

**MECÁNICA APLICADA
MECÁNICA Y MECANISMOS**



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

FATIGA EN MATERIALES

Ing. Carlos Barrera - 2023

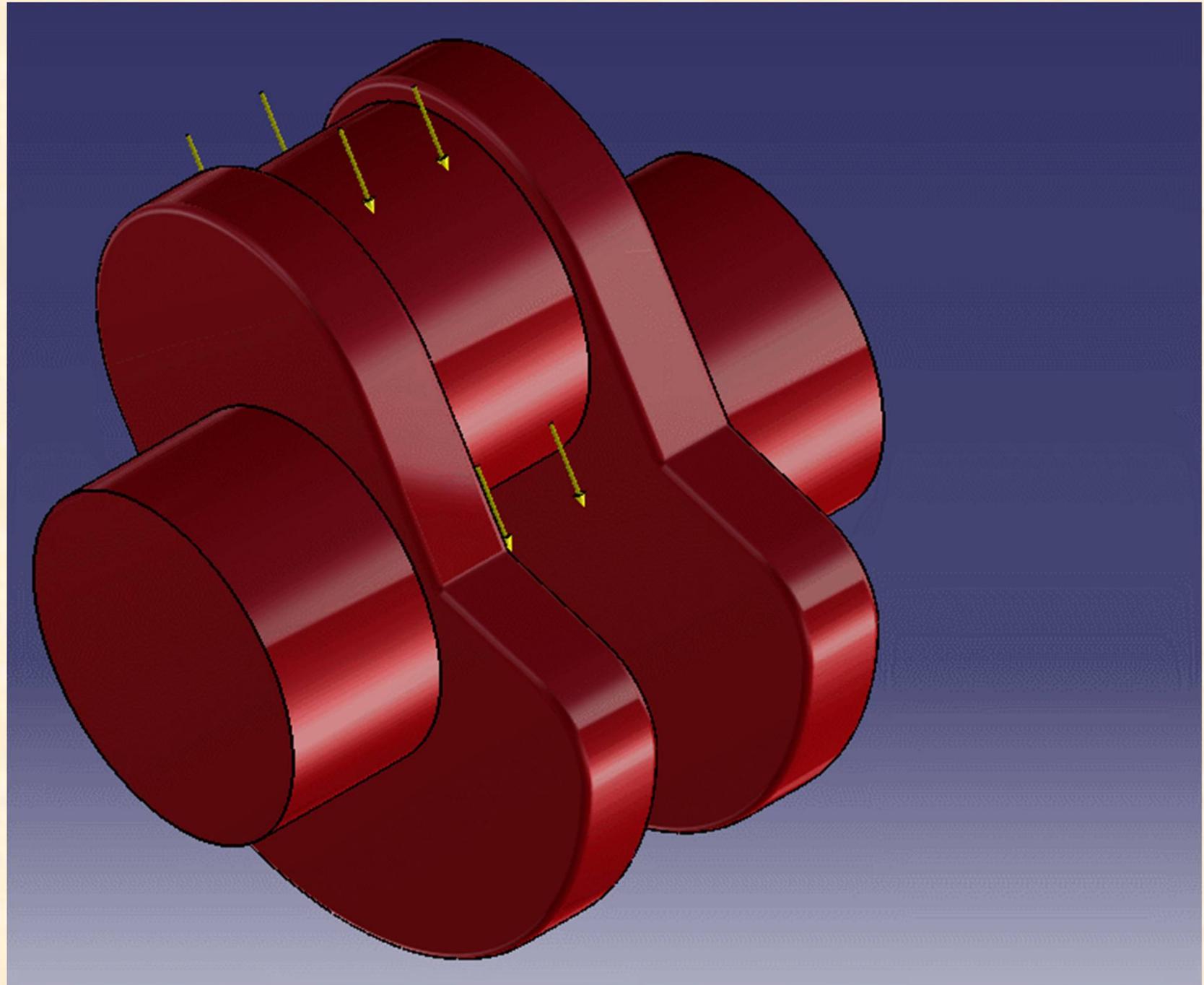


UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD
DE INGENIERÍA

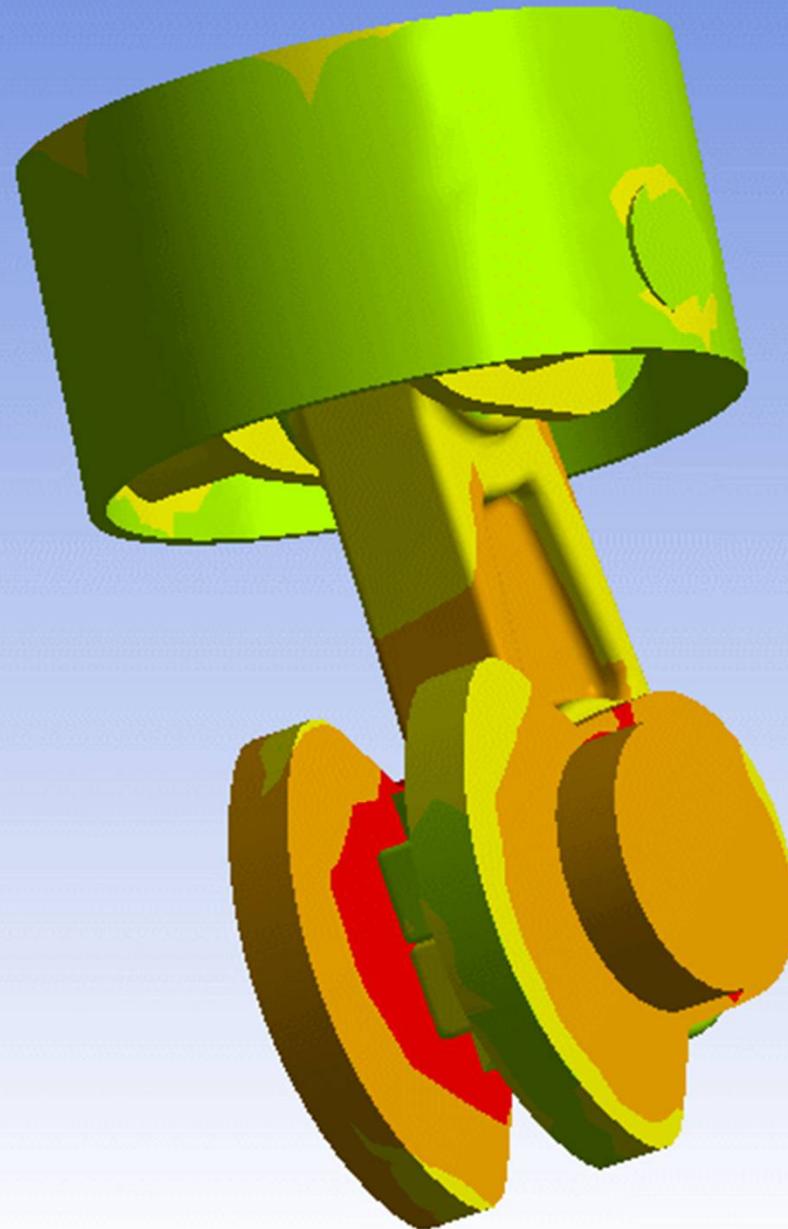
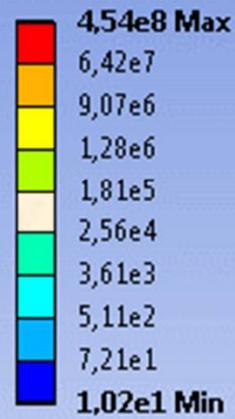
Cátedra:
MECÁNICA APLICADA-
MECÁNICA Y
MECANISMOS



Ing. Carlos Barrera

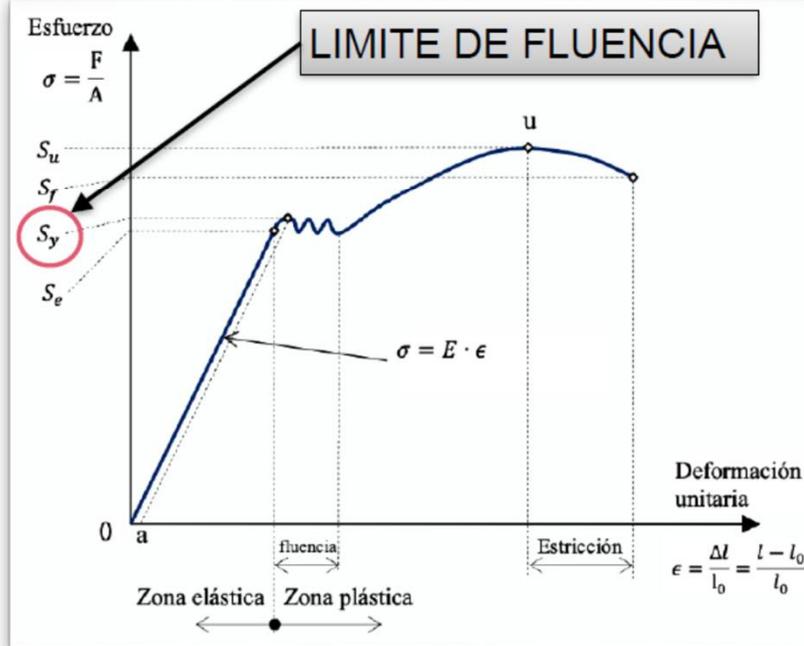
17:46

C: Transient Cilindro Force Gas
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1,2973e-003
13/09/2015 15:14



Como se llama el gráfico
mostrado en esta diapositiva? Y
en qué otra materia se estudió?

Diagrama esfuerzo-deformación



Cuando se somete a un elemento de acero a un esfuerzo simple (en este caso tracción), de forma lenta y hasta alcanzar la rotura de la probeta, se traza un diagrama similar al mostrado (fuera de escala para percibir los puntos característicos)

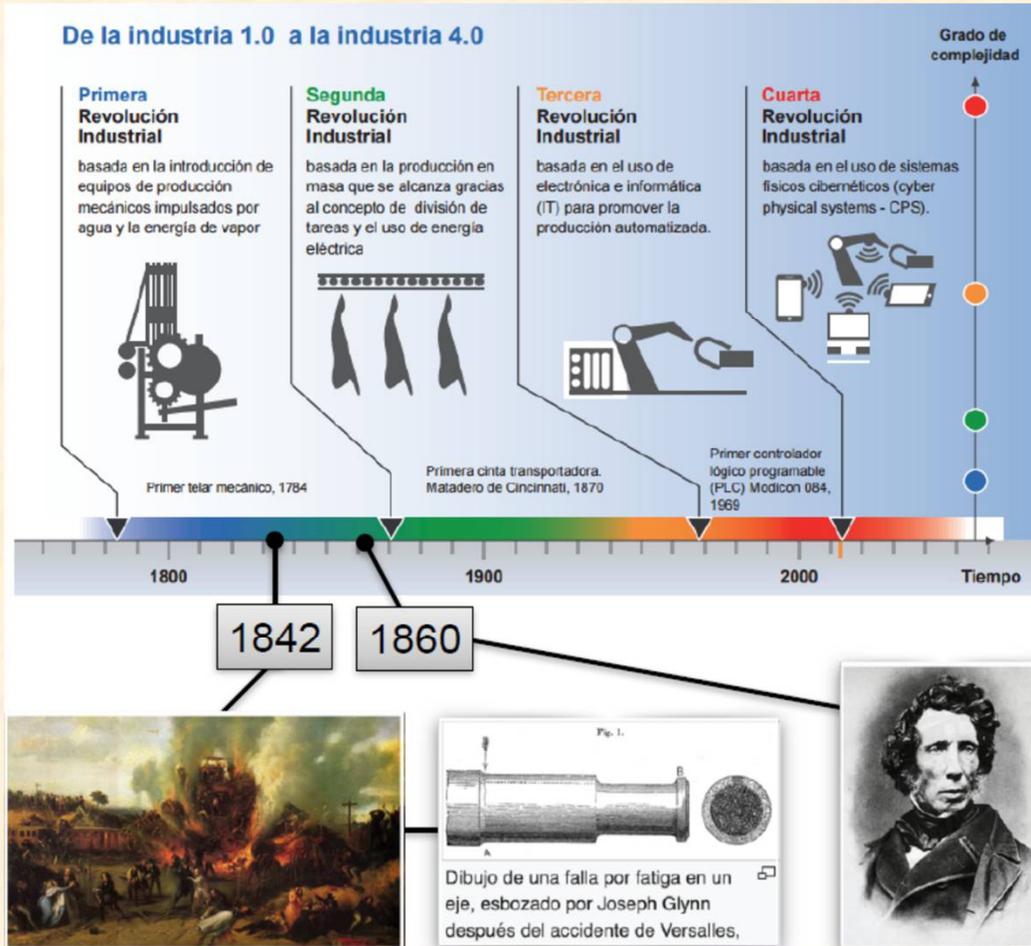
La condición para que se produzca la falla estática:

1. Un esfuerzo de tensión suficientemente grande.

Recordemos que cuando se supera EL LIMITE DE FLUENCIA la pieza comienza a sufrir daños permanentes.



GRABADO DEL AÑO 1842: accidente ferroviario en Versalles, Francia



Nos remontamos a mediados de la primera Revolución Industrial, donde se produce en Francia un grave accidente ferroviario. (Año 1842)

Luego de las investigaciones, se determina que se fracturaron los ejes de la locomotora, y se relacionaba con el esfuerzo variable.

Esta es la primer falla por fatiga registrada en la historia

En 1860, el ingeniero alemán August Wöhler desarrolló diversos ensayos, de los cuales extrajo dos conclusiones, la primera, que las fuerzas necesarias para provocar la rotura con cargas dinámicas eran muy inferiores a las necesarias en el caso estático, y la segunda, que existía un umbral por debajo del cual las probetas no se rompían (límite de fatiga).

La vida a fatiga se puede definir como el "**fallo debido a cargas repetitivas ... que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura**" (Fuchs, 1980)

‘La fatiga es el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones **VARIABLES** en algún punto o puntos y que produce grietas o la fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones (ASTM)’

Tres factores se requieren para que se dé una falla por fatiga:

1. **Un esfuerzo de tensión suficientemente grande.**
2. **Una variación de esfuerzo de suficiente amplitud.**
3. **Un número de ciclos de aplicación de la carga elevado.**

La rotura por fatiga comienza en puntos arbitrarios como deslizamiento en planos de corte de los cristales cuando están orientados de manera que pueda ocurrir.

Las piezas rotas por fatiga presentan en su superficie de rotura dos zonas características : Una zona lisa de fina estructura y brillante y una zona de cristales grandes .

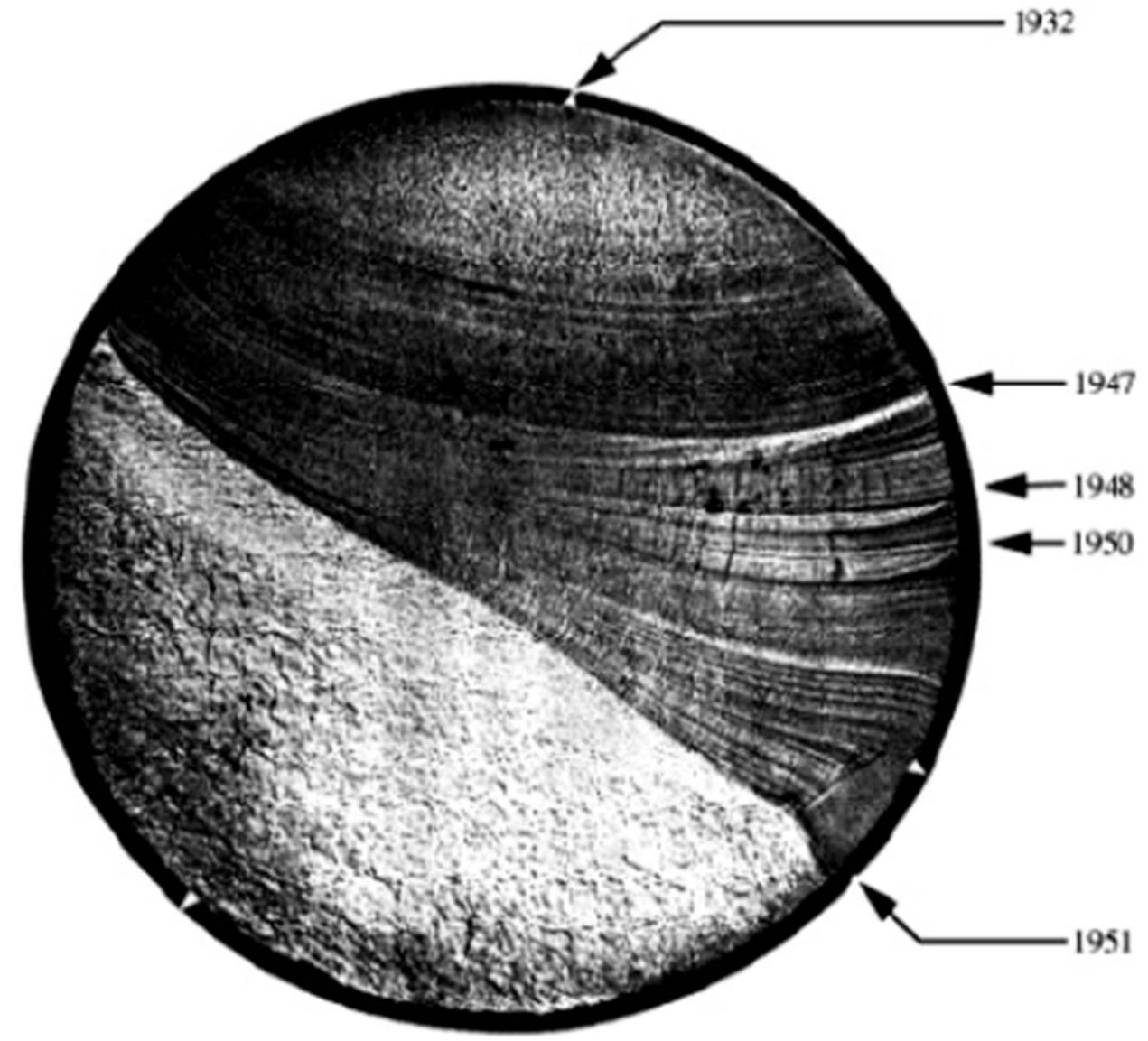
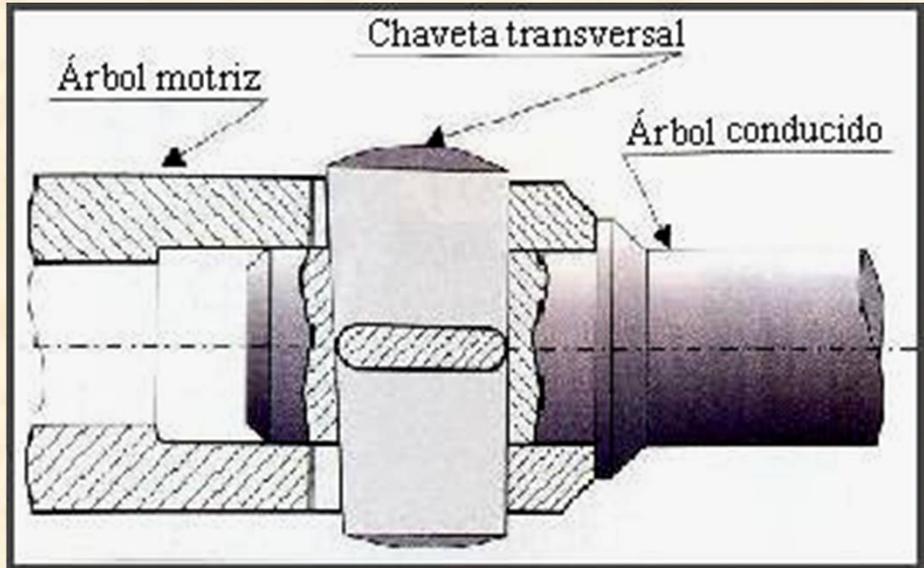
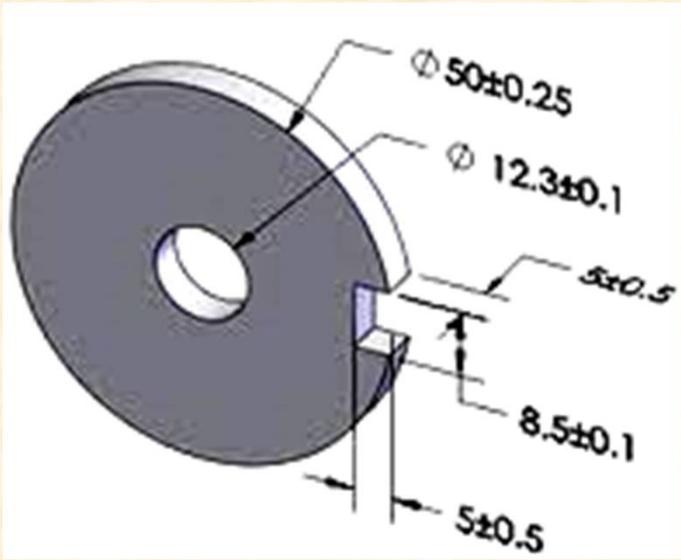
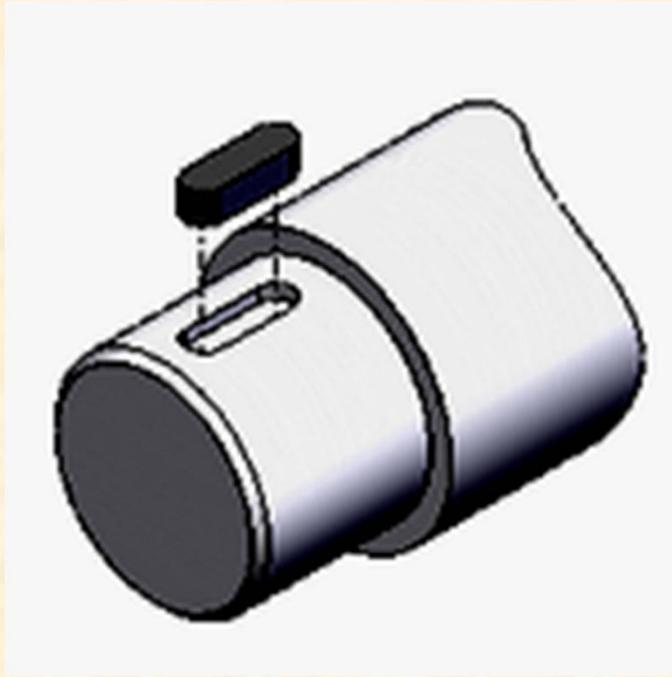


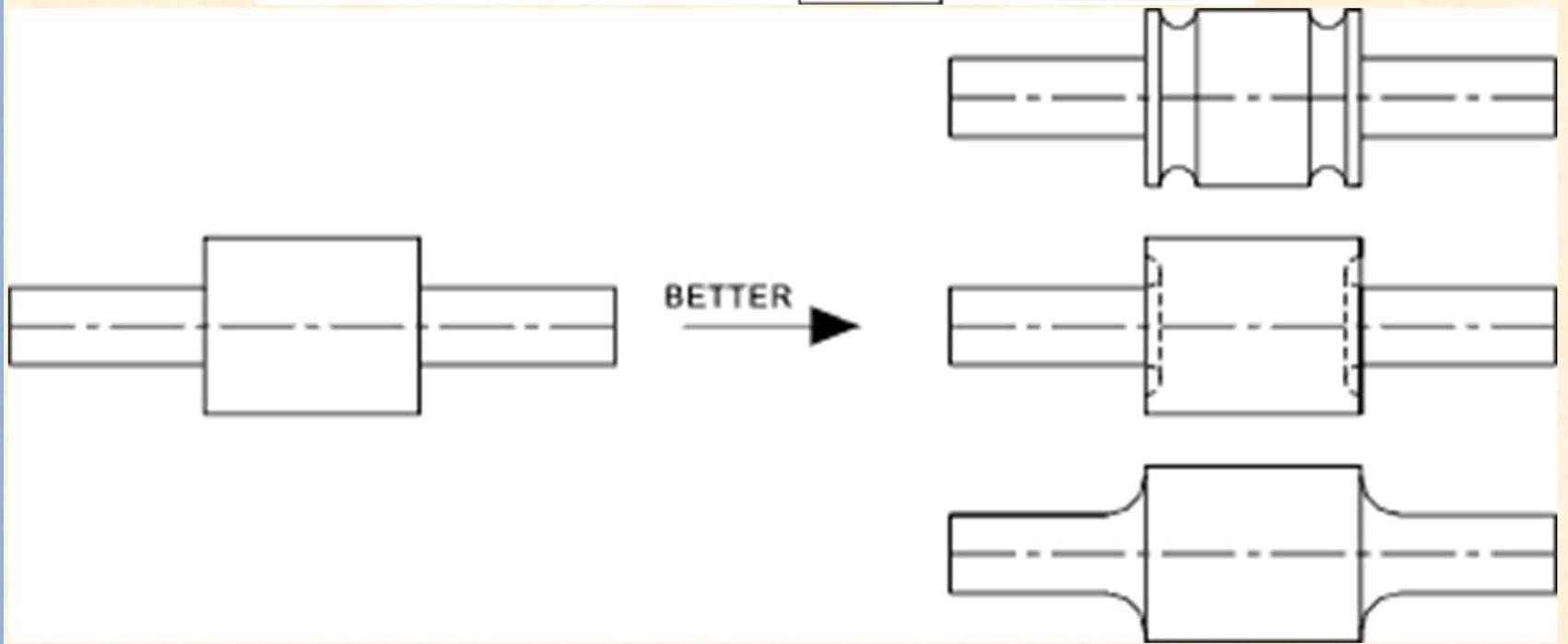
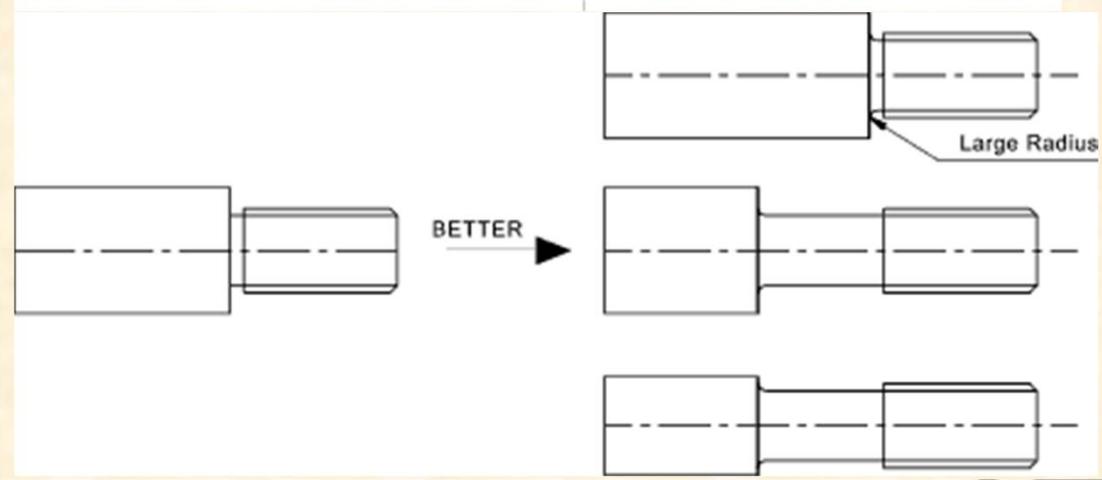
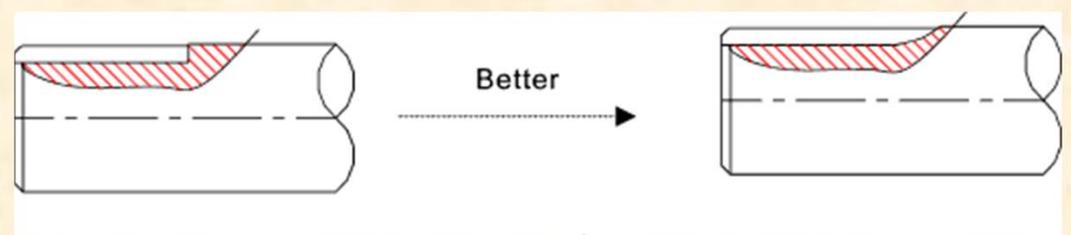
Fig. 8.3 Típico ejemplo de la rotura del eje de un motor, ocurrida por vibraciones de torsión.
(Tomado de F. R. Hutchings y P. M. Unterweiser, 1981. Reproducido por cortesía de ASM International®.
Todos los derechos reservados. www.asminternational.org).

¿Dónde se inicia una falla por fatiga?

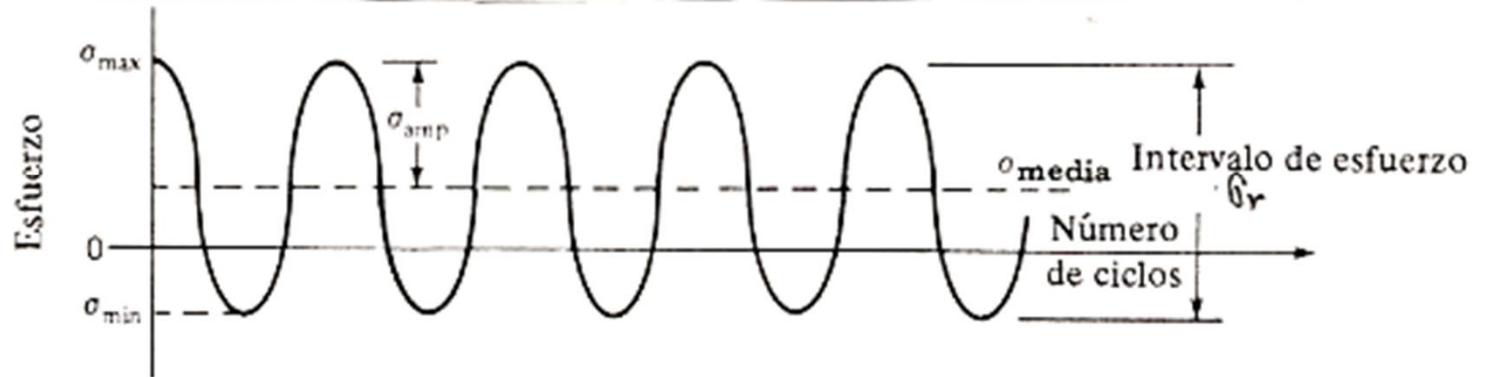
La falla por fatiga se debe a la formación y propagación de grietas. Por lo general, una grieta de fractura se inicia en una discontinuidad del material donde el esfuerzo cíclico es máximo. Las discontinuidades pueden surgir debido a:

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





El número de ciclos para iniciar una grieta por fatiga es la duración hasta la iniciación de la fatiga N_i . El período de crecimiento de la grieta desde la iniciación hasta la longitud crítica se llama duración de propagación N_p . La duración total es la suma de estas dos duraciones.



Intervalo de esfuerzo:
$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

El esfuerzo medio:

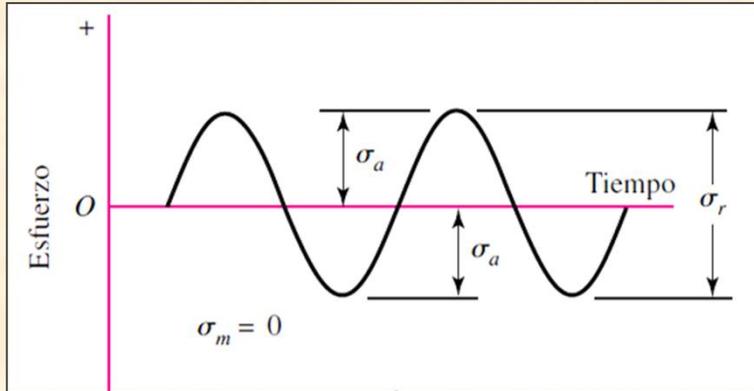
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

La amplitud del esfuerzo:

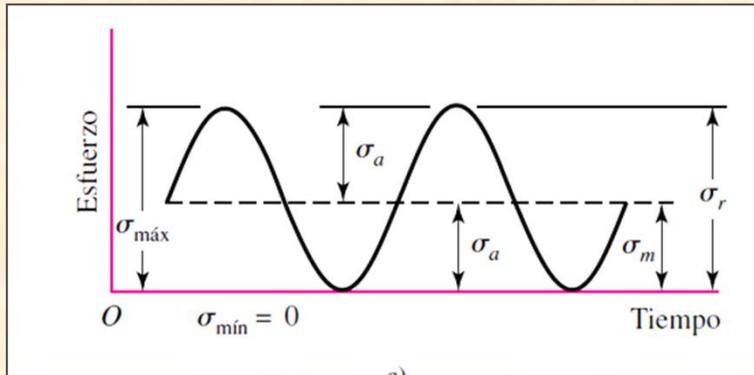
$$\sigma_m = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right|$$

Una consideración importante en el análisis de la fatiga es la cantidad relativa de esfuerzos de tracción y compresión que se mide por la relación R.

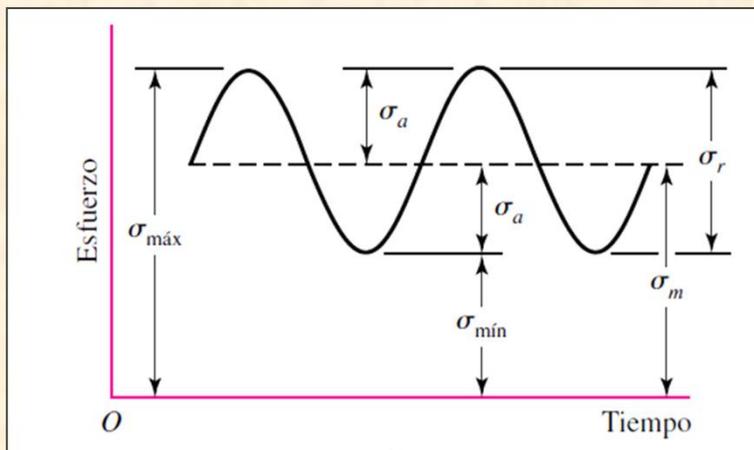
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$



Esfuerzo alternativo puro



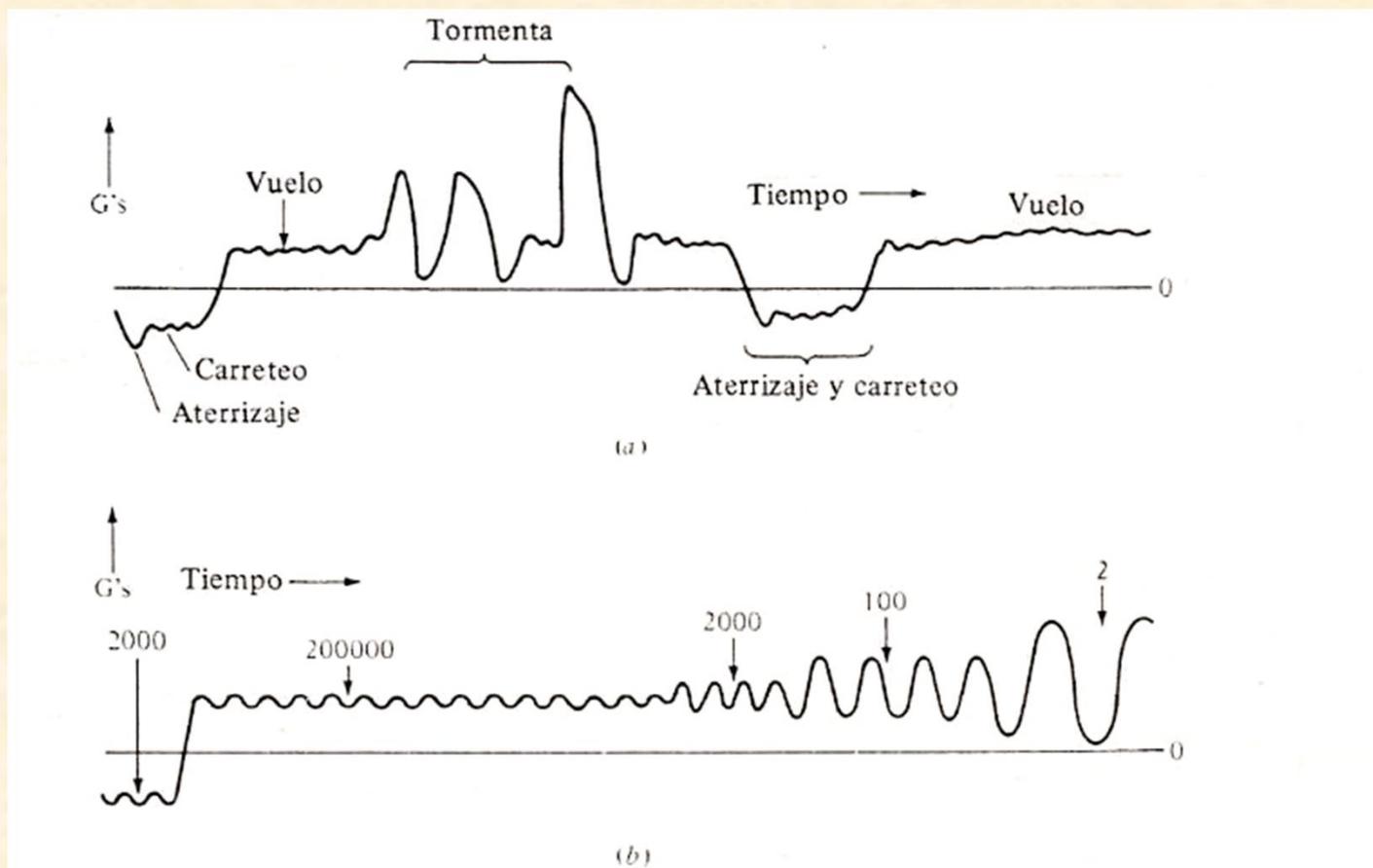
Esfuerzo pulsante puro



**Esfuerzo pulsante con tensión
mínima mayor que 0**

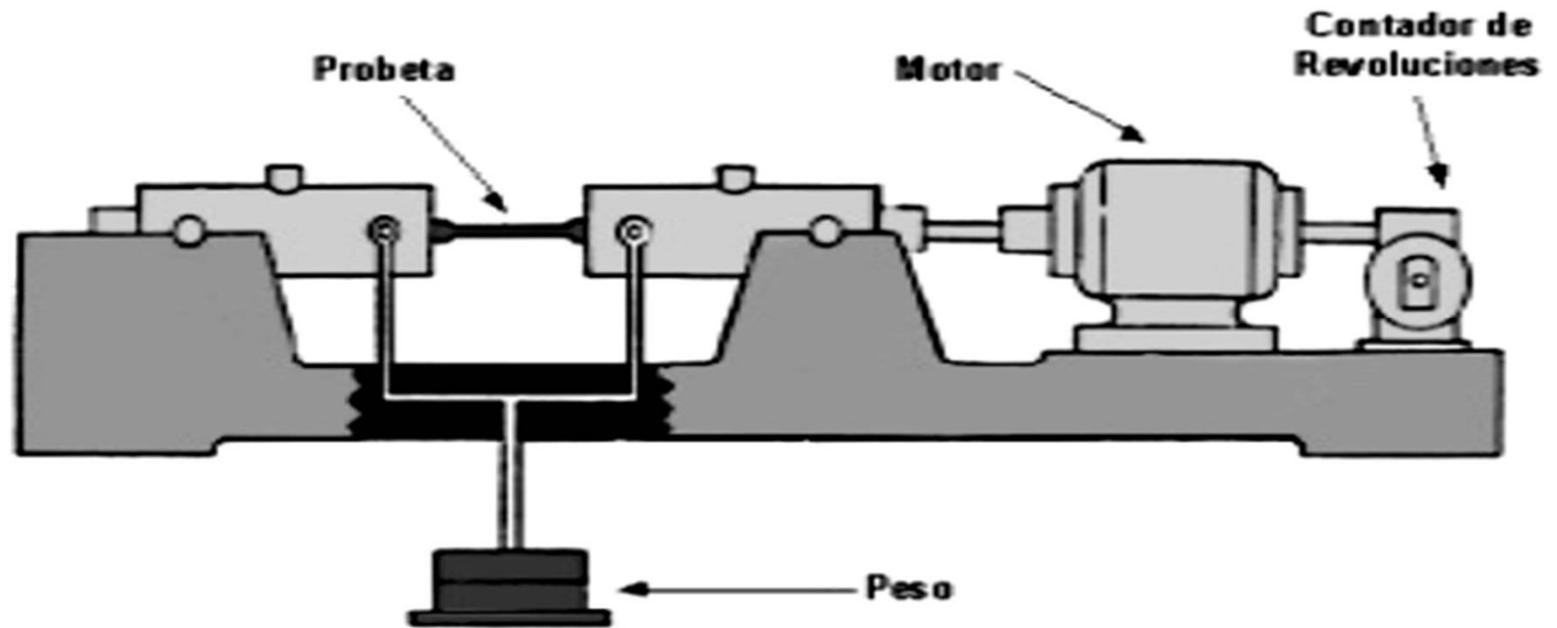
CARGAS DE AMPLITUD VARIABLE (ALEATORIA)

La probabilidad de que se repita la misma secuencia y magnitud de los intervalos del esfuerzo durante un lapso es muy pequeña, por eso son ALEATORIAS

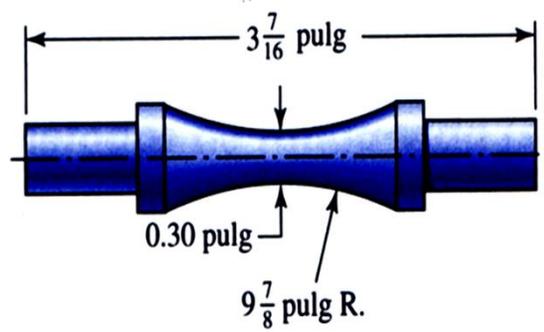


Representación gráfica de la carga de fatiga de amplitud variable y la carga simplificada para análisis

RESISTENCIA A LA FATIGA Y LIMITE DE FATIGA



Máquina de probeta rotatoria de Moore para ensayo a Fatiga



En esta máquina la muestra se somete a flexión pura (sin cortante transversal) mediante pesos. La pieza de prueba, como la que se muestra en la figura, se maquina y se pule con mucha meticulosidad, con un pulido final en una dirección axial para evitar rayaduras circunferenciales.

Se necesita un elevado número de ensayos por la propia naturaleza estadística de la fatiga.

El primer ensayo se hace con una tensión que es ligeramente inferior al límite de rotura por tracción del material. El segundo se realiza con una tensión un poco inferior. Se continua con este proceso y luego se grafican los resultados en un diagrama.

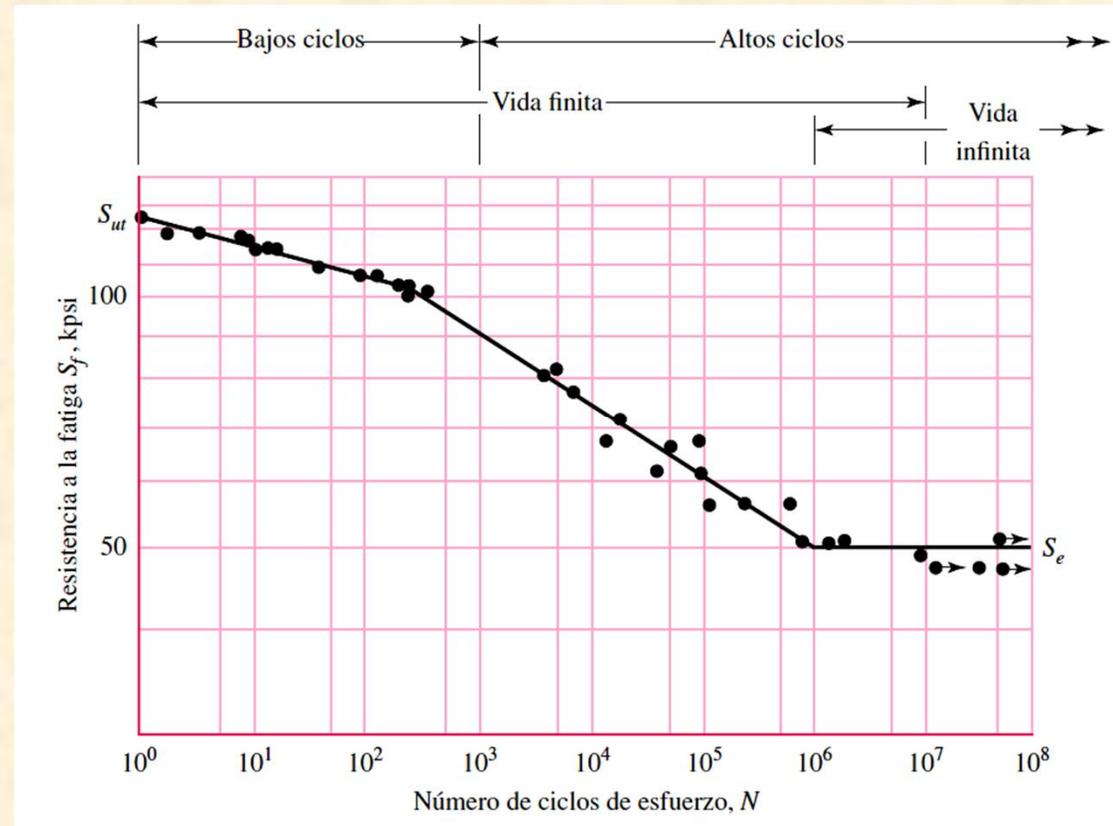
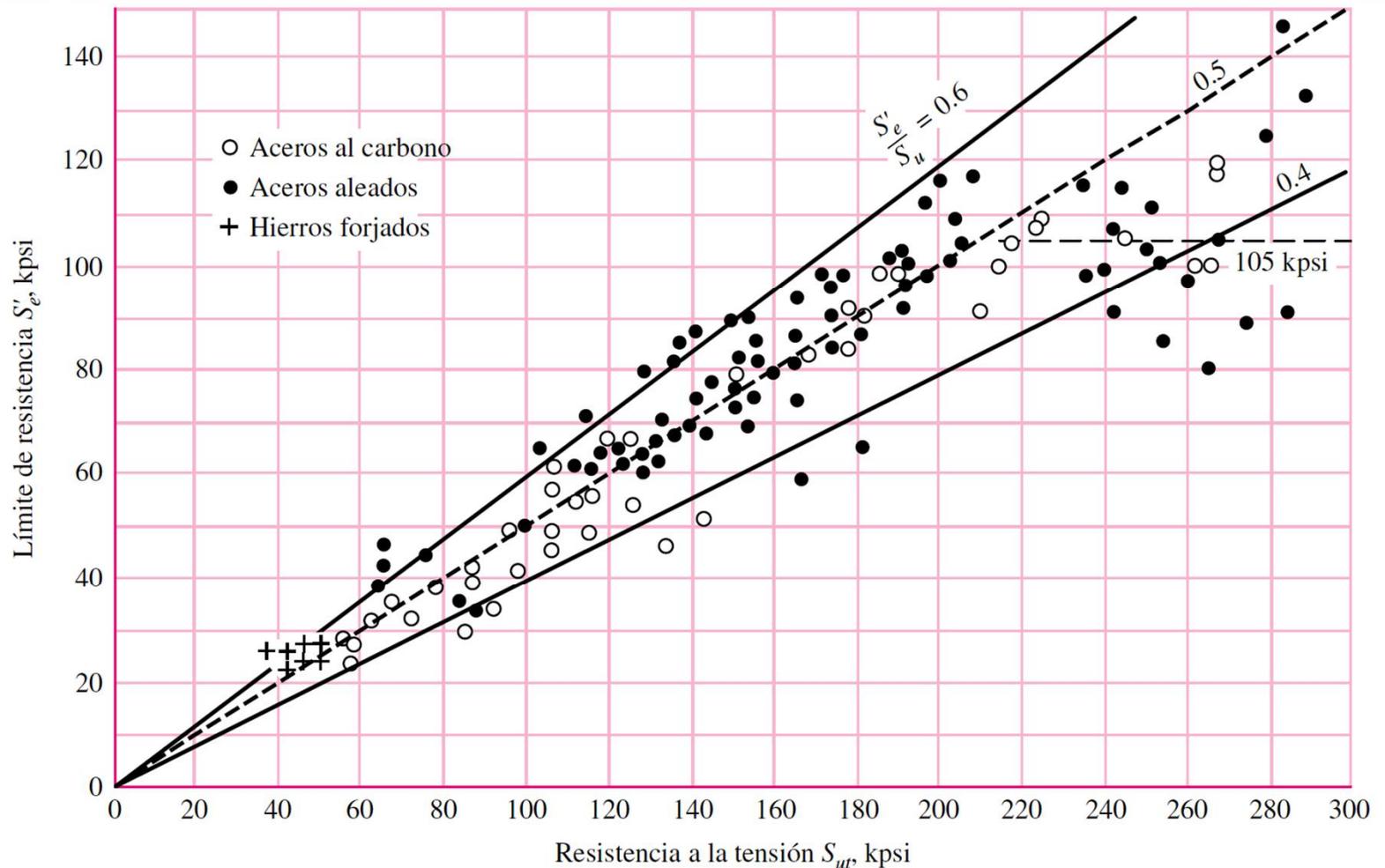


Diagrama S-N que se graficó a partir de los resultados de ensayos a la fatiga axial completamente invertido. Material: acero SAE 4130 normalizado. $S_{ut} = 116$ kpsi; $S_{ut} = 125$ kpsi. (fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica – Shigley ed 8va)

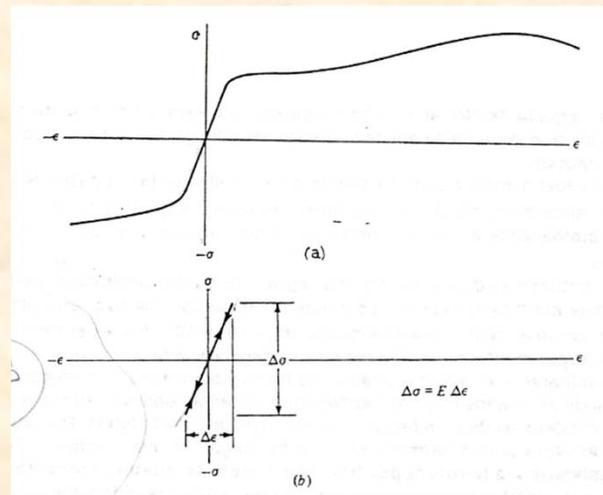
El límite de resistencia a la fatiga varía desde aproximadamente 40 hasta 60% de la resistencia a la tensión para aceros, y hasta alrededor de 210 kpsi (1450 MPa). Comenzando en alrededor de $S = 210$ kpsi (1450 MPa), la dispersión parece incrementarse.



LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

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

Una falla por fatiga casi siempre da comienzo en una discontinuidad, como un chavetero, rebaje, muesca, grieta u otra área de alta concentración de tensiones. Cuando el valor del esfuerzo en la discontinuidad excede al límite elástico del material se presenta la deformación plástica.



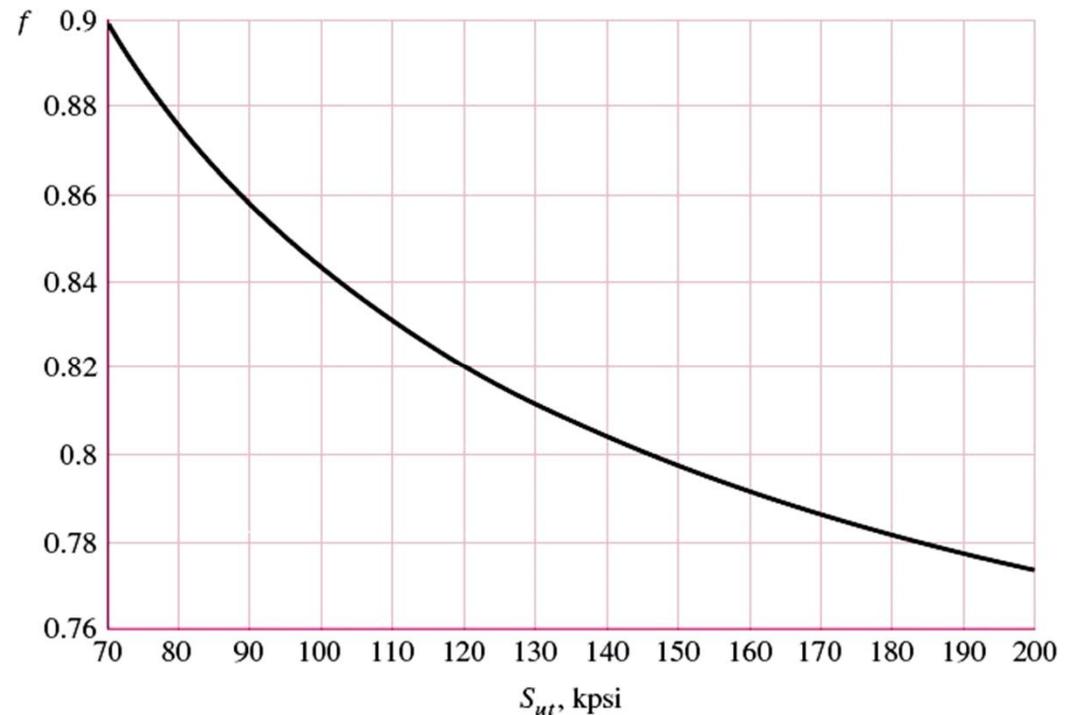
- a) Curva general esfuerzo-deformación unitaria
- b) Carga cíclica elástica.

Limite de resistencia a la fatiga para la probeta

Una región de fatiga de bajos ciclos se extiende desde $N = 1$ hasta casi 10^3 ciclos. En esta región la resistencia a la fatiga S_f sólo es un poco menor que la resistencia a la tensión S_{ut} . El punto inicial, es decir la ordenada al origen, corresponde a la resistencia última del material S_{ut} . Esta tensión corresponde a la rotura del material para el ensayo estático.

Cuando $N = 1000$ ciclos, la tensión límite de fatiga se determina como:

$$S_{f10^3} = S_{ut} \cdot f$$



Podemos calcular el límite de fatiga para cualquier valor entre 1 y 1000 ciclos con la siguiente ecuación:

$$\bullet S_{f1\dots 10^3} = S_{ut} \cdot N^{(\log f)/3}$$

Se puede calcular el límite de fatiga para cualquier valor entre 10^3 y 10^6 ciclos con la siguiente ecuación:

$$\bullet S_{f10^3\dots 10^6} = a \cdot N^b$$

$$\bullet a = \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S_e}$$

$$\bullet b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e} \right)$$

También, con un determinado esfuerzo aplicado completamente invertido a una probeta, podemos determinar cuantos ciclos podrá sobrevivir antes de manifestar signos de falla. Esta cantidad de ciclos la calculamos como:

$$\bullet N = \left(\frac{\sigma' a}{a} \right)^{1/b}$$

FACTORES QUE MODIFICAN EL LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

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

S_e : Límite de fatiga en el Elemento de Máquina

S'_e : Límite de fatiga en la probeta.

k_a : Factor de acabado superficial.

k_b : Factor de tamaño.

k_c : Factor de confiabilidad.

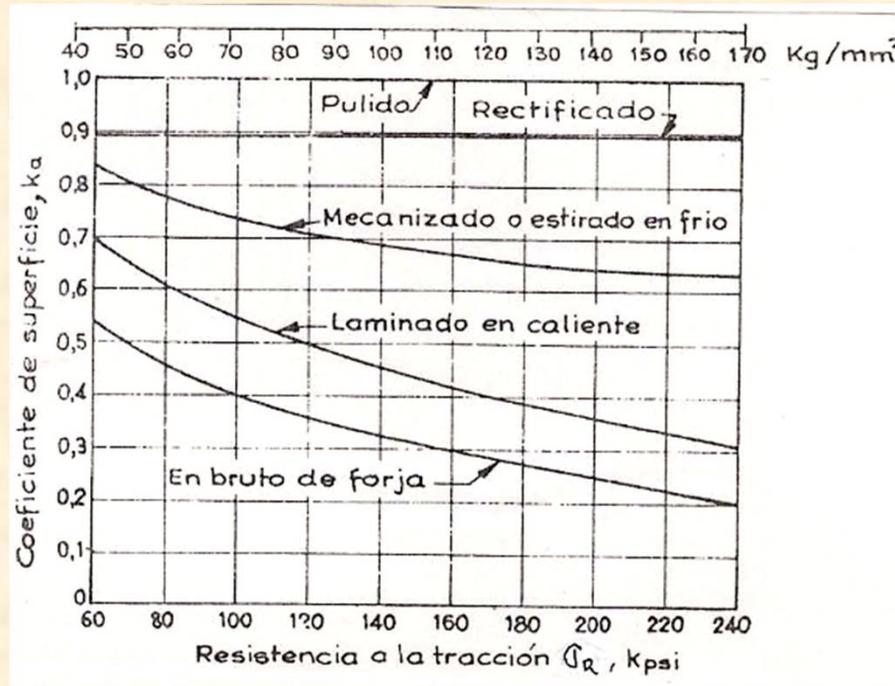
k_d : Factor de temperatura.

k_e : Factor modificativo por concentración de tensiones.

k_f : Factor de efectos diversos.

Factor de Superficie

El factor depende de la calidad del acabado y de la resistencia de rotura.



$$k_a = a \cdot (S_{ut})^b$$

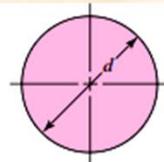
Terminación Superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} en kpsi	S_{ut} en MPa	
Rectificado	1,34	1,58	-0,085
Mecanizado o laminado en frío	2,70	4,51	-0,265
Laminado en caliente	14,4	57,7	-0,718
Forjado (en bruto)	39,9	272	-0,995

Factor de Tamaño

Los resultados para flexión y torsión para ejes cilíndricos, rotatorios:

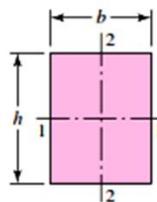
$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Cuando se utiliza una sección no circular, se emplea una dimensión efectiva



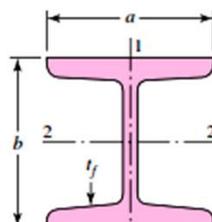
$$A_{0.95\sigma} = 0.01046d^2$$

$$d_e = 0.370d$$



$$A_{0.95\sigma} = 0.05hb$$

$$d_e = 0.808\sqrt{hb}$$



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

Factor de Confiabilidad

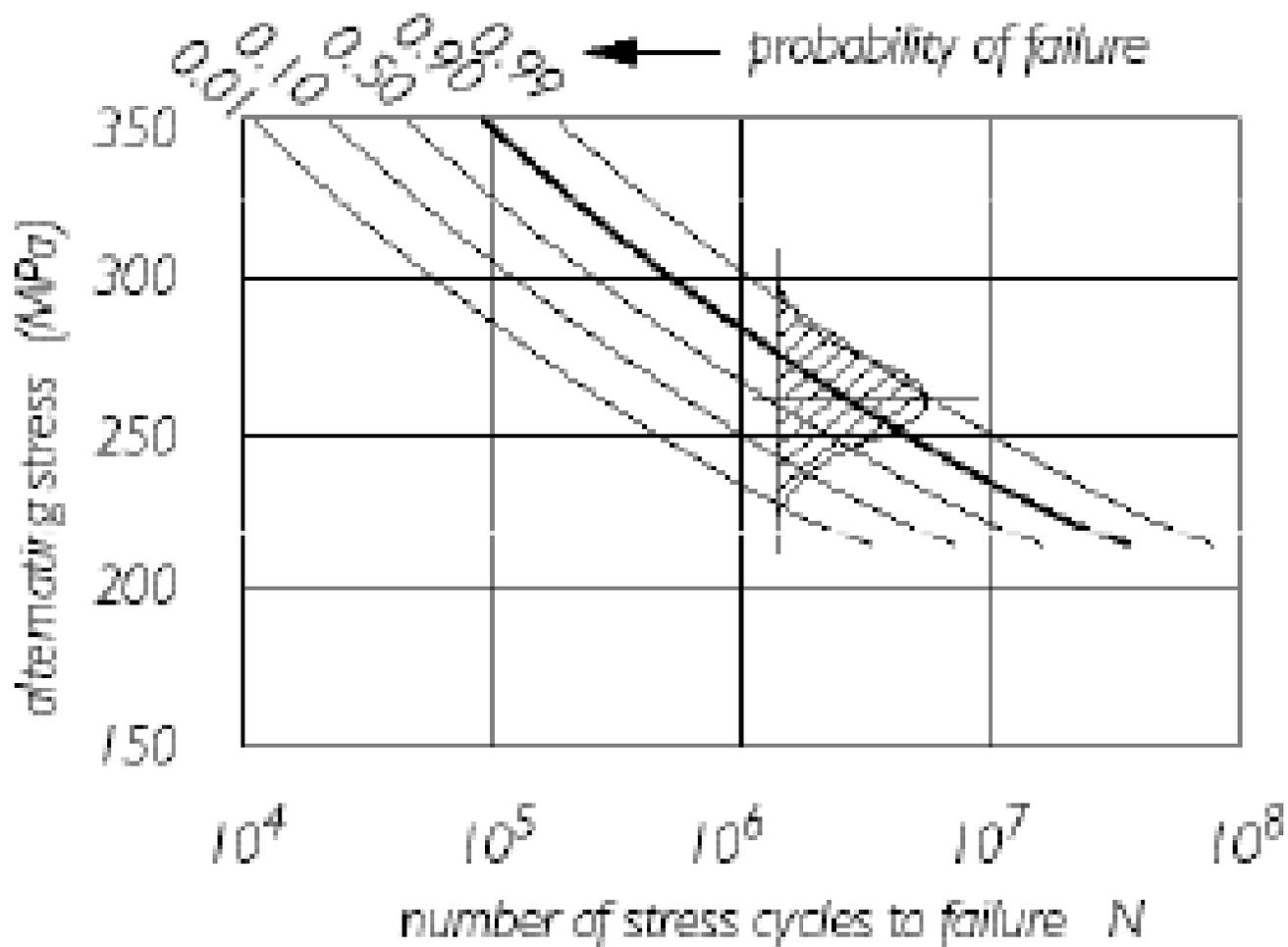
Aún bajo condiciones de prueba bien controladas, las inevitables variaciones en la preparación de las probetas, ocasionarán que los resultados obtenidos en las pruebas para determinar el límite de resistencia a la fatiga varíen.

$$K_c = 1 - 0,08 D$$

D: variable estandarizada (factor de multiplicación de la desviación).

FACTORES DE CONFIABILIDAD k_c , CORRESPONDIENTES A UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE 8% DEL LÍMITE DE FATIGA

Confiabilidad R	Variable estandarizada D	Factor de confiabilidad k_c
0.50	0	1.000
0.90	1.288	0.897
0.95	1.645	0.868
0.99	2.326	0.814
0.999	3.091	0.753
0.999 9	3.719	0.702
0.999 99	4.265	0.659
0.999 999	4.753	0.620
0.999 999 9	5.199	0.584
0.999 999 99	5.612	0.551
0.999 999 999	5.997	0.520



Factor de Carga

Los ensayos sobre probetas en laboratorio se hacen sobre una probeta rotatoria, con cargas de flexión repetida invertida. Para otros casos, deben aplicarse los siguientes factores:

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

Los coeficientes anteriores se usan únicamente cuando están presentes esfuerzos puros (cuando solo hay un esfuerzo aplicado). Si se presentan esfuerzos combinados, dichos coeficientes son contemplados en la ecuación de Von Mises, por lo tanto:

$$\bullet k_c = 1$$

Factor de temperatura

La temperatura cambia todas las propiedades mecánicas de un material y la existencia de un esfuerzo induce a un flujo plástico en el material

$$K_d = \begin{cases} 1,0 & T \leq 450 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (840 }^\circ\text{F)} \\ 1 - 5,8 (10)^{-3} (T - 450) & 450 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 550 \text{ }^\circ\text{C} \\ 1 - 3,2 (10)^{-3} (T - 840) & 840 \text{ }^\circ\text{F} < T \leq 1020 \text{ }^\circ\text{F} \end{cases}$$

Temperatura °C	kd
20	1
50	1,01
100	1,02
150	1,025
200	1,02
250	1
300	0,975
350	0,943
400	0,9
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549

Factor de efectos diversos

CORROSIÓN: Disminuye la resistencia a la fatiga. Se debe al desbastado o picadura de la superficie causado por el material corrosivo.

Al paso del tiempo cualquier parte fallará cuando se someta a esfuerzos repetidos en una atmosfera corrosiva.

RECUBRIMIENTO ELECTROLITICO: Disminuye la resistencia a la fatiga hasta en un 50%.

METALIZADO: Provoca imperfecciones superficiales que pueden iniciar grietas.

CORROSIÓN POR FROTAMIENTO: Están las uniones por tornillo, los ajustes de las pistas de los cojinetes, las masas de ruedas. El proceso genera decoloración superficial picaduras y finalmente fatiga.

Factor de concentración del esfuerzo

La existencia de irregularidades, discontinuidades como orificios, ranuras o muescas incrementa los esfuerzos teóricos en la proximidad de la discontinuidad. Cualquier discontinuidad en una parte de la máquina altera la distribución del esfuerzo. A estas discontinuidades se las denomina intensificadores del esfuerzo, mientras que a las regiones en las cuales se producen se les llama **áreas de concentración del esfuerzo**.

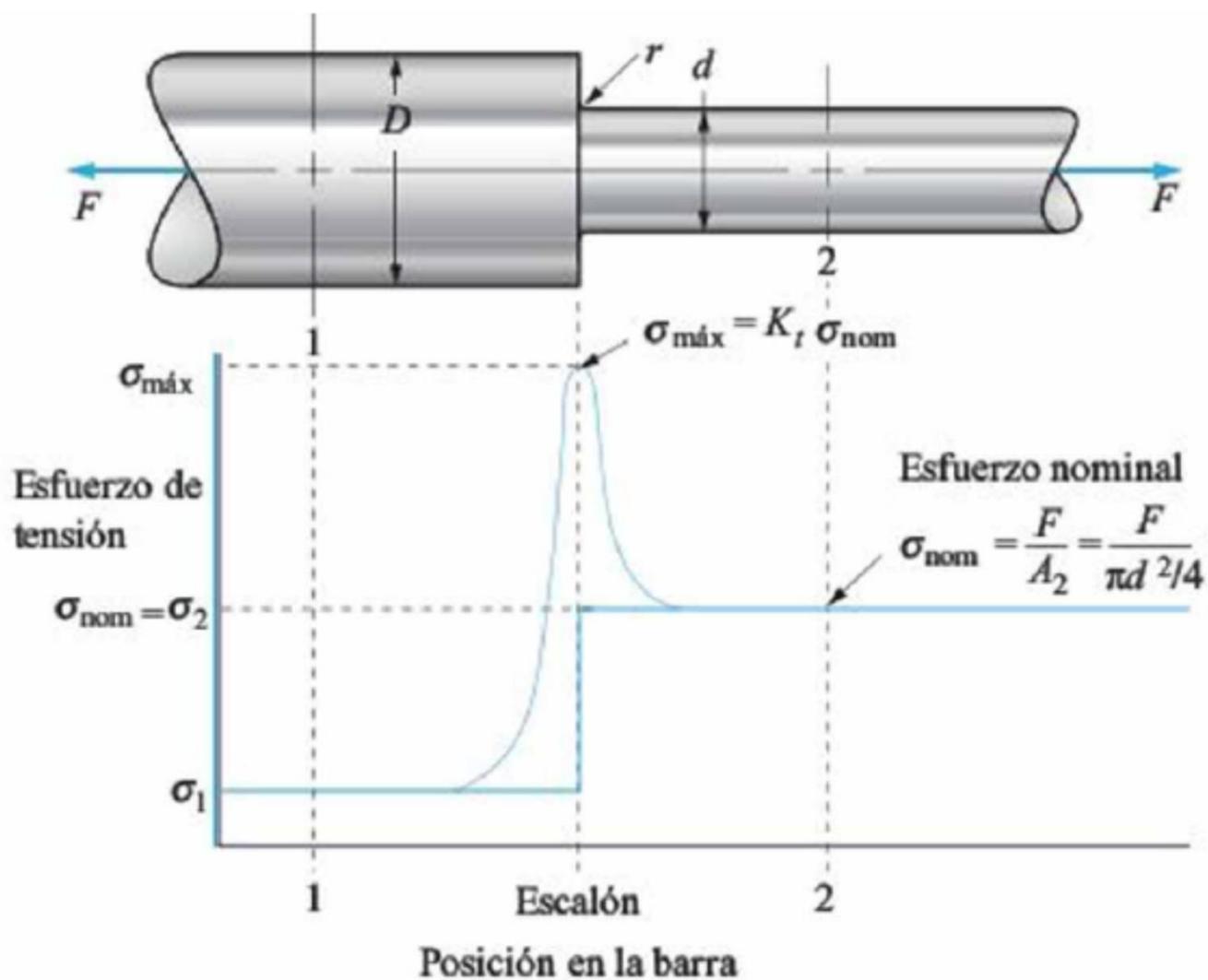
Se emplea un factor teórico o geométrico de la concentración de esfuerzos K_t

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \quad K_{ts} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_0}$$

Para fatiga:

$$\sigma_{\max} = K_f \sigma_0 \quad \text{OR} \quad \tau_{\max} = K_{fs} \tau_0$$

Ejemplo de la influencia de un cambio de diámetro en una pieza cilíndrica sometida a tracción.



(fuente: Resistencia de Materiales – Mott - 5ta edición)

Esfuerzo máximo en la pieza de prueba con muesca

$$K_f = \frac{\text{Esfuerzo máximo en la pieza de prueba con muesca}}{\text{Esfuerzo en la pieza de prueba sin muesca}}$$

La sensibilidad a la muesca está definida por:

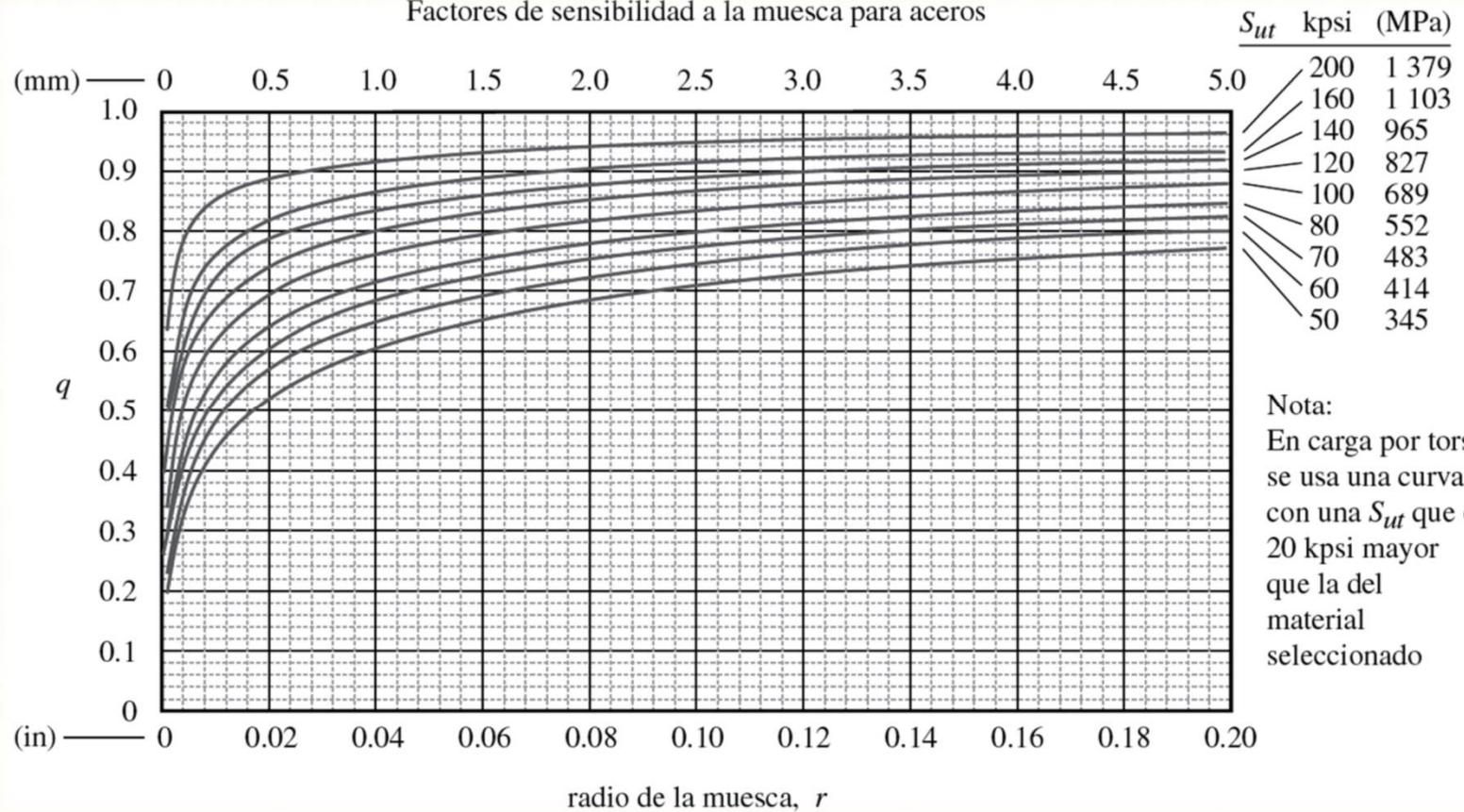
$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

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

En el trabajo de diseño, primero se calcula K_t teniendo en cuenta la geometría de la parte, luego se encuentra q y se despeja K_f .

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad \text{or} \quad K_{fs} = 1 + q_{\text{shear}}(K_{ts} - 1)$$

Factores de sensibilidad a la muesca para aceros



Esfuerzos Combinados

Cuando las piezas están sometidas a esfuerzos combinados, caso muy típico de arboles y ejes, se deben combinar los esfuerzos para obtener una tensión combinada. Para esto hacemos uso del análisis de la energía de la máxima distorsión de Von Misses (ver Diseño en Ingeniería Mecánica – Shigley ed 8va – capítulo 5.5 Teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles). Esta teoría combina los esfuerzos normales y esfuerzos cortantes de la siguiente manera:

$$\bullet \sigma_{combinado} = \sqrt{[\sigma]^2 + 3 \cdot [\tau]^2}$$

Aplicando la teoría de Von Misses a análisis de cargas alternantes y medias, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\bullet \sigma'_a = \sqrt{\left[\left(K_f \cdot \sigma_{a(flexion)} \right) + \left(K_f \cdot \frac{\sigma_{a(axial)}}{0,85} \right) \right]^2 + 3 \cdot \left[\left(K_{fs} \cdot \tau_{a(torsion)} \right) \right]^2}$$

$$\bullet \sigma'_m = \sqrt{\left[\left(K_f \cdot \sigma_{m(flexion)} \right) + \left(K_f \cdot \sigma_{m(axial)} \right) \right]^2 + 3 \cdot \left[\left(K_{fs} \cdot \tau_{m(torsion)} \right) \right]^2}$$

Verificación de los esfuerzos de fatiga aplicados a una pieza

Con toda la información podremos realizar una verificación para comprobar que el elemento de maquina estudiado no fallará ante esfuerzos de fatiga. Resumimos la información:

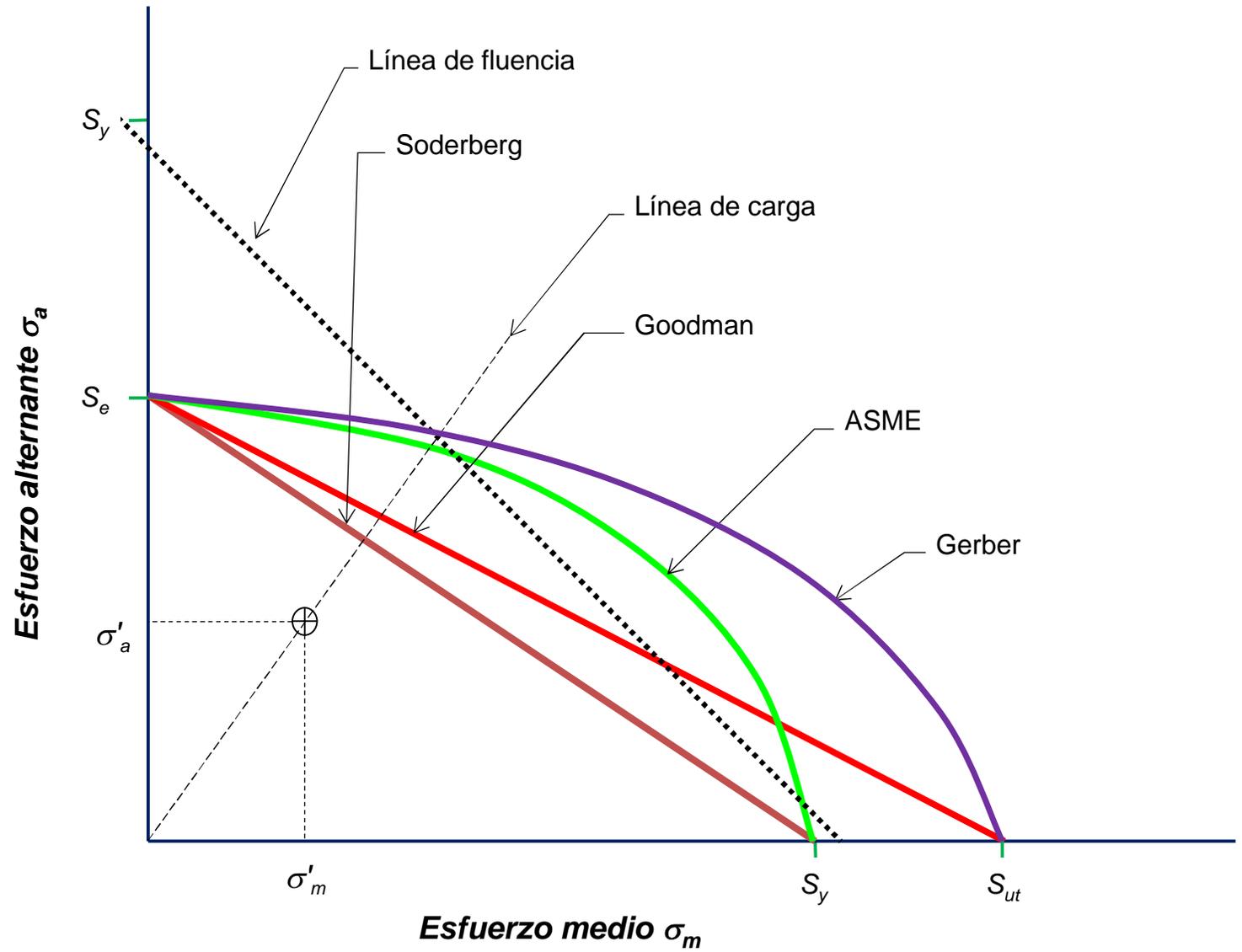
- Limite de fatiga para la pieza S_e
- Limite de fluencia y rotura del material de la pieza S_y y S_{ut}
- Factores de concentración de tensiones a la fatiga K_f y K_{fs}
- Esfuerzos de flexión, axiales y torsionales (medio y alternantes) s'_a y s'_m

Existen 5 criterios utilizados para verificar un elemento de maquina cuando esta sometido a esfuerzos de fatiga. Estos criterios se denominan: Soderberg, Goodman, ASME Eliptica, Gerber y fluencia. A continuación se mencionan las formulas y luego la grafica que se construye.

Se define como n al factor de seguridad contra la falla por fatiga, y como subíndice se señala el criterio usado:

Cátedra:
MECÁNICA APLICADA-
MECÁNICA Y
MECANISMOS

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



DAÑO POR FATIGA ACUMULADA

El daño causado por la aplicación de esfuerzos cíclicos, se acumula por la adición de cada período en que actúen dichos esfuerzos.

El concepto es que el material cambia después del daño acumulado por los esfuerzos cíclicos y exhibe una curva distinta.

Se han planteado muchas teorías acerca del daño acumulado.

TEORIA DE PALMGREN-MINER

Esta teoría afirma que la fracción de daño a cualquier nivel de esfuerzo, es linealmente proporcional a la razón entre los números de ciclos de operación y el número total de ciclos que ocasionaría la falla a ese nivel de esfuerzo.

La falla ocurrirá siempre que:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = C$$

n: Número de ciclos de esfuerzo aplicados

N: vida o duración correspondiente a ese nivel de esfuerzo.

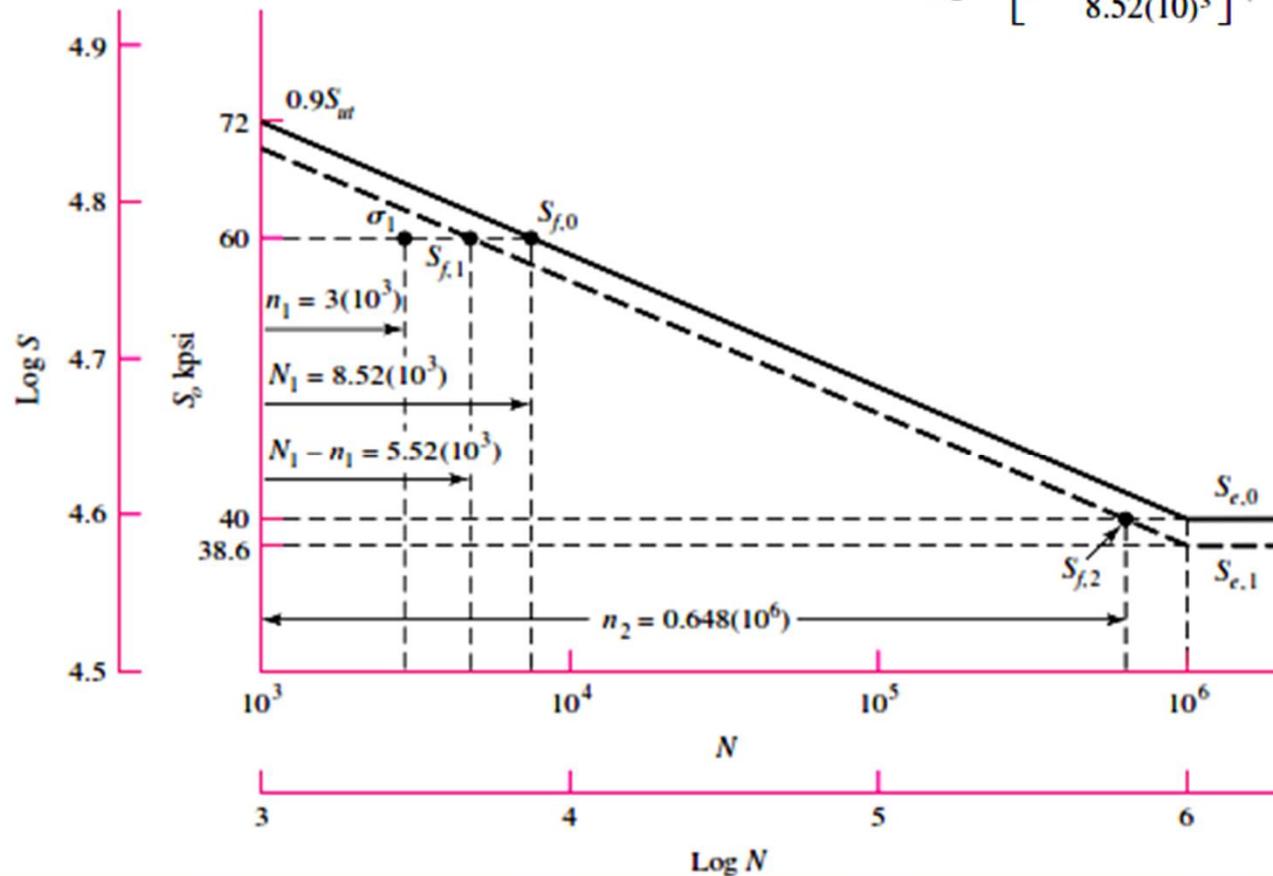
C: Constante obtenida por experimentos.

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = 1$$

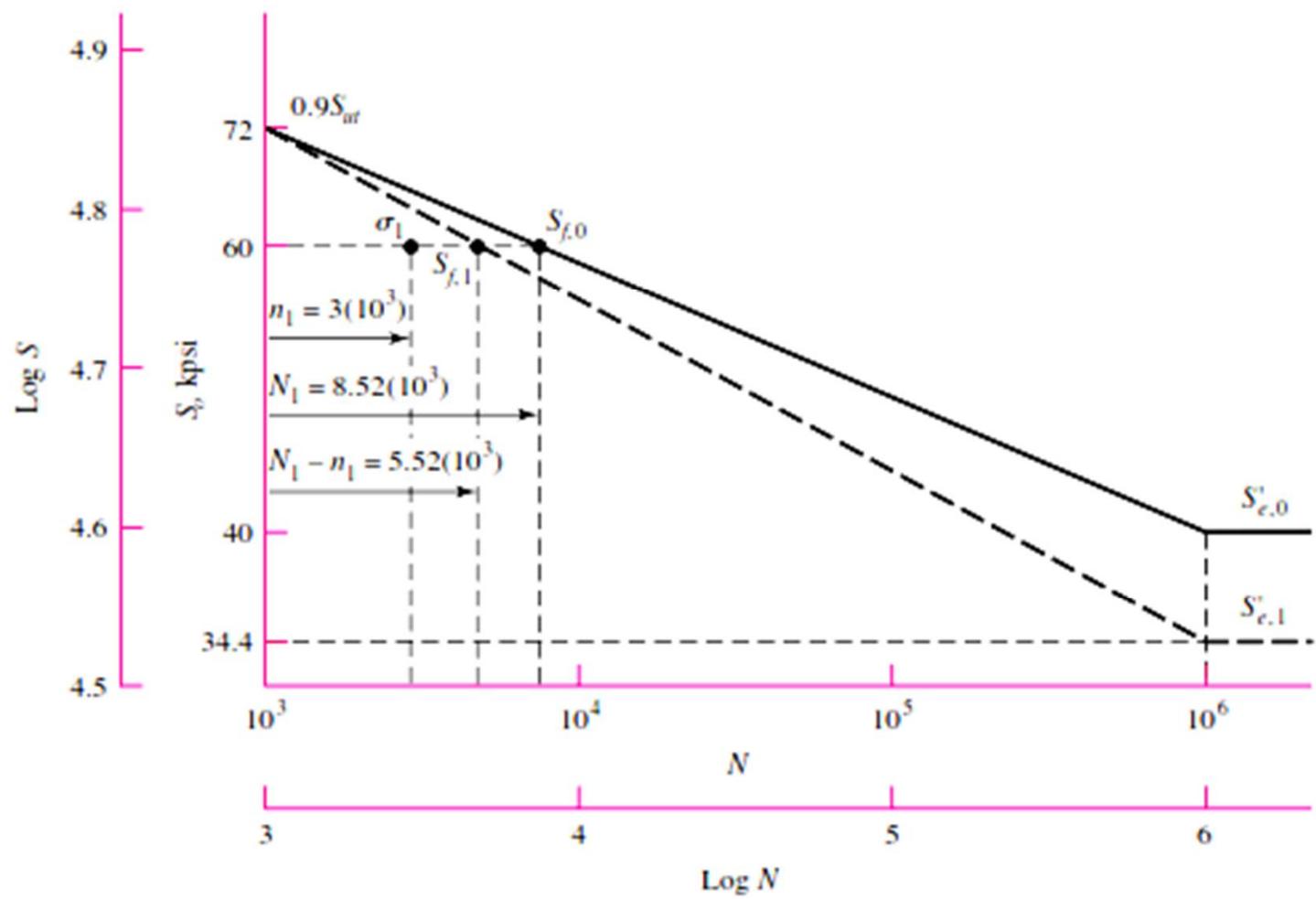
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1$$

$$n_2 = \left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right) N_2$$

$$n_2 = \left[1 - \frac{3(10^3)}{8.52(10^3)}\right] (10^6) = 0.648(10^6) \text{ cycles}$$



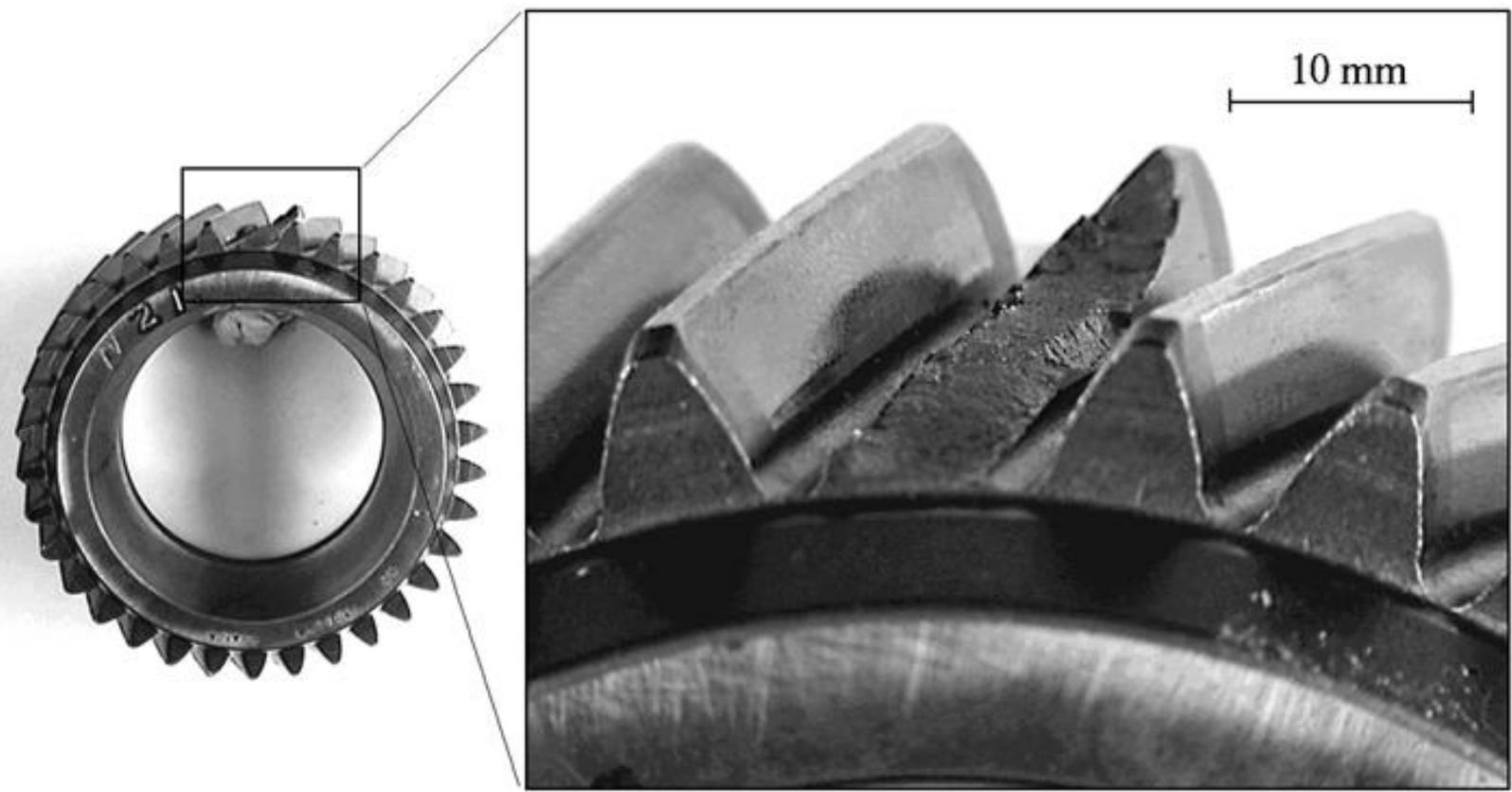
TEORIA DE MANSON



RECOMENDACIONES

- Reducir/eliminar cargas cíclicas.
- Reducir operaciones-usar velocidades de rotación más bajas, reemplazar piezas de forma regular.
- Seleccionar materiales tolerantes a cargas cíclicas.
- Reducir/eliminar concentraciones de esfuerzos severas- No permitir esquinas vivas o cambios de sección bruscos.
- Especificar procesos de fabricación que den resistencia a la fatiga- trabajo en frío, granallado.
- Especificar tratamientos térmicos que aumenten la resistencia a la fatiga- nitruración, carburización.
- Sobredimensionar las piezas para reducir niveles de tensión.
- Precargas las piezas para convertir cargas cíclicas en cargas permanentes.

Cátedra:
**MECÁNICA APLICADA-
MECÁNICA Y
MECANISMOS**



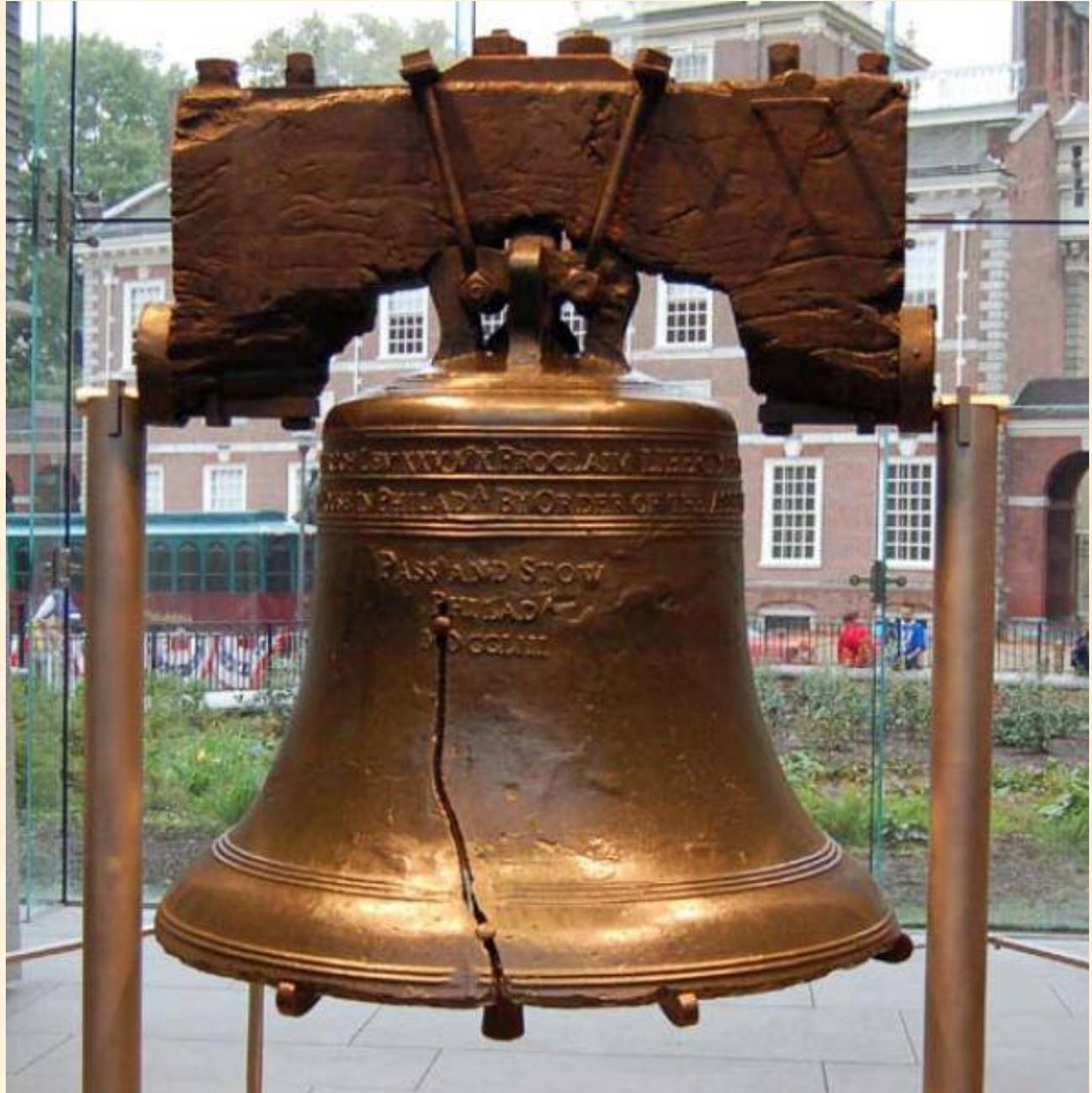


UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Cátedra:
**MECÁNICA APLICADA-
MECÁNICA Y
MECANISMOS**

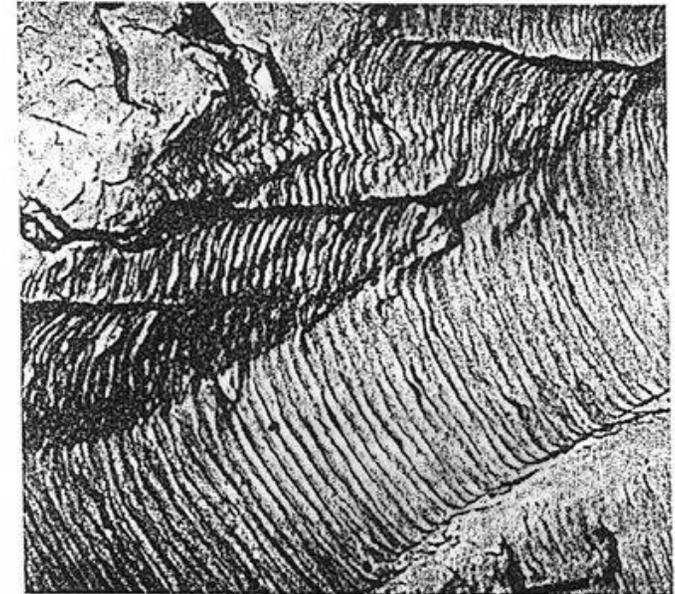
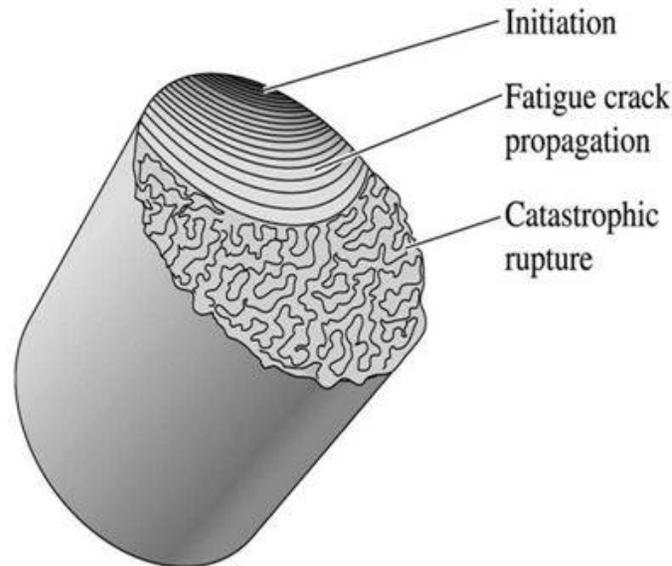
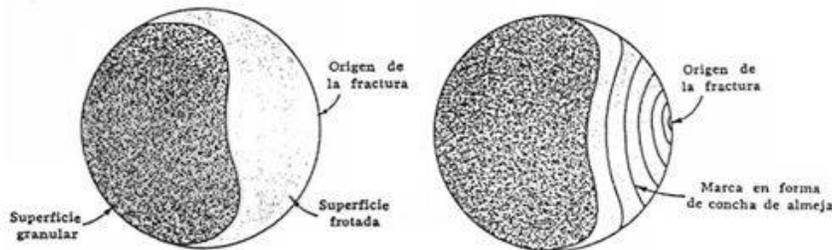


Ing. Carlos Barrera

17:46



Superficie de Fractura por Fatiga (I)



Fractografía TEM
mostrando *estriás de fatiga* en el Al.

BIBLIOGRAFÍA

Diseño en Ingeniería Mecánica
Diseño en Elementos de Máquinas

Shigley
Mott