ}\text{C} \leq T \leq 550^{\circ}\text{C}$ $K_d=1-0,0058 \cdot (T-450)$

- No debe utilizarse para otros materiales
- Para temperaturas mayores la termofluencia adquiere un valor significativo y la curva S-N ya no tendrá un codo.
- Nota. Criterio diferente en Shigley Pag. 283.

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Kd: Factor de temperatura

475°C

- Aplicable también para ciclos bajos (<1000)
- Fórmulas únicamente para Aceros

Norton Pag. 381

○ $T \leq 450^{\circ}\text{C}$

$K_d=1$

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

$K_d=1-0,0058 \cdot (T-450)$

- No debe utilizarse para otros materiales
- Para temperaturas mayores la termofluencia adquiere un valor significativo y la curva S-N ya no tendrá un codo.
- Nota. Criterio diferente en Shigley Pag. 283.

Kd: Factor	$T \leq 450^{\circ}\text{C}$	0	1	0
Tª	$450^{\circ}\text{C} \leq T \leq 550^{\circ}\text{C}$	1	$K_d=1-0,0058 \cdot (T-450)$	0,855
475		Kd		0,855
			Kd	0,855

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

99,99%

○ Ke: Factor de fiabilidad

<i>Fiabilidad</i>	<i>Factor de fiabilidad Kc</i>
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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

99,99%

○ Ke: Factor de fiabilidad

<i>Fiabilidad</i>	<i>Factor de fiabilidad Kc</i>
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

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

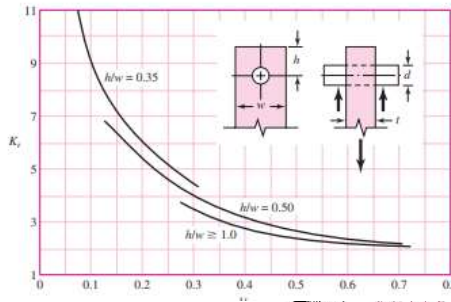
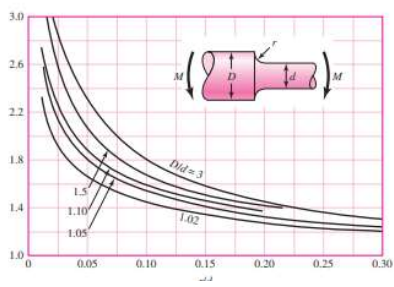
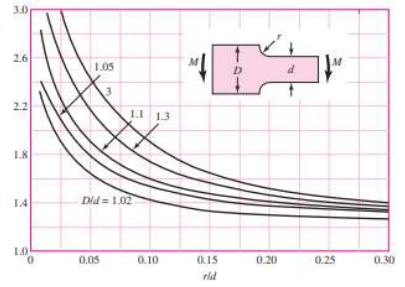
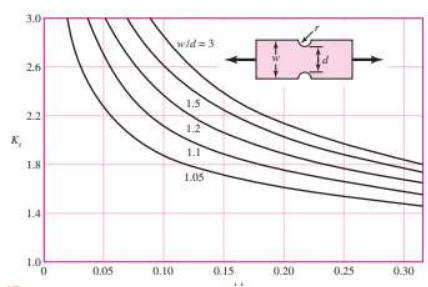
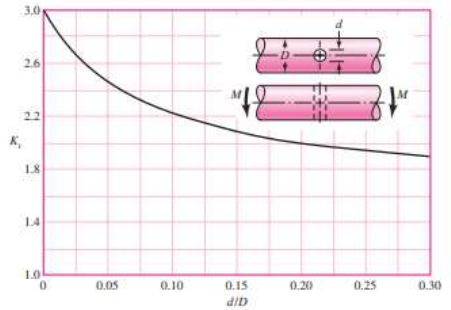
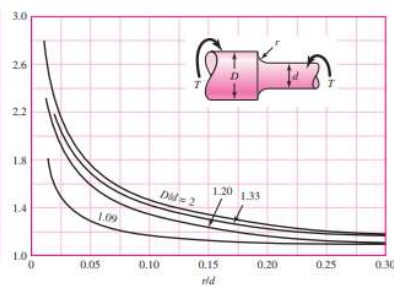
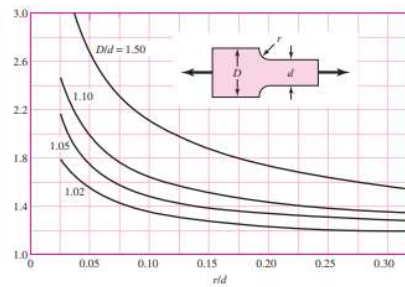
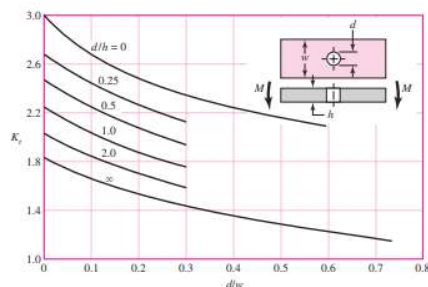
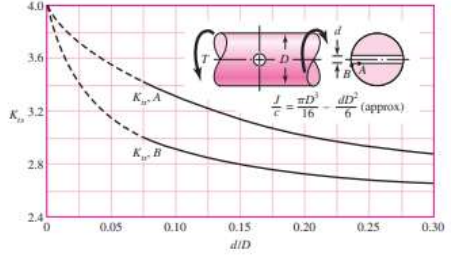
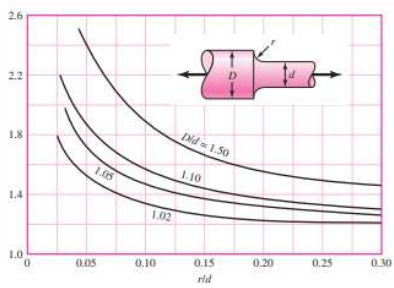
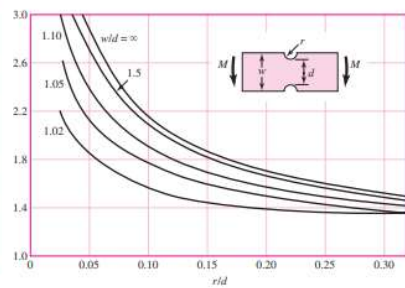
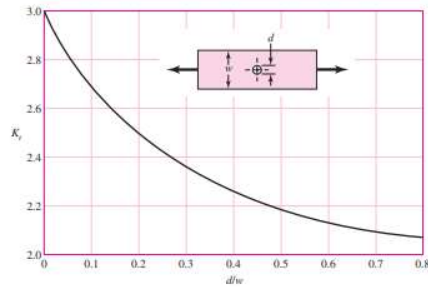
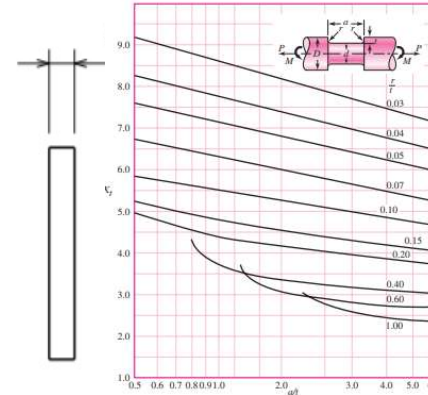
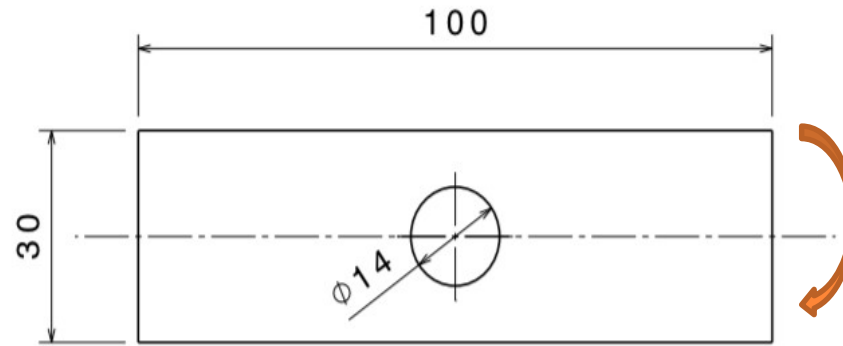
- Dada una barra de acero AISI 1018 laminada en caliente, sometida a flexión alternante, con una temperatura de operación de 475°C máxima y un factor de confiabilidad del 99.99%

- 1º Dibuje el diagrama S-N estimado.

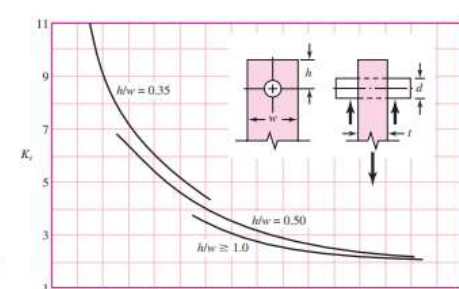
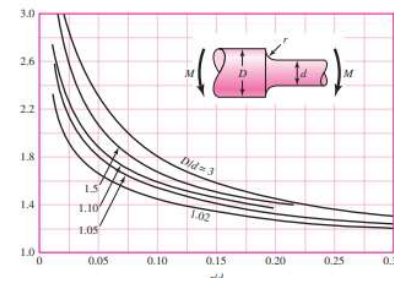
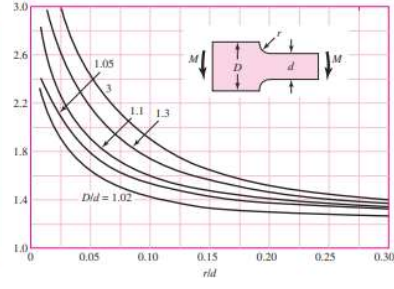
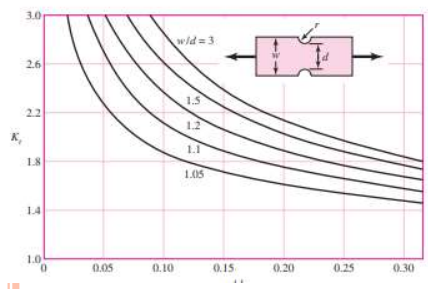
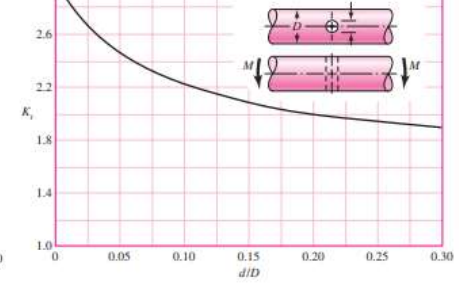
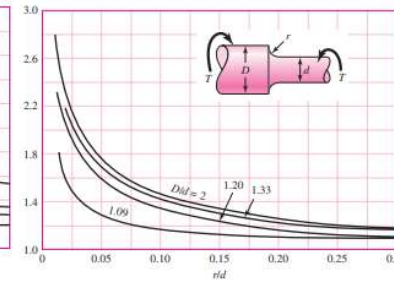
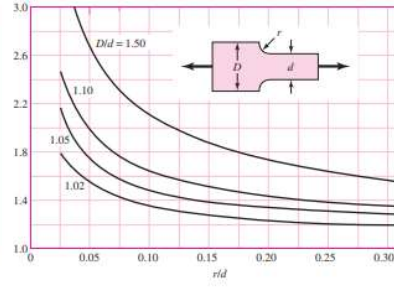
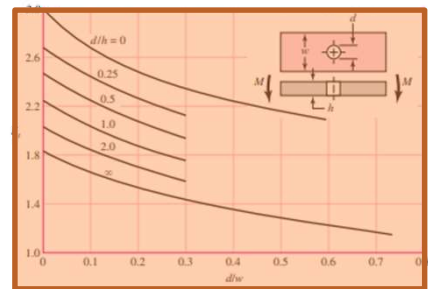
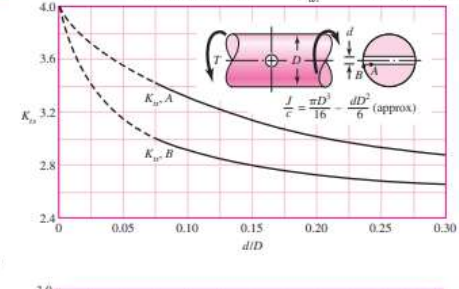
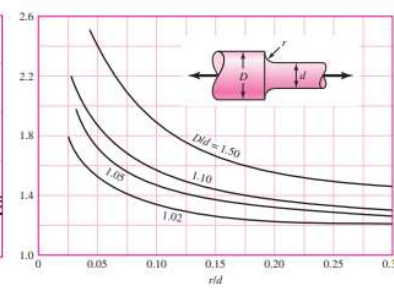
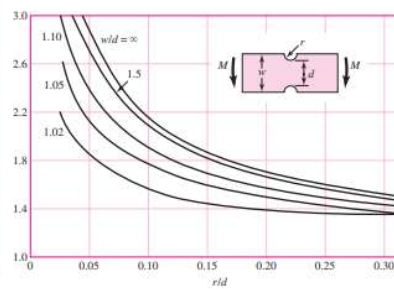
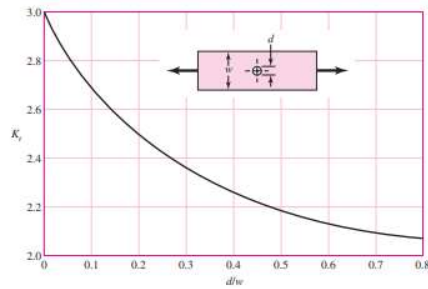
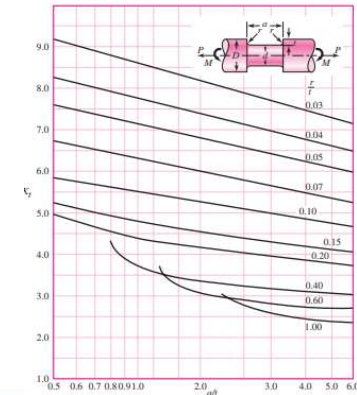
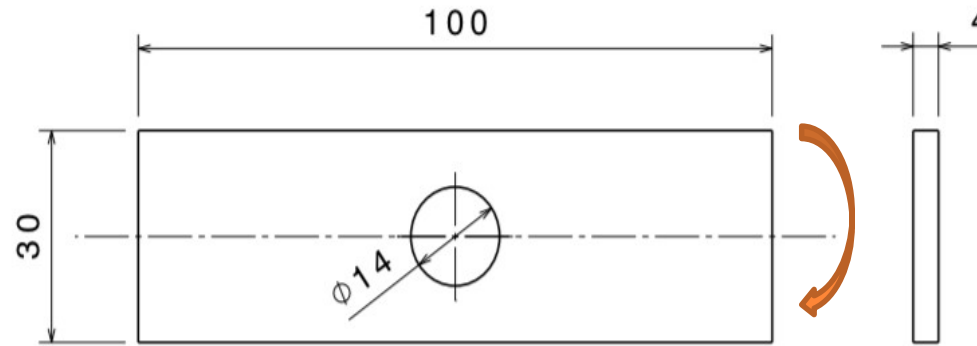
- Ka: Acabado superficial. **Ka= 0,781**
- Kb: Factor de tamaño. Carga Axial. **Kb= 0,98**
- Kc: Factor de modificación de carga. Carga axial: **Kc = 1**
- Kd: Factor de temperatura. $T^a = 60^\circ\text{C}$ $T \leq 450^\circ\text{C}$ **Kd= 0,855**
- Ke: Factor de fiabilidad. Fiabilidad de 99% **Ke= 0,702**

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

KT



KT



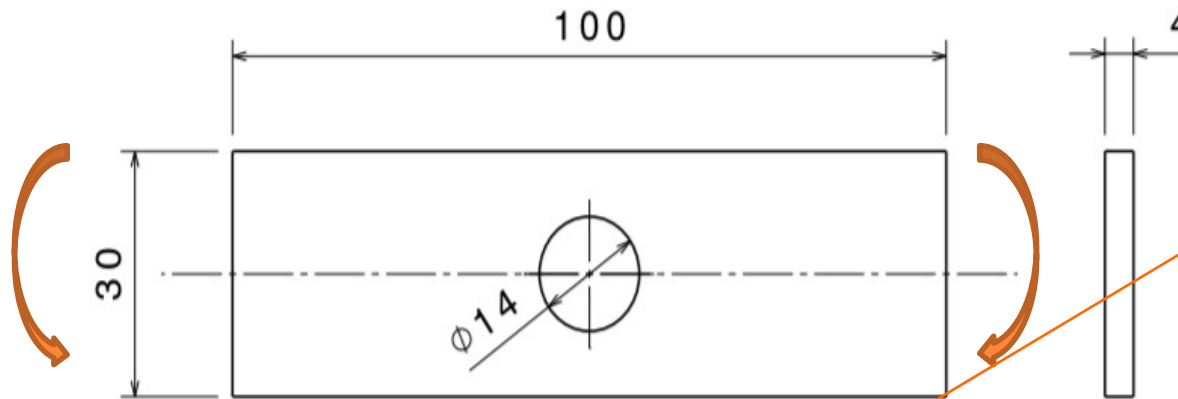
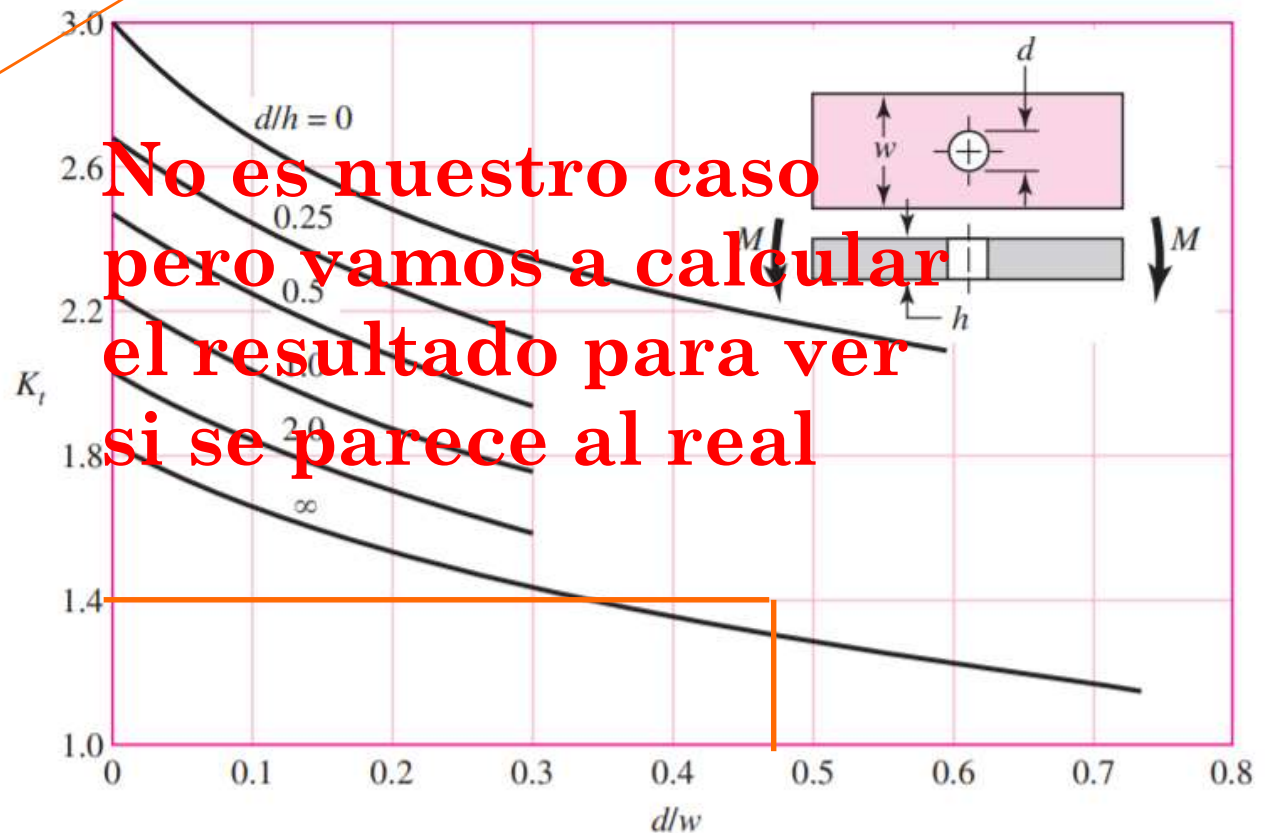


Figura A-15-2

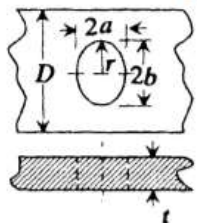
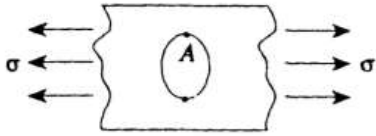
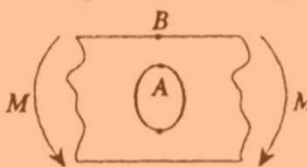
Barra rectangular con un agujero transversal en flexión.

$\sigma_0 = Mc/I$, donde $I = (w - d)h^3/12$.

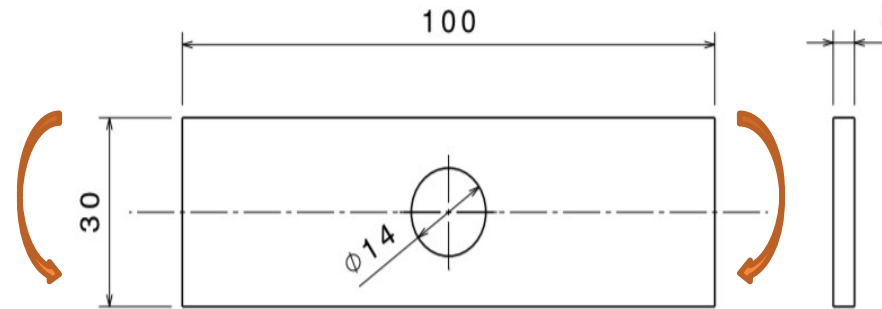
w	30
h	4
d	14
d/w	0,47
d/h	3,50
Kt	1,4



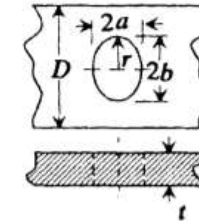
KT PAG 291

7. Single elliptical hole in finite-width plate 	a. Axial tension 	$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = \sigma / (1 - 2a/D)$ $K_t = C_1 + C_2 \frac{2a}{D} + C_3 \left(\frac{2a}{D} \right)^2 + C_4 \left(\frac{2a}{D} \right)^3,$ <table><tr><th></th><th>$1.0 \leq a/b \leq 8.0$</th></tr><tr><td>C_1</td><td>$1.109 - 0.188\sqrt{a/b} + 2.086a/b$</td></tr><tr><td>$C_2$</td><td>$-0.486 + 0.213\sqrt{a/b} - 2.588a/b$</td></tr><tr><td>$C_3$</td><td>$3.816 - 5.510\sqrt{a/b} + 4.638a/b$</td></tr><tr><td>$C_4$</td><td>$-2.438 + 5.485\sqrt{a/b} - 4.126a/b$</td></tr></table>		$1.0 \leq a/b \leq 8.0$	C_1	$1.109 - 0.188\sqrt{a/b} + 2.086a/b$	C_2	$-0.486 + 0.213\sqrt{a/b} - 2.588a/b$	C_3	$3.816 - 5.510\sqrt{a/b} + 4.638a/b$	C_4	$-2.438 + 5.485\sqrt{a/b} - 4.126a/b$
	$1.0 \leq a/b \leq 8.0$											
C_1	$1.109 - 0.188\sqrt{a/b} + 2.086a/b$											
C_2	$-0.486 + 0.213\sqrt{a/b} - 2.588a/b$											
C_3	$3.816 - 5.510\sqrt{a/b} + 4.638a/b$											
C_4	$-2.438 + 5.485\sqrt{a/b} - 4.126a/b$											
	b. In-plane bending 	$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = 12Ma / (D^3 - 8a^3)t$ $K_t = C_1 + C_2 \left(\frac{2a}{D} \right) + C_3 \left(\frac{2a}{D} \right)^2$ <table><tr><th></th><th>$0.4 \leq 2a/D \leq 1.0, \quad 1.0 \leq a/b \leq 2.0$</th></tr><tr><td>$C_1$</td><td>$1.509 + 0.336(a/b) + 0.155(a/b)^2$</td></tr><tr><td>$C_2$</td><td>$-0.416 + 0.445(a/b) - 0.029(a/b)^2$</td></tr><tr><td>$C_3$</td><td>$0.878 - 0.736(a/b) - 0.142(a/b)^2$</td></tr></table> for $2a/D \leq 0.4$, $\sigma_{\max} = \sigma_B = 6M/D^2t$		$0.4 \leq 2a/D \leq 1.0, \quad 1.0 \leq a/b \leq 2.0$	C_1	$1.509 + 0.336(a/b) + 0.155(a/b)^2$	C_2	$-0.416 + 0.445(a/b) - 0.029(a/b)^2$	C_3	$0.878 - 0.736(a/b) - 0.142(a/b)^2$		
	$0.4 \leq 2a/D \leq 1.0, \quad 1.0 \leq a/b \leq 2.0$											
C_1	$1.509 + 0.336(a/b) + 0.155(a/b)^2$											
C_2	$-0.416 + 0.445(a/b) - 0.029(a/b)^2$											
C_3	$0.878 - 0.736(a/b) - 0.142(a/b)^2$											

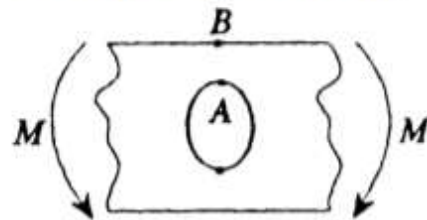
KT PAG 291



7. Single elliptical hole in finite-width plate



b. In-plane bending



a	0
b	0
r	7
D	30,00
2a/D	0,47
a/b	1,00
C1	2,00
C2	-
C3	-
KT	2,00

$$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = 12Ma / (D^3 - 8a^3)t$$

$$K_t = C_1 + C_2 \left(\frac{2a}{D} \right) + C_3 \left(\frac{2a}{D} \right)^2$$

$$0.4 \leq 2a/D \leq 1.0, \quad 1.0 \leq a/b \leq 2.0$$

$$C_1 = 1.509 + 0.336(a/b) + 0.155(a/b)^2$$

$$C_2 = -0.416 + 0.445(a/b) - 0.029(a/b)^2$$

$$C_3 = 0.878 - 0.736(a/b) - 0.142(a/b)^2$$

$$\text{for } 2a/D \leq 0.4, \quad \sigma_{\max} = \sigma_B = 6M/D^2t$$

a	0	14
b	0	14
r	7	
D	30,00	
2a/D	0,47	1,000 vale
a/b	1,00	1,000 vale
C1	2,00	
C2	-	
C3	-	
KT	2,00	

Verificación

199

UNIVERSIDAD
NEBRIJA

KT PAG 291

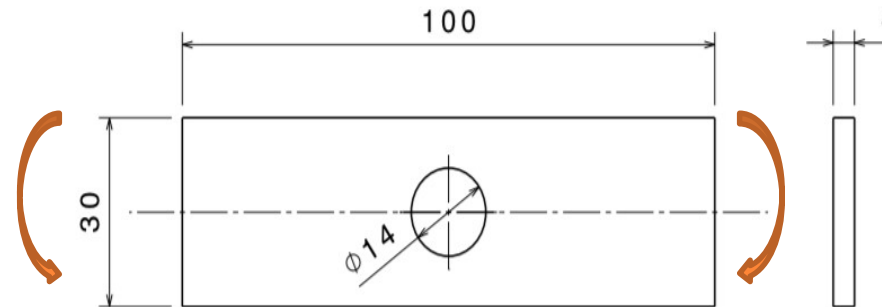
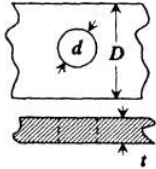
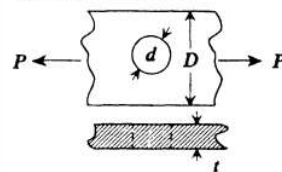


TABLE 6-1 (continued) STRESS CONCENTRATION FACTORS: Holes

2.
Central single circular hole
in finite-width plate



a. Axial tension

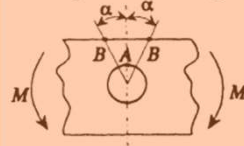


$$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = P/[t(D-d)]$$

$$K_t = 3.000 - 3.140(d/D) + 3.667(d/D)^2 - 1.527(d/D)^3$$

for $0 \leq d/D \leq 1$

b. In-plate bending



(1) At edge of hole,

$$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = 6Md/(D^3 - d^3)t$$

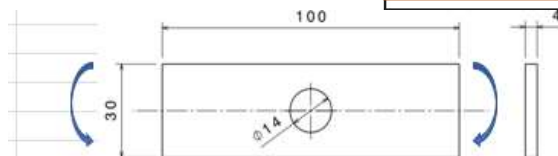
$$K_t = 2 \text{ (independent of } d/D \text{)}$$

(2)

At edge of plate,

$$\sigma_{\max} = \sigma_B = K_t \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = 6MD/(D^3 - d^3)t$$

$$K_t = 2d/D (\alpha = 30^\circ)$$



KA

KB

d

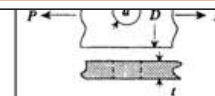
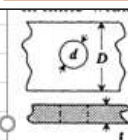
D

2

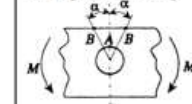
0,93 Menor que 1

14

30



b. In-plate bending



200

KT PAG 291

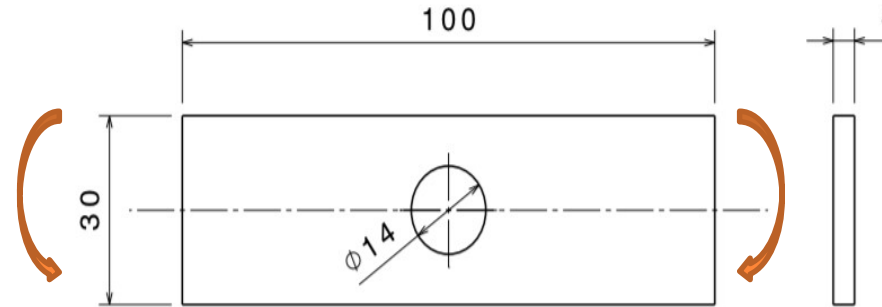


TABLE 6-1 (continued) STRESS CONCENTRATION FACTORS: Holes

3. Eccentric circular hole in finite-width plate	b. In-plane bending $c=d=15$	$\sigma_{\max} = \max(\sigma_A, \sigma_B)$ $\sigma_B = K_{tB} \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = 6M/D^2t$ $K_{tB} = C_1 + C_2 \frac{c}{e} + C_3 \left(\frac{c}{e}\right)^2$ $0 \leq d/2c \leq 0.5, \quad 0 \leq c/e \leq 1.0$ $C_1 = 3.000 - 0.631(d/2c) + 4.007(d/2c)^2$ $C_2 = -5.083 + 4.067(d/2c) - 2.795(d/2c)^2$ $C_3 = 2.114 - 1.682(d/2c) - 0.273(d/2c)^2$ $\sigma_A = K_{tA} \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = 6M/D^2t$ $K_{tA} = C'_1 + C'_2 \frac{c}{e} + C'_3 \left(\frac{c}{e}\right)^2$ $C'_1 = 1.0286 - 0.1638(d/2c) + 2.702(d/2c)^2$ $C'_2 = -0.05863 - 0.1335(d/2c) - 1.8747(d/2c)^2$ $C'_3 = 0.18883 - 0.89219(d/2c) + 1.5189(d/2c)^2$
4. Two equal circular holes in infinite plate	a. Uniaxial tension parallel to row of holes ($\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = 0$)	$\sigma_{\max} = K_t \sigma \text{ for } 0 \leq d/L \leq 1$ $K_t = 3.000 - 0.712 \left(\frac{d}{L}\right) + 0.271 \left(\frac{d}{L}\right)^2$

Si cumple

RESISTENCIA A LA FATIGA

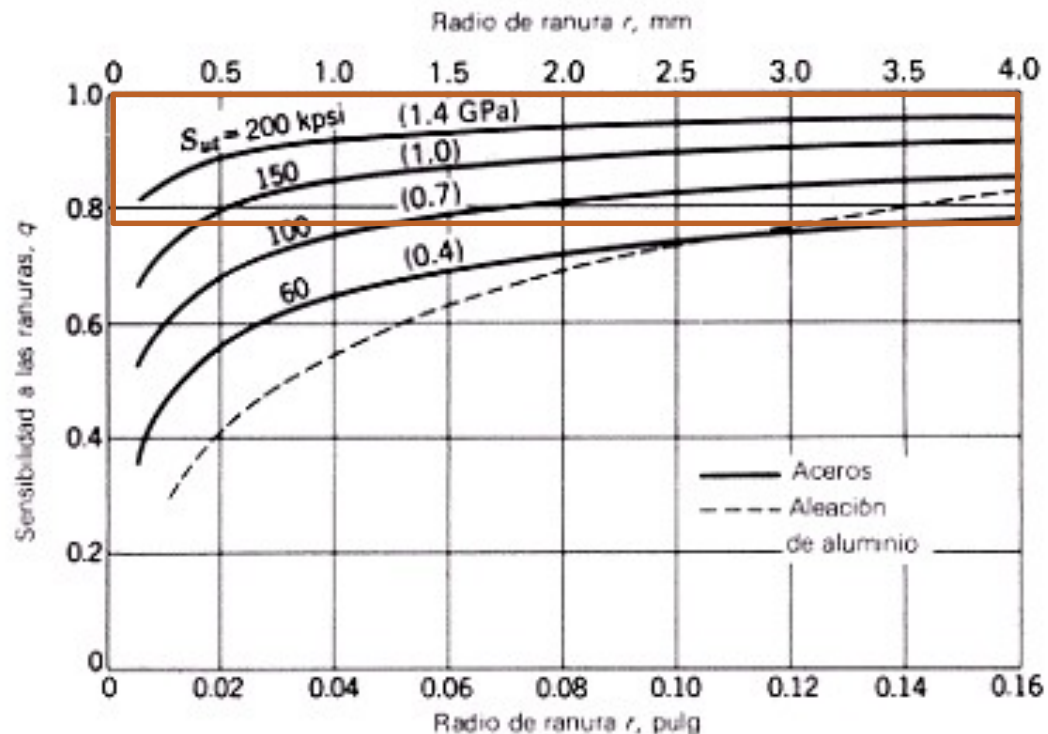
6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

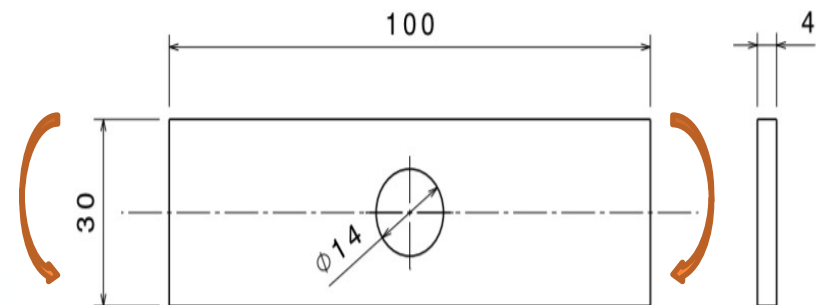
- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones. Sensibilidad a la entalla q .
- Cargas de flexión y axiales alternantes. $S_{ut}=400$ Mpa, $R=7$ mm.
 $R>r$ Tomar valor $r=4$ mm,

$S_{ut}=400$ Mpa



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

$q=0,78$



RESISTENCIA A LA FATIGA

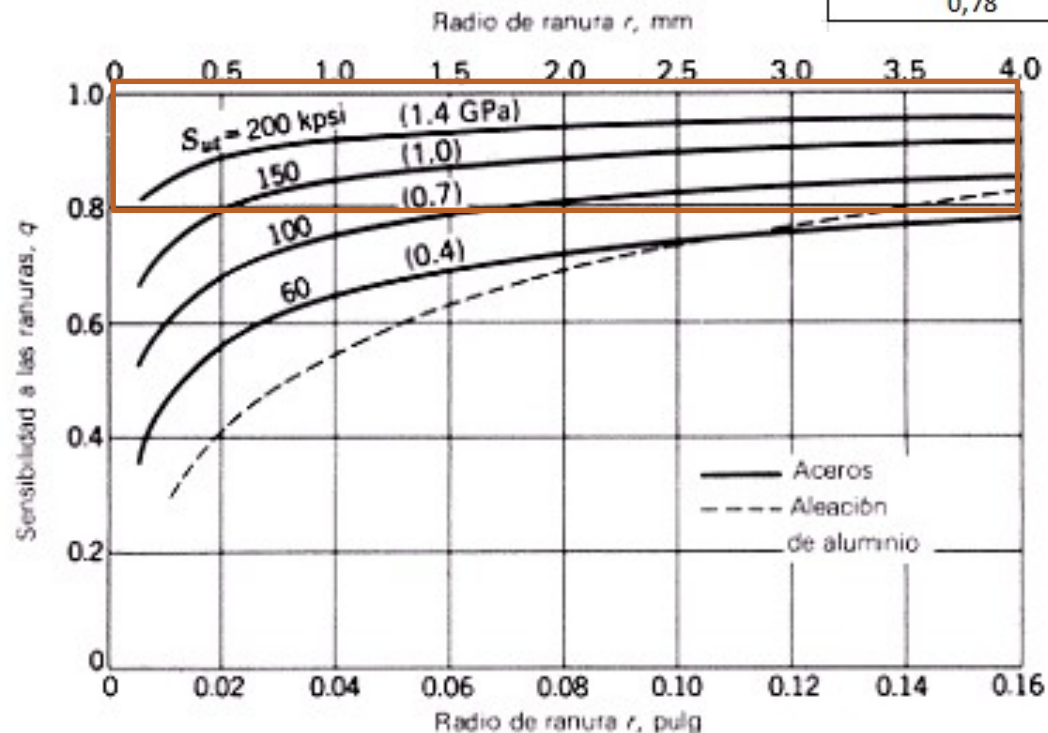
6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

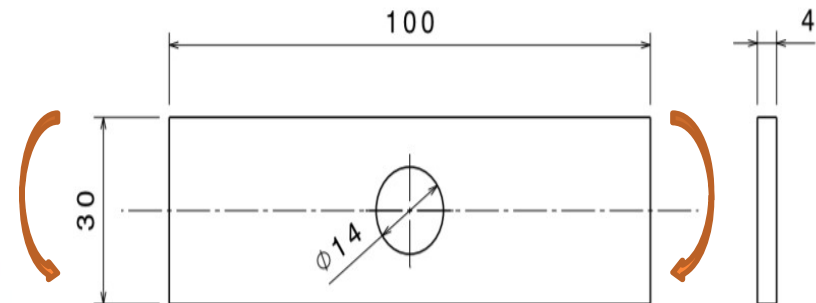
○ Ejercicio: Placa de acero laminado en caliente

- $1/K_f$: Factor de concentración de tensiones. Sensibilidad a la entalla q .
- Cargas de flexión y axiales alternantes. $S_{ut}=400$ Mpa, $R=7$ mm. $R>r$ Tomar valor $r=4$ mm, $q=0,78$ $K_f=1,78$ $1/K_f=0,56$

q	K_t	K_f	$1/K_f$
0,78	2	1,78	0,56



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



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

○ Ejercicio: Placa de acero laminado en caliente

- 1/Kf: Factor de concentración de tensiones. Sensibilidad a la entalla q.
- Cargas de flexión y axiales alternantes. Sut=400 Mpa, R= 7mm. R>r
Tomar valor r=4mm, q= 0,825 Kf=1,825 1/Kf=0,548

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

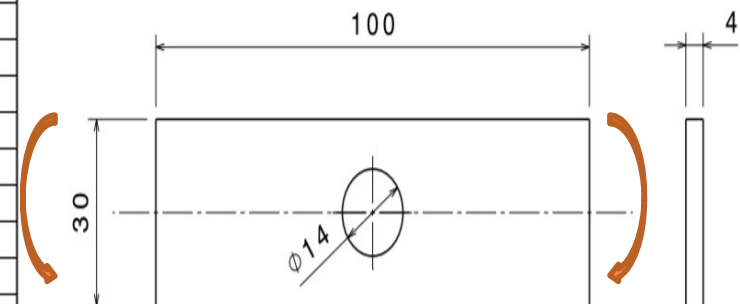
Formula	q	Kt	Kf	1/Kf
	0,825	2	1,825	0,548
Tablas	q	Kt	Kf	1/Kf
	0,780	2	1,780	0,562

$a^{0,5}$			
Sut	400	Mpa	
Intervalo	Sn		a
s1	380	a1	0,59
s2	415	a2	0,54
s2-s1	35	a2-a1	-0,05
Tg	-	0,001429	
Sut-s1	20		
$a^{(1/2)} = a1 + tg(sut-s1)$	0,561		
R	7		
$R^{1/2}$	2,6458	1+a/r	1,212
$q = 1 / (1 + (a/r)^{1/2})$	0,825		

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

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

S_u		$\sqrt{a}$		
		Carga axial y flexión		Torsión
(ksi)	(MPa)	(in ^{0.5})	(mm ^{0.5})	(in ^{0.5})
50	345	0.130	0.66	0.093
55	380	0.118	0.59	0.087
60	415	0.108	0.54	0.080
70	485	0.093	0.47	0.070
80	550	0.080	0.40	0.062
90	620	0.070	0.35	0.055
100	690	0.062	0.31	0.049
110	760	0.055	0.28	0.044
120	825	0.049	0.25	0.039
130	895	0.044	0.22	0.035
140	965	0.039	0.20	0.031
160	1100	0.031	0.16	0.024
180	1240	0.024	0.12	0.018
200	1380	0.018	0.09	0.013
220	1515	0.013	0.07	0.009
240	1655	0.009	0.05	



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

- Ka: Acabado superficial.
- Kb: Factor de tamaño. Carga Flexión.
- Kc: Factor de modificación de carga. Carga Flexión:
- Kd: Factor de temperatura. $T^a = 450^\circ\text{C}$ $T \leq 550^\circ\text{C}$
- Ke: Factor de fiabilidad. Fiabilidad de 99,99%
- 1/Kf: Concentración de tensiones. **Kt=2 q= 0,825 Kf=1,825**
- Kg: Factor de efectos diversos. Nada.

$$K_a = 0,78$$

$$K_b = 0,98$$

$$K_c = 1$$

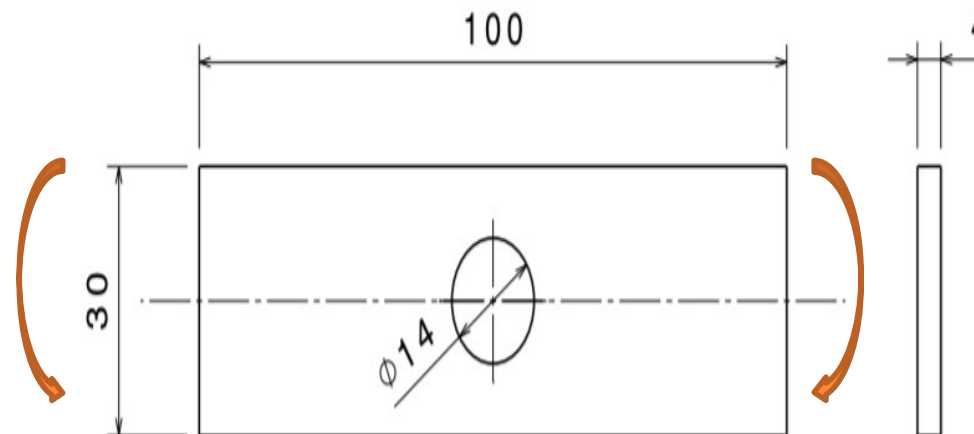
$$K_d = 0,855$$

$$K_e = 0,702$$

$$1/K_f = 0,548$$

$$K_g = 1$$

Ka	Kb	Kc	Kd	Ke	1/Kf	Kg	S'e	Se	K
0,78	0,98	1	0,855	0,702	0,548	1	200		



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

$$S_e = \prod_i K_i S_e'$$

○ Ejercicio: Placa de acero laminado en frío

- Ka: Acabado superficial.
- Kb: Factor de tamaño. Carga Flexión.
- Kc: Factor de modificación de carga. Carga Flexión:
- Kd: Factor de temperatura. $T^a = 450^\circ\text{C}$ $T \leq 550^\circ\text{C}$
- Ke: Factor de fiabilidad. Fiabilidad de 99,99%
- 1/Kf: Concentración de tensiones. **Kt=2 q= 0,825 Kf=1,825**
- Kg: Factor de efectos diversos. Nada.

$$K_a = 0,78$$

$$K_b = 0,98$$

$$K_c = 1$$

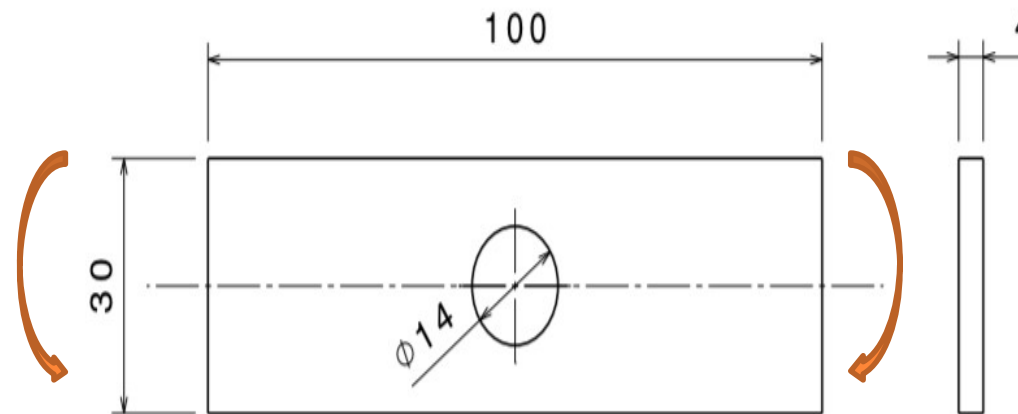
$$K_d = 0,855$$

$$K_e = 0,702$$

$$1/K_f = 0,548$$

$$K_g = 1$$

Ka	kb	kc	Kd	Ke	1/Kf	Kg	S'e	Se		K
0,78	0,98	1	0,855	0,702	0,548	1	200	50,47	Mpa	0,25



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

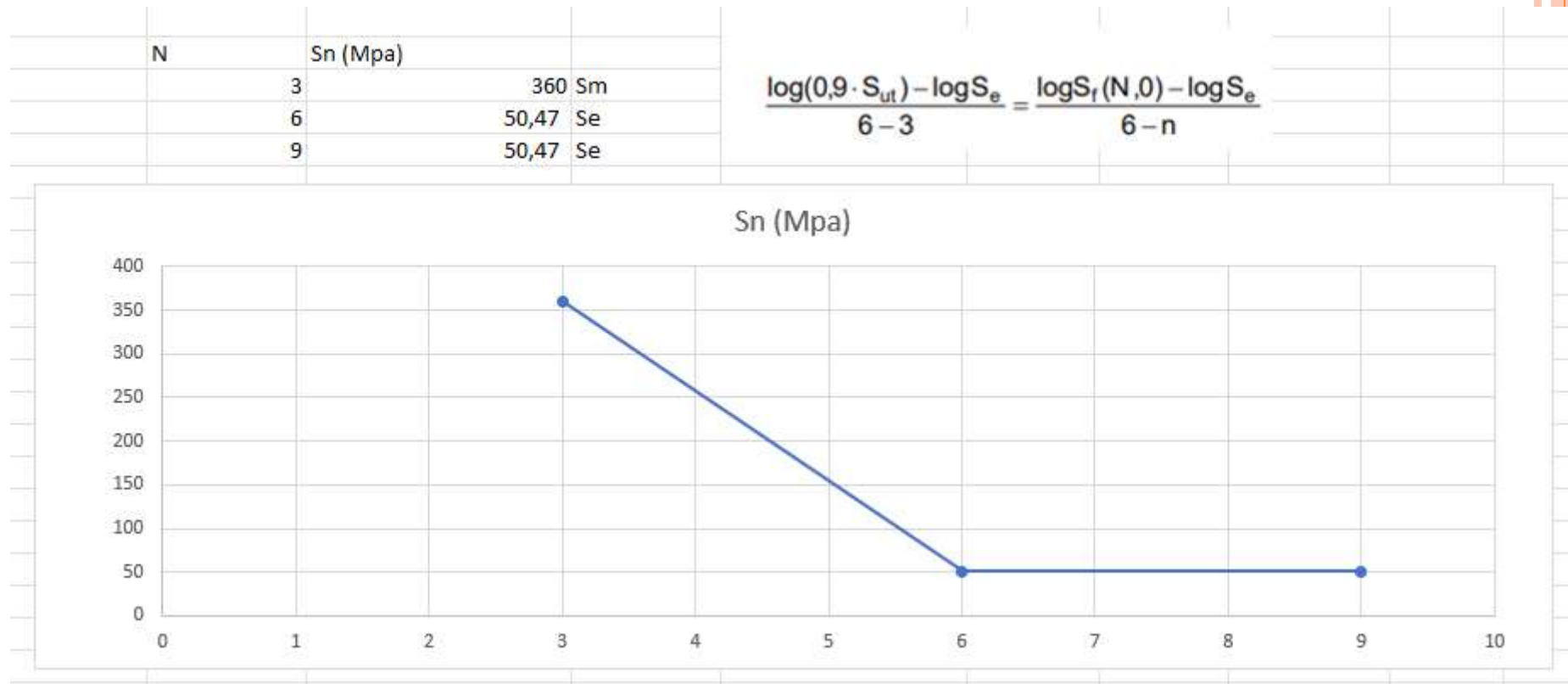
- 1º Dibuje el diagrama S-N estimado.



RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- 2º Si se desea que la pieza aguante 600.000 ciclos ¿Cuál es la máxima tensión teórica que podría soportar?

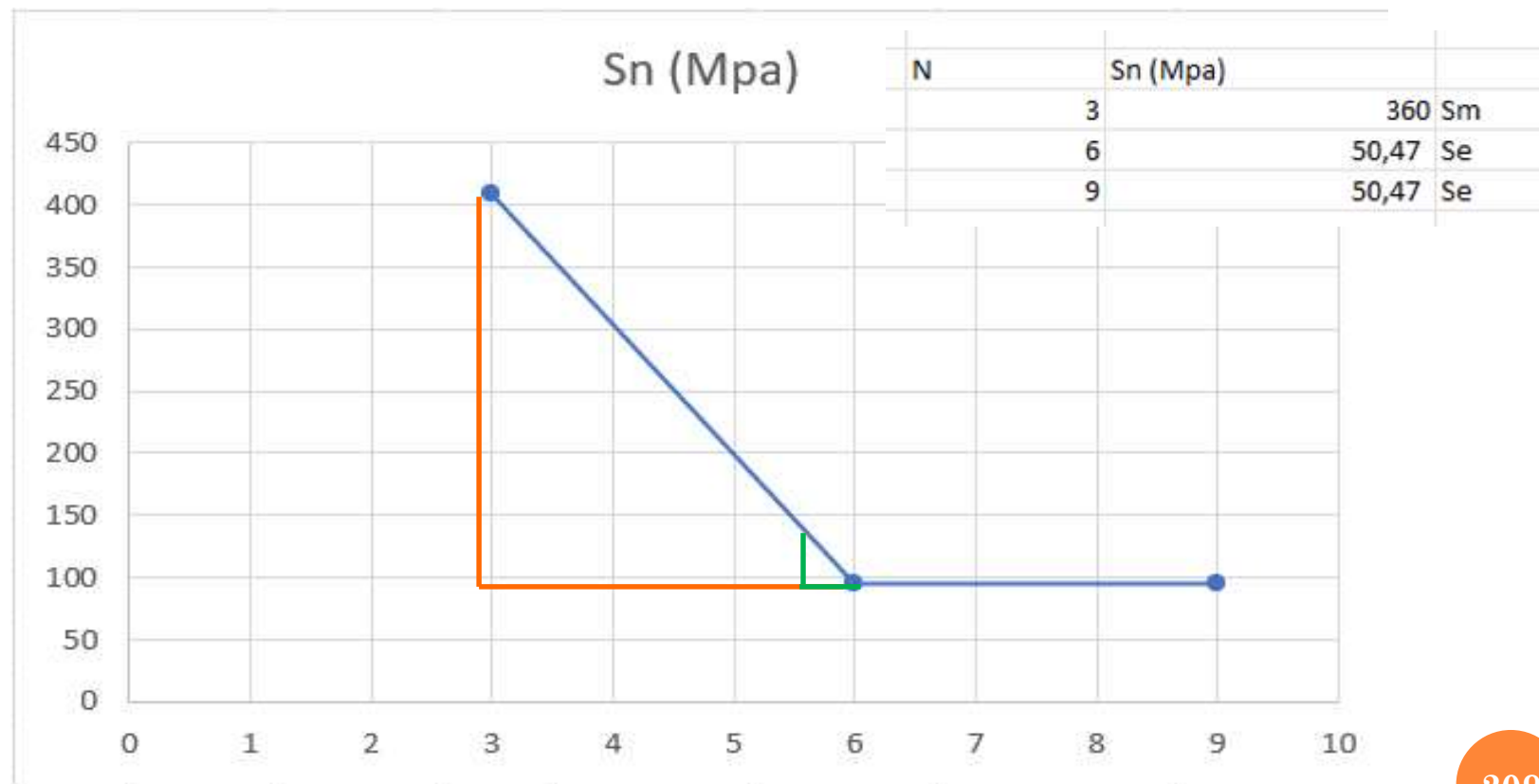


208

RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- 2º Si se desea que la pieza aguante 600.000 ciclos ¿Cuál es la máxima tensión teórica que podría soportar?



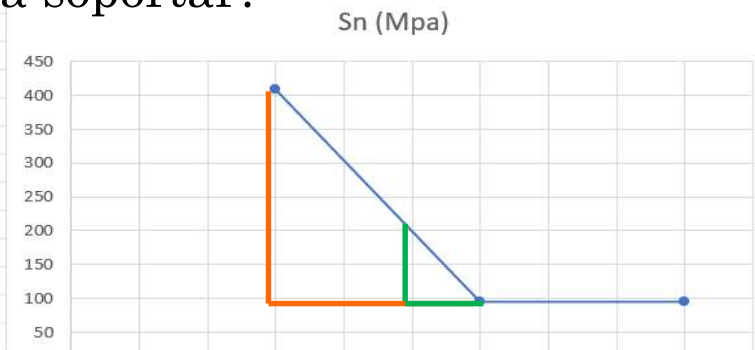
209

RESISTENCIA A LA FATIGA

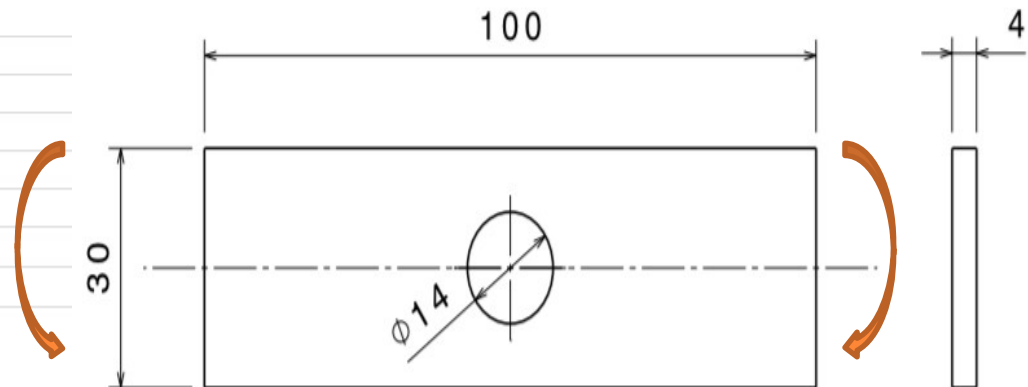
6. ECUACIÓN DE MARIN

- 2° Si se desea que la pieza aguante 600.000 ciclos ¿Cuál es la máxima tensión teórica que podría soportar?

N	Sn (Mpa)
3	360 Sm
6	50,47 Se
9	50,47 Se



Sn	?	N	600.000	log(n)	5,778
Sm	360			N1000	3
Se	50,47			N1000000	6
$\frac{\log S_m - \log S_e}{6-3} = \frac{\log(S_n) - \log S_e}{6-n}$					
0,853	=	$\log(S_n)$	-		
3,000		0,222			
0,284	=	$\log(S_n)$	-		
		0,222			
1,766	=	$\log(S_n)$			
Sn	=	58,37			



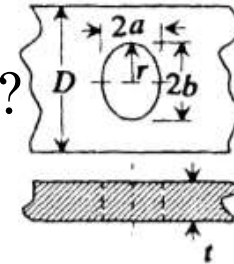
RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

- ¿A que valor de flexión corresponde esa tensión?

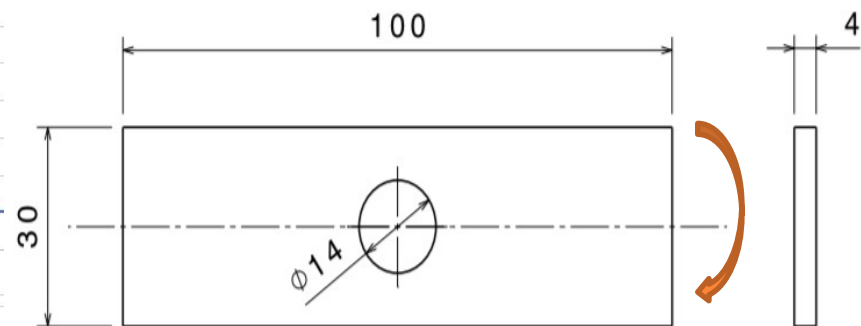
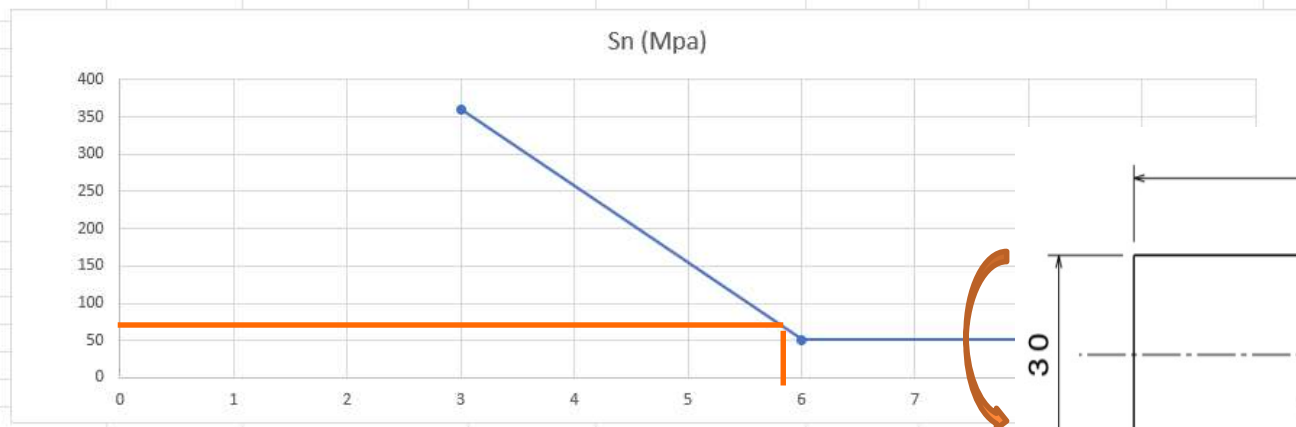
$$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = 12Ma / (D^3 - 8a^3)t$$

7.
Single elliptical hole in
finite-width plate



$M = \frac{\sigma_{\text{nom}}(D^3 - 8a^3)t}{12a}$	Snom	D	a	t
	58,37		30	7
	58.366.780,07		0,03	0,007
	Pa=N/m2	m	m	m
	M		67,42	Nm
	Se		50,47	

N	Sn (Mpa)
3	360 Sm
6	50,47 Se
9	50,47 Se

$$\frac{\log(0,9 \cdot S_{ut}) - \log S_e}{6-3} = \frac{\log S_t(N,0) - \log S_e}{6-n}$$


RESISTENCIA A LA FATIGA

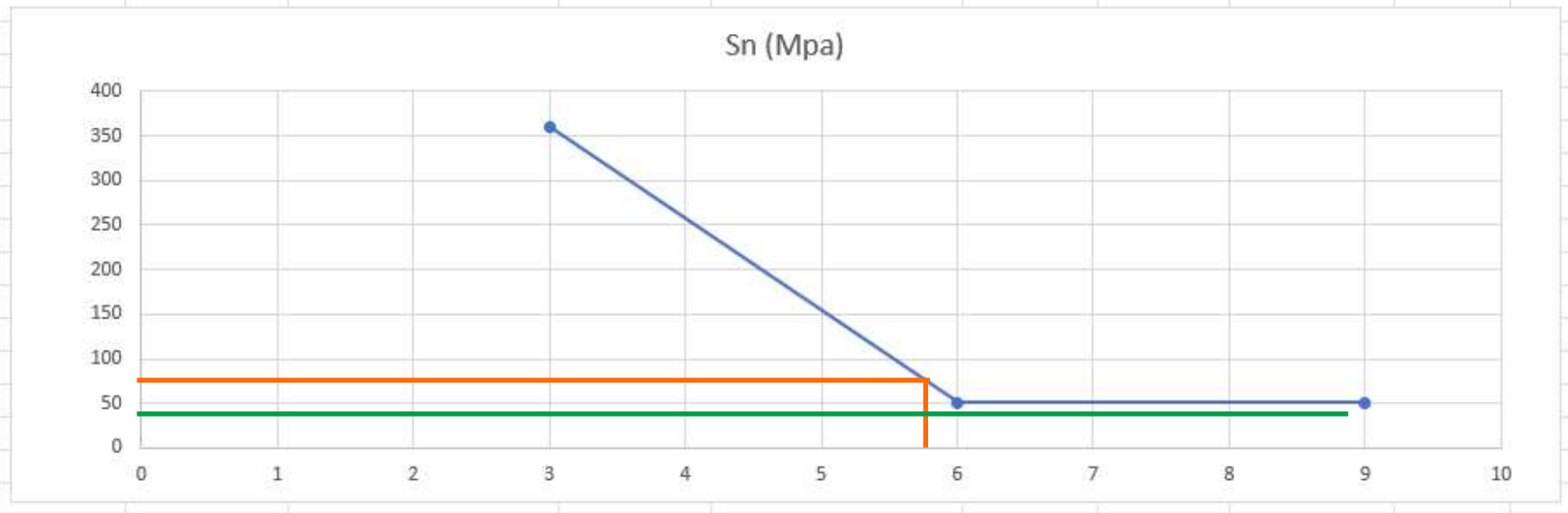
Entender enunciado

6. ECUACIÓN DE MARIN

- Si deseamos tener un factor de seguridad de 2 con respecto al límite de fatiga del material (para asegurar vida infinita) ¿Cuál será la flexión alternante máxima que podríamos aplicar a la pieza?

$$S_n = 58,37$$

N	Sn (Mpa)	
3	360	Sm
6	50,47	Se
9	50,47	Se

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


RESISTENCIA A LA FATIGA

6. ECUACIÓN DE MARIN

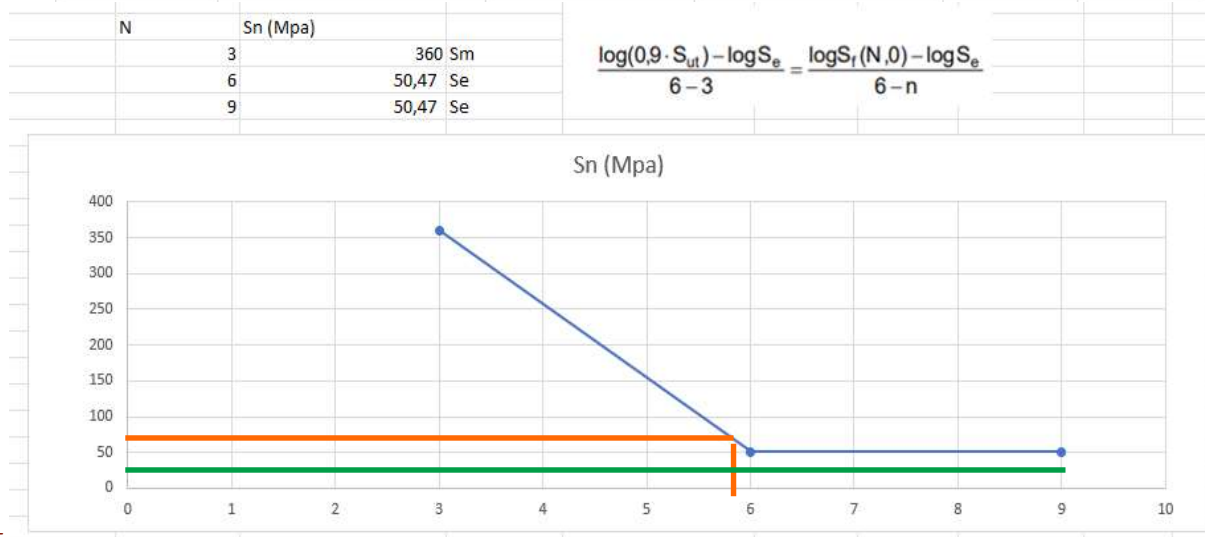
- Si deseamos tener un factor de seguridad de 2 con respecto al límite de fatiga del material (para asegurar vida infinita) ¿Cuál será la flexión alternante máxima que podríamos aplicar a la pieza?

$$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = 12Ma / (D^3 - 8a^3)t$$

$$M = \frac{\sigma_{\text{nom}} (D^3 - 8a^3)t}{12a}$$

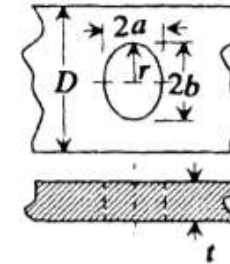
Snom	D	a	t
58,37	30	7	4
58.366.780,07	0,03	0,007	0,004
Pa=N/m2	m	m	m
M		67,42	Nm
Se		50,47	
CS		2,00	
MCS2		33,71	
Sn=Se/2		29,18	< 50,47 Se

$$\sigma_n / S_n = 1 / CS$$



7.

Single elliptical hole in finite-width plate

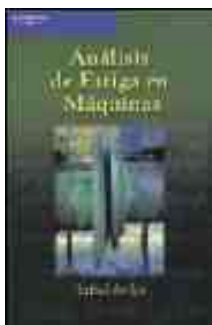


RESISTENCIA A LA FATIGA

BIBLIOGRAFÍA



J.E. Shigley y C. Mischke, McGraw Hill, 2002.
DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA, 6ª Ed.
ISBN: 9701036468



R. Avilés, Ed. Thomson, 2005
ANÁLISIS DE FATIGA EN MÁQUINAS
ISBN: 84-9732-344-0



A. J. Besa González et al., Prentice Hall, 2003.
COMPONENTES DE MÁQUINAS
ISBN: 84-205-3907-4

<https://nch.nebrija.es/>

<https://fs.nebrija.es/adfs/ls/>

