



DISEÑO MECÁNICO

INGENIERÍA EJECUCIÓN MECÁNICA

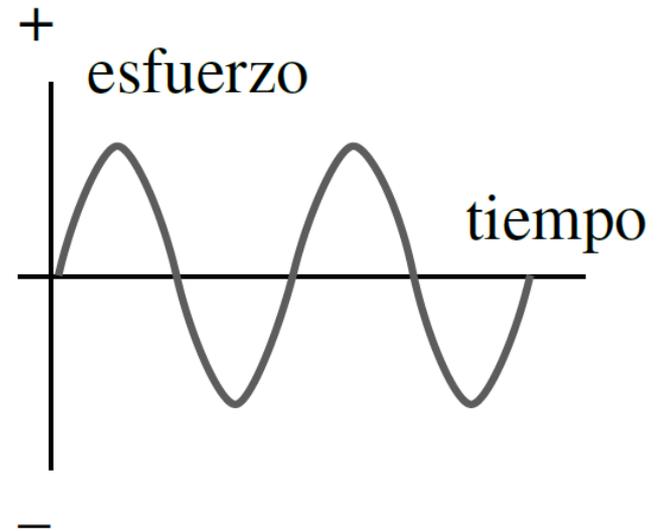
TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

INTRODUCCIÓN

- La mayoría de las fallas en las máquinas son consecuencia de cargas que **varían con el tiempo** en lugar de cargas estáticas.
- Tales fallas ocurren normalmente a niveles de esfuerzos **significativamente menores** que las resistencias a la fluencia de los materiales.
- Utilizar sólo las teorías de falla estática puede llevar a **diseños inseguros** en presencia de cargas dinámicas.

El ingeniero alemán August Wohler efectuó la primera investigación científica (durante un periodo de 12 años) sobre lo que se conoce como ***falla por fatiga***, haciendo fallar ejes en el laboratorio sujetos a ciclos de carga invertida.

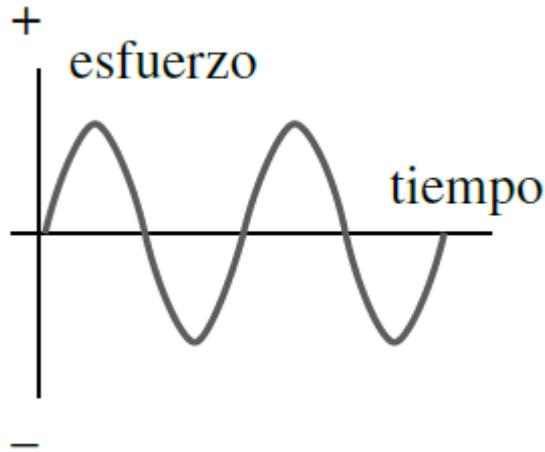


(a) Ciclo de carga invertida

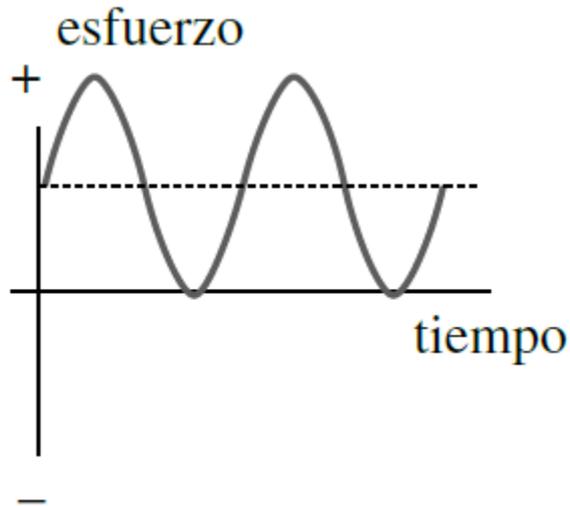
TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

INTRODUCCIÓN

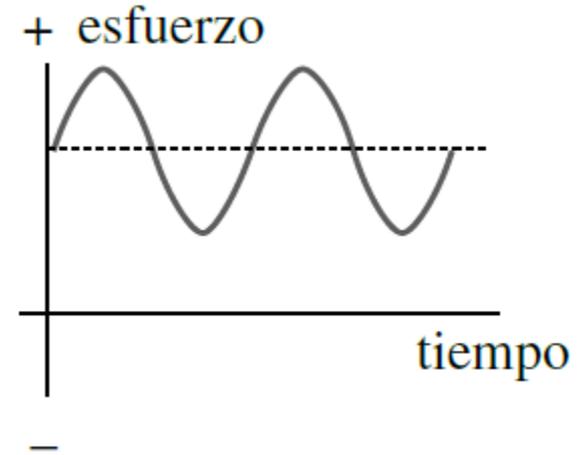
Esfuerzos variables con el tiempo



Carga invertida



Carga repetida



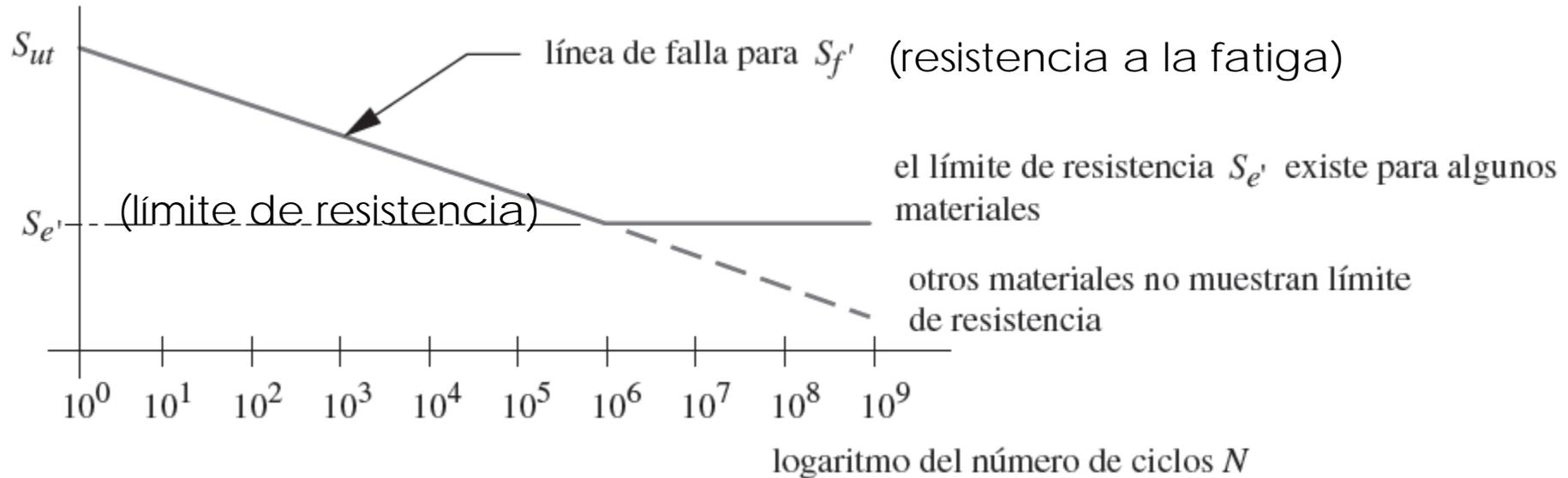
Carga fluctuante

Wohler publicó sus descubrimientos en 1870; en ellos identificaba el **número de ciclos** de esfuerzos variables con el tiempo como el responsable; además, descubrió la existencia de un **límite de resistencia** para los aceros, es decir, un nivel de esfuerzo que sería tolerable para millones de ciclos de carga invertida.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

INTRODUCCIÓN

Diagrama de resistencia-vida de Wohler o diagrama S-N



El diagrama de Wohler se convirtió en el estándar para representar el comportamiento de materiales sometidos a ciclos de carga completamente invertida.

Todavía está en uso, aun cuando en la actualidad existen también otras medidas de la resistencia de materiales sujetos a cargas dinámicas.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

MECANISMO DE FALLA POR FATIGA

- Las fallas por fatiga comienzan siempre como **una grieta**, la cual quizás haya estado presente en el material desde su manufactura, o tal vez se desarrolló con el paso del tiempo debido a la deformación cíclica alrededor de las **concentraciones de esfuerzos**.
- Las grietas por fatiga por lo general inician como una **muesca** u otro concentrador de esfuerzos.



Las fallas del avión *Comet* se iniciaron en grietas menores de 0.07 pulgadas de largo, cerca de las esquinas de ventanas que eran casi cuadradas, provocando así altas concentraciones de esfuerzos.

MÉTODOS DE FATIGA-VIDA

Se utilizan tres enfoques principales del diseño y el análisis, para predecir cuándo, si alguna vez sucede, un componente de máquina cargado en forma cíclica fallará por fatiga durante un determinado periodo de tiempo.

Con éstos métodos se intenta predecir la vida en número de ciclos (N) hasta la falla para un nivel específico de carga.

Por lo general la vida de $1 < N < 10^3$ ciclos se considera como *fatiga de bajo ciclaje*, mientras que la *fatiga de alto ciclaje* se considera que ocurre para $N > 10^3$ ciclos.

Los tres métodos que actualmente se utilizan son:

- Método de esfuerzo-vida (S-N).
- Método deformación-vida (ϵ -N).
- Método de la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM).

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

MODELOS DE FALLA POR FATIGA

MÉTODO DE ESFUERZO-VIDA

- Este método, que se basa sólo en niveles de esfuerzo, es el enfoque menos exacto, especialmente para aplicaciones de bajo ciclaje.
- Es el método más tradicional, puesto que es el más fácil de implementar para una amplia variedad de aplicaciones de diseño.
- Tiene una gran cantidad de datos de soporte y representa de manera adecuada las aplicaciones de alto ciclaje.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

MODELOS DE FALLA POR FATIGA

MÉTODO DE DEFORMACIÓN-VIDA

- Este método implica un análisis más detallado de la deformación plástica en regiones localizadas donde se considera a los esfuerzos y deformaciones para la estimación de la vida.
- Es especialmente bueno para aplicaciones con fatiga de bajo ciclaje.
- Este método asume algunas idealizaciones, que introducen incertidumbres en los resultados.

MÉTODO DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA

- Se supone que ya existe una grieta y que ésta se ha detectado.
- Se emplea para predecir el crecimiento de la grieta con respecto a la intensidad del esfuerzo.
- Es más práctico cuando se aplica a estructuras grandes junto con códigos de computadora y un programa de inspección periódica.

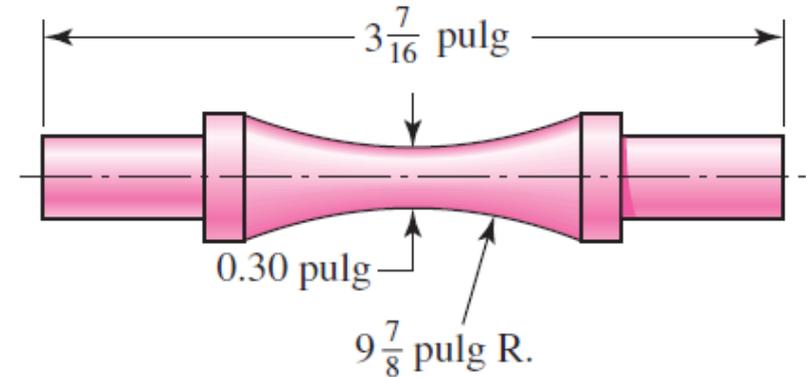
TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

MODELOS DE FALLA POR FATIGA

MÉTODO DE ESFUERZO -VIDA

El diagrama de resistencia-vida (S-N) proporciona la resistencia a la fatiga S_f contra el ciclo de vida N de un material.

Los resultados se generan a partir de ensayos (por ejemplo: viga rotativa) en los que se emplea una carga simple en piezas de prueba de laboratorios estándar controladas.



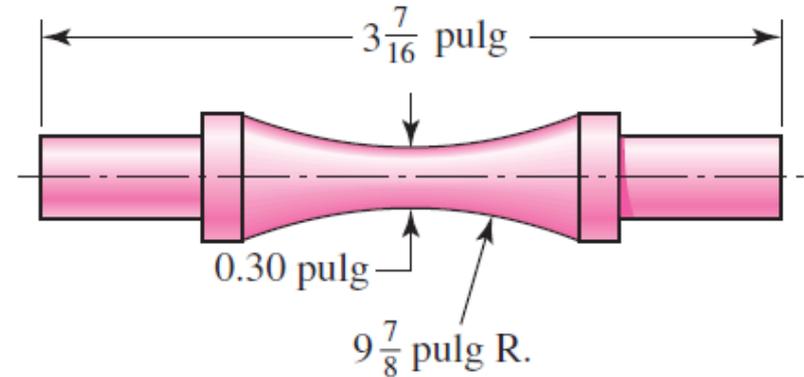
TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

MODELOS DE FALLA POR FATIGA

MÉTODO DE ESFUERZO -VIDA

A menudo, la carga es de flexión pura invertida en forma sinusoidal.

Las piezas de laboratorio controladas se pulen sin concentración de esfuerzo geométrico en la región de área mínima.



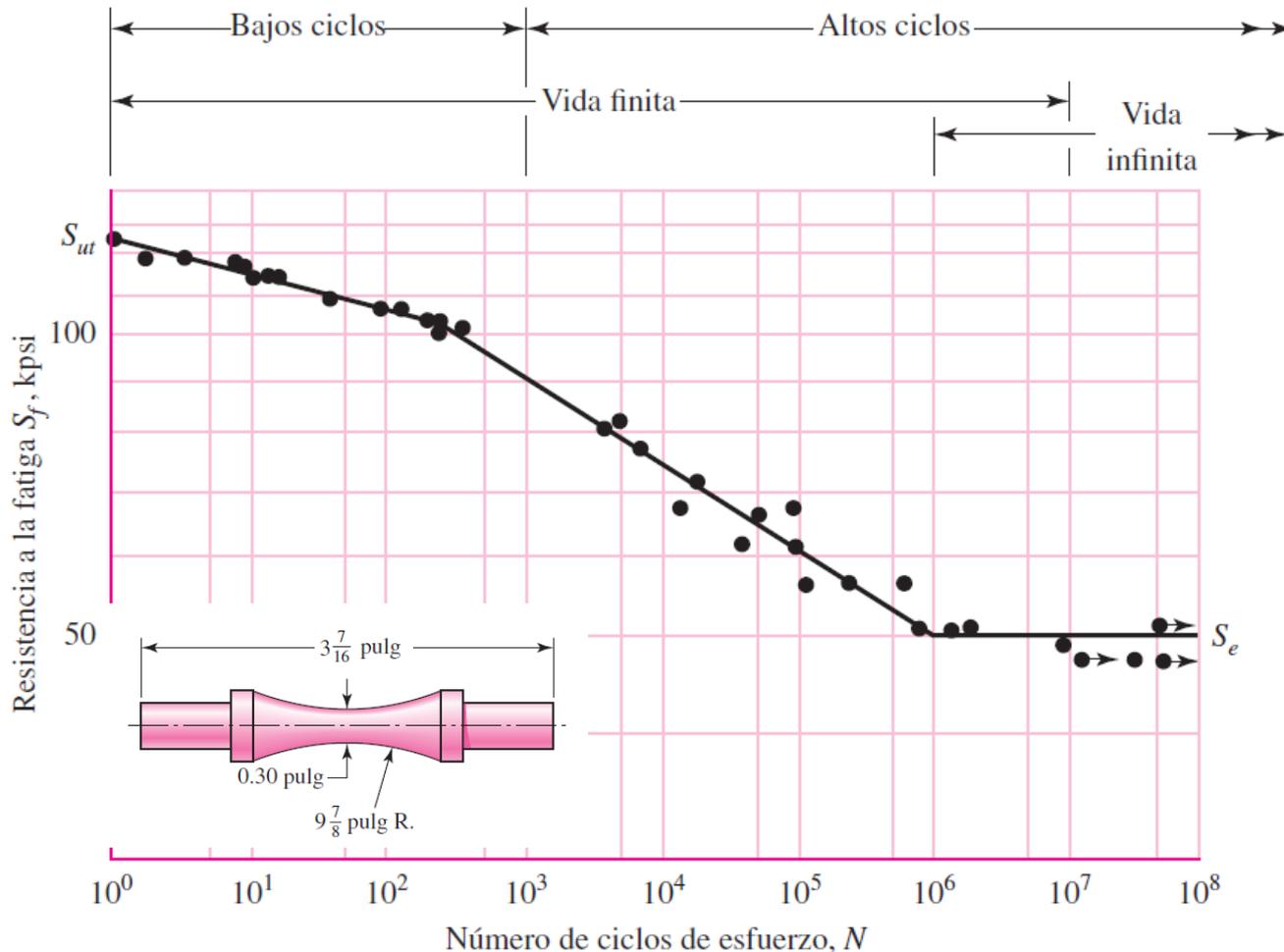
En el caso del acero y el hierro, el diagrama S-N se hace horizontal en algún punto:

- La resistencia en este punto se llama límite de resistencia a la fatiga S'_e y ocurre en algún lugar entre 10^6 y 10^7 ciclos.
- La marca de prima en S'_e se refiere al límite de resistencia a la fatiga de la pieza de laboratorio controlada.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

MODELOS DE FALLA POR FATIGA

MÉTODO DE ESFUERZO -VIDA



La ordenada del diagrama S-N se llama *resistencia a la fatiga* S_f , cuyo enunciado siempre se debe acompañar por su número de ciclos correspondiente N .

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

MODELOS DE FALLA POR FATIGA

MÉTODO DE ESFUERZO -VIDA

En el caso de materiales no ferrosos (por ejemplo: aluminio) que no presentan un límite de resistencia a la fatiga, puede proporcionarse una resistencia a la fatiga a un número específico de ciclos, $S'f$.

La prima denota la resistencia a la fatiga de la pieza de laboratorio controlada.

Los datos de resistencia se basan en muchas condiciones controladas que no serán las mismas que para una parte de máquina real.

En la práctica, se usan factores de corrección para tomar en cuenta las diferencias entre la carga y las condiciones físicas de la probeta y la parte de máquina real.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

En la actualidad, determinar los límites de resistencia mediante ensayos a la fatiga es una rutina, aunque resulta un procedimiento extenso.

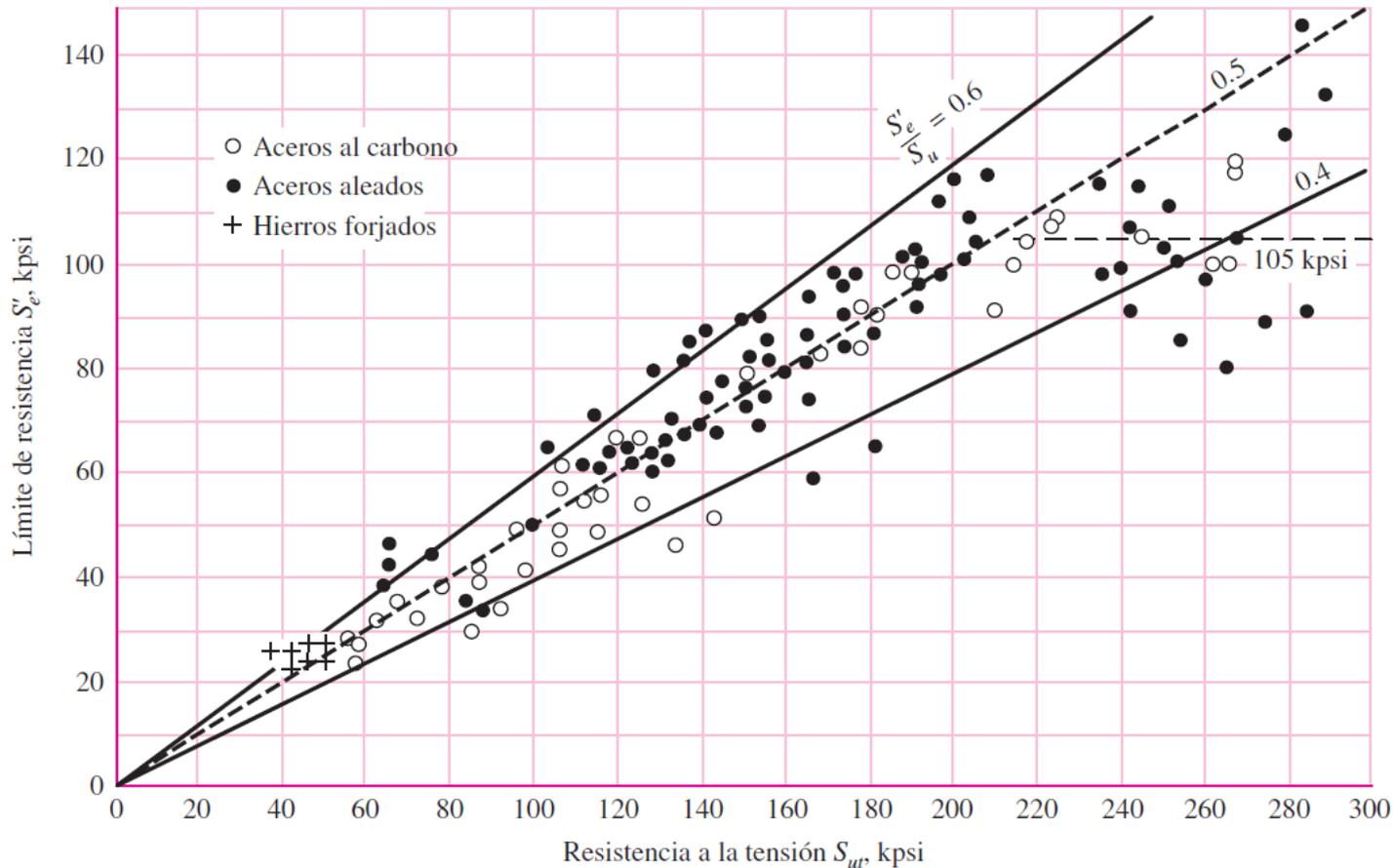
Para el diseño preliminar y de prototipos, así como para algunos análisis de falla, se requiere un método rápido para estimar los límites de resistencia.

Existen grandes cantidades de datos en la literatura técnica sobre los resultados de ensayos con viga rotativa y de ensayos a la tensión simple de muestras tomadas de la misma barra o lingote.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

Si se grafican resultados de diferentes ensayos, se verá si hay alguna correlación entre los dos conjuntos de resultados.



La gráfica parece sugerir que el límite de resistencia varía desde aproximadamente 40% hasta 60% de la resistencia a la tensión para aceros, y hasta alrededor de 210 kpsi (1450 MPa).

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

En el caso de los aceros, al simplificar la observación de la figura, se estimará el límite de resistencia como:

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

donde S_{ut} es la resistencia a la tensión mínima.

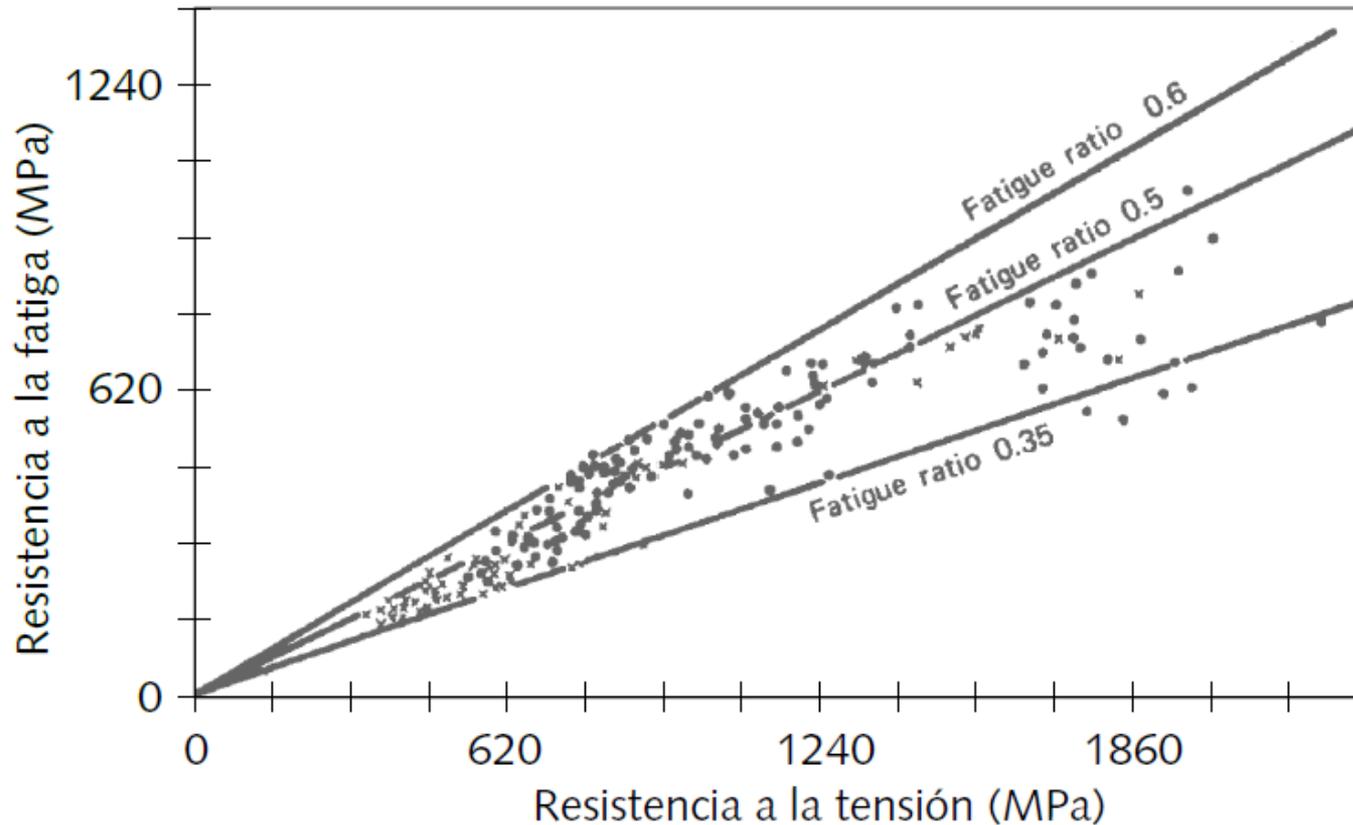
El símbolo de prima en S'_e en esta ecuación se refiere a la propia muestra de viga rotativa. Se reserva el símbolo sin prima (S_e) para el límite de resistencia de un elemento de máquina particular sujeto a cualquier tipo de carga.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

ACEROS

aceros:
$$\left\{ \begin{array}{ll} S_e' \cong 0.5 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ S_e' \cong 100 \text{ kpsi (700 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \end{array} \right\}$$

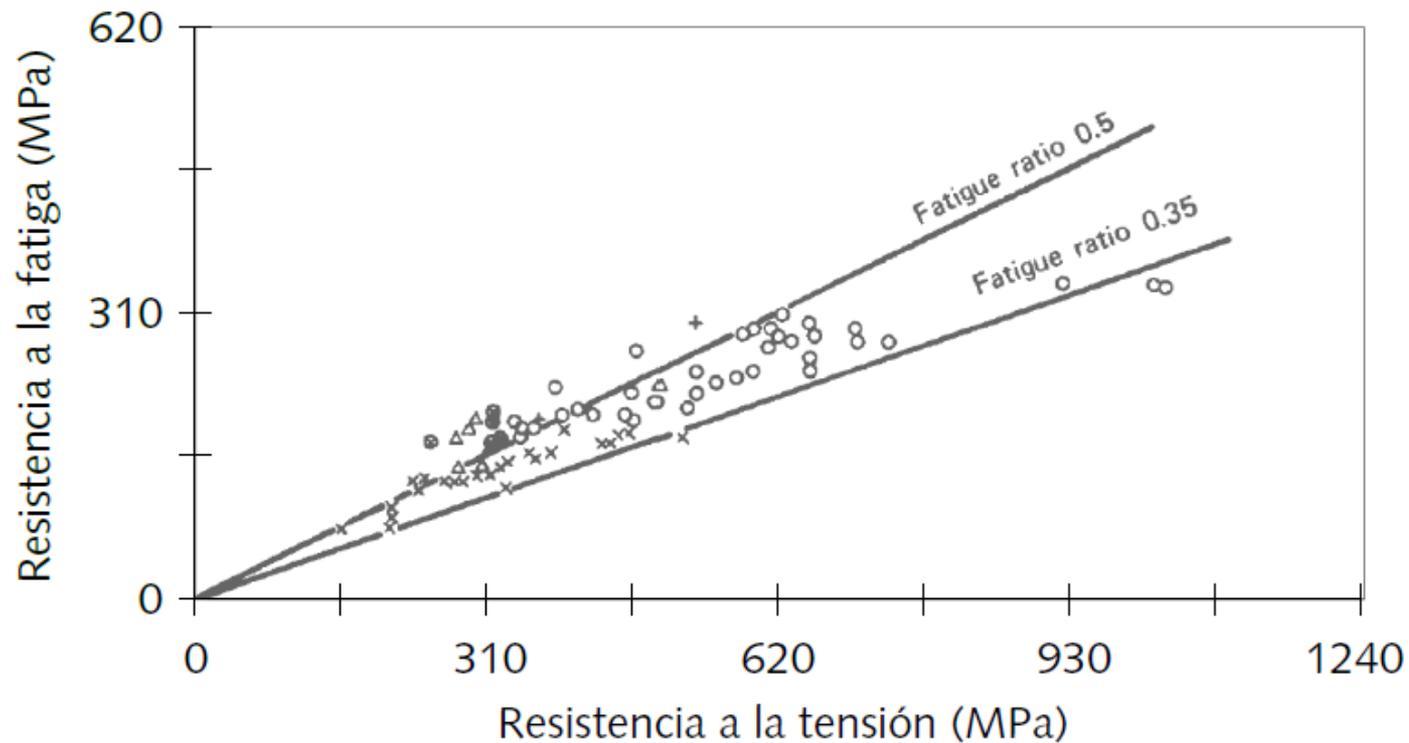


TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

HIERROS

hierros:
$$\begin{cases} S_e' \cong 0.4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 60 \text{ kpsi (400 MPa)} \\ S_e' \cong 24 \text{ kpsi (160 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 60 \text{ kpsi (400 MPa)} \end{cases}$$



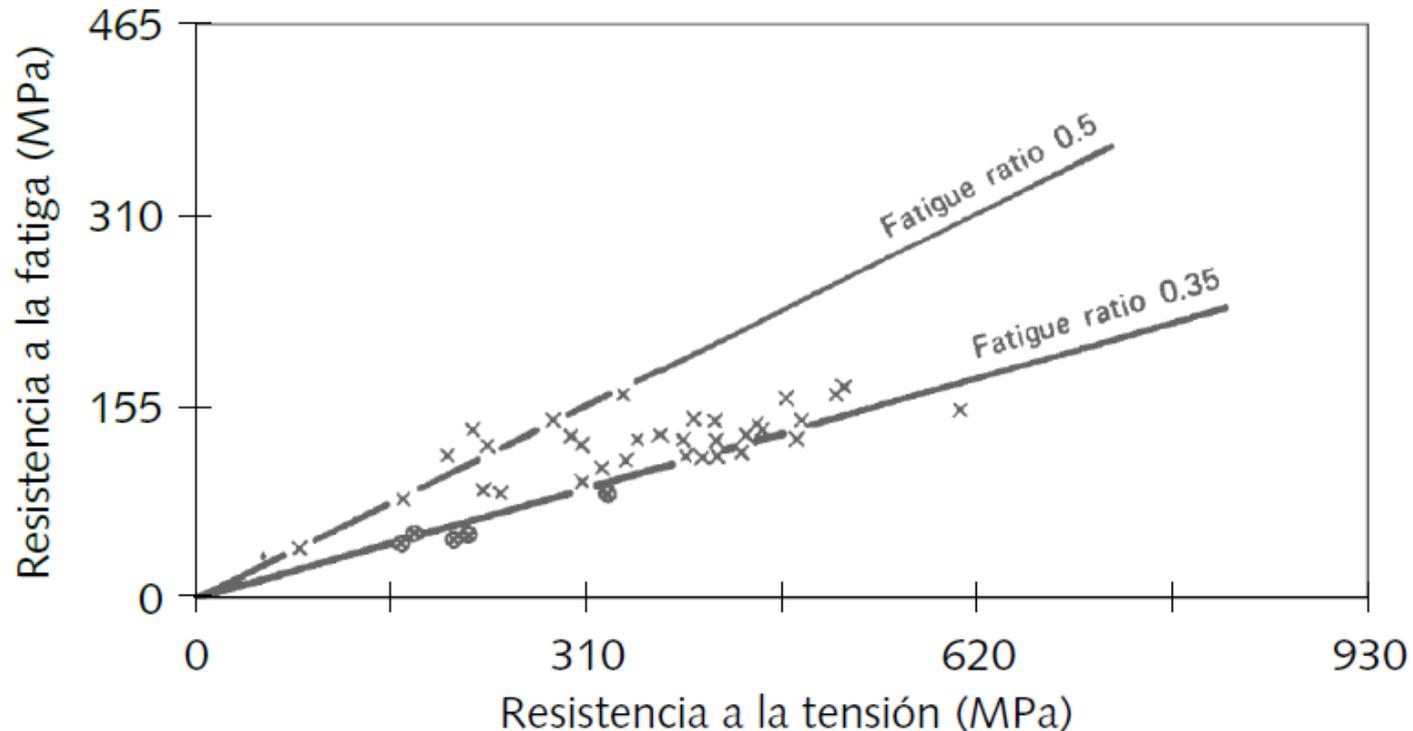
TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

ALUMINIOS

aluminios:

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_{f'@5E8} \cong 0.4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 48 \text{ kpsi (330 MPa)} \\ S_{f'@5E8} \cong 19 \text{ kpsi (130 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 48 \text{ kpsi (330 MPa)} \end{array} \right\}$$



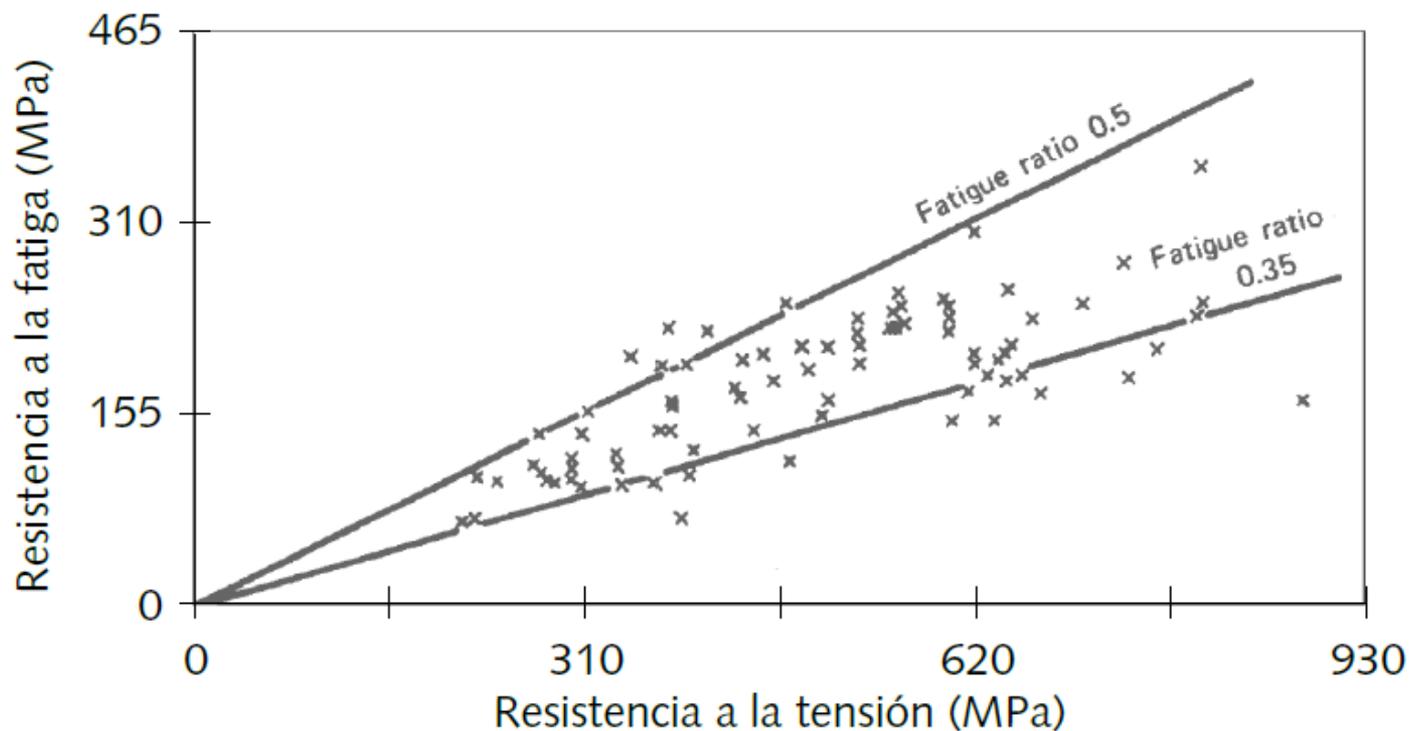
TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

LIMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

ALEACIONES DE COBRE

aleaciones de cobre:

$$\left\{ \begin{array}{ll} S_{f@5E8}' \cong 0.4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 40 \text{ kpsi (280 MPa)} \\ S_{f@5E8}' \cong 14 \text{ kpsi (100 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 40 \text{ kpsi (280 MPa)} \end{array} \right\}$$



Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

Las resistencias a la fatiga o los límites de resistencia a la fatiga que se obtienen de **muestras** estándar de prueba a la fatiga, o de estimados con base en pruebas estáticas, deben modificarse para justificar las diferencias físicas entre la muestra de prueba y la parte real que se diseña.

Aspectos a tener en cuenta

- Material: composición, base de falla, variabilidad.
- Manufactura: método, tratamiento térmico, corrosión superficial por frotamiento, acabado superficial, concentración de esfuerzo.
- Entorno: corrosión, temperatura, estado de esfuerzos, tiempos de relajación.
- Diseño: tamaño, forma, vida, estado de esfuerzos, concentración de esfuerzo, velocidad, rozamiento, excoiación.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

FACTORES DE CORRECCIÓN

Marin identificó factores que cuantifican los efectos de la condición superficial, el tamaño, la carga, la temperatura y varios otros puntos.

Estos factores de reducción de la resistencia multiplican el estimado teórico, para obtener una resistencia de fatiga o un límite de resistencia a la fatiga corregidos para una aplicación específica.

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_{e'}$$

k_a Factor de superficie

k_b Factor de tamaño

k_c Factor de carga

k_d Factor de temperatura

k_e Factor de confiabilidad

k_f Factor de efectos varios

OBS: En general se usa: $S_{e'} = 0.5S_{ut}$

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

FACTORES DE CORRECCIÓN

Factor de superficie (k_a)

El factor de modificación depende de la calidad del acabado de la superficie de la parte y de la resistencia a la tensión.

$$k_a = a S_{ut}^b$$

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

FACTORES DE CORRECCIÓN

Factor de tamaño (k_b)

Los resultados para flexión y torsión pueden expresarse como

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

Para carga axial no hay efecto de tamaño, por lo cual $k_b=1$ (ver k_c).

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

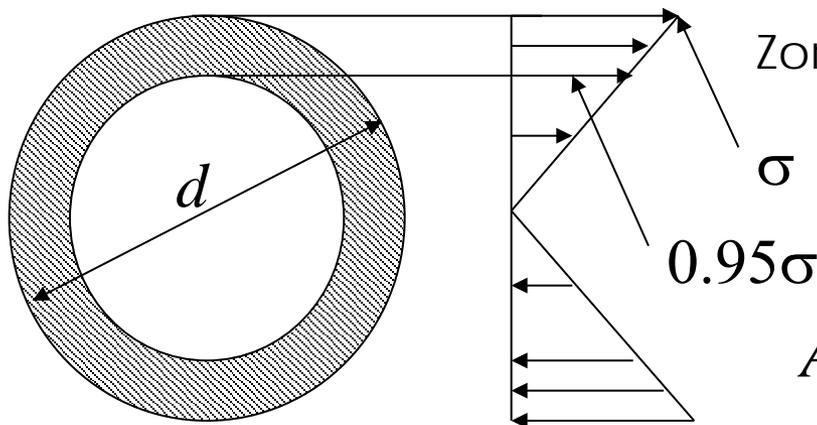
FACTORES DE CORRECCIÓN

Factor de tamaño (kb)

Si la pieza no es de sección circular se emplea una dimensión efectiva que se obtiene mediante las expresiones:

$$A_{95} = \pi \left[\frac{d^2 - (0.95d)^2}{4} \right] = 0.0766 d^2 \quad d_{equiv} = \sqrt{\frac{A_{95}}{0.0766}}$$

donde A_{95} es la porción del área de la sección transversal de la pieza no redonda, sometida a un esfuerzo de entre 95 y 100% de su esfuerzo máximo.



Zona con tensión máxima hasta el 95%

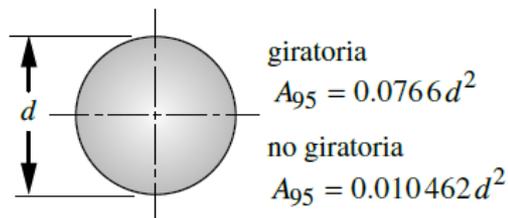
VIGA ROTATORIA CIRCULAR

$$A_{0.95\sigma} = \frac{\pi}{4} \left[d^2 - (0.95d)^2 \right] = 0.0766 d^2$$

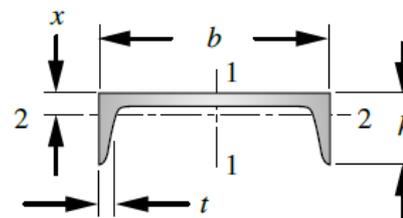
TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

FACTORES DE CORRECCIÓN

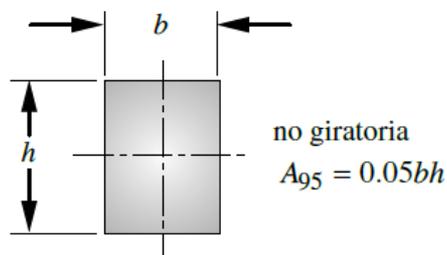
Factor de tamaño (k_b)



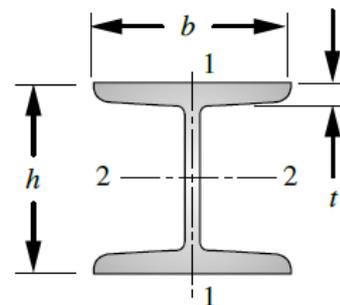
(a) Redonda sólida o hueca



(b) Acanalada



(c) Rectangular sólida



(d) Viga en I

Factor de carga (k_c)

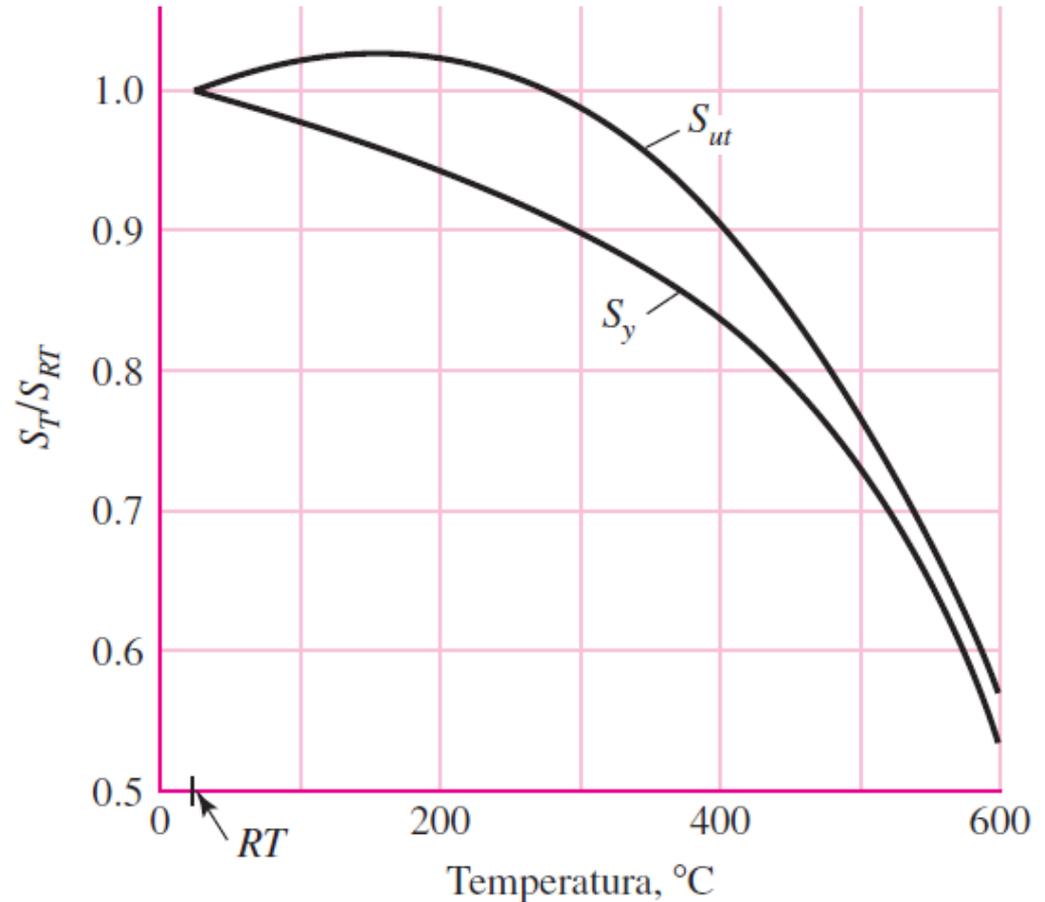
$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases}$$

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

FACTORES DE CORRECCIÓN

Factor de temperatura (k_d)

La cantidad limitada de datos disponibles indica que el límite de la resistencia a la fatiga de los aceros se incrementa un poco a medida que la temperatura aumenta y luego comienza a disminuir en el intervalo de 400 a 700°F,



Gráfica de los resultados de 145 pruebas de 21 aceros al carbono y aleados que muestra el efecto de la temperatura de operación (S_T) en la resistencia a la fluencia S_y y la resistencia última S_{ut} (S_{RT}).

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

FACTORES DE CORRECCIÓN

Factor de temperatura (k_d)

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

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		

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

FACTORES DE CORRECCIÓN

Factor de confiabilidad (k_d)

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
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

Factores de confiabilidad k_e correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

FACTORES DE CORRECCIÓN

Factor de efectos varios (k_f)

Aunque el factor k_f tiene el propósito de tomar en cuenta la reducción del límite de resistencia a la fatiga debida a todos los otros efectos, es más bien un recordatorio de que estos efectos se deben tomar en cuenta, porque los valores reales de k_f no siempre están disponibles.

Algunos aspectos a tener en cuenta:

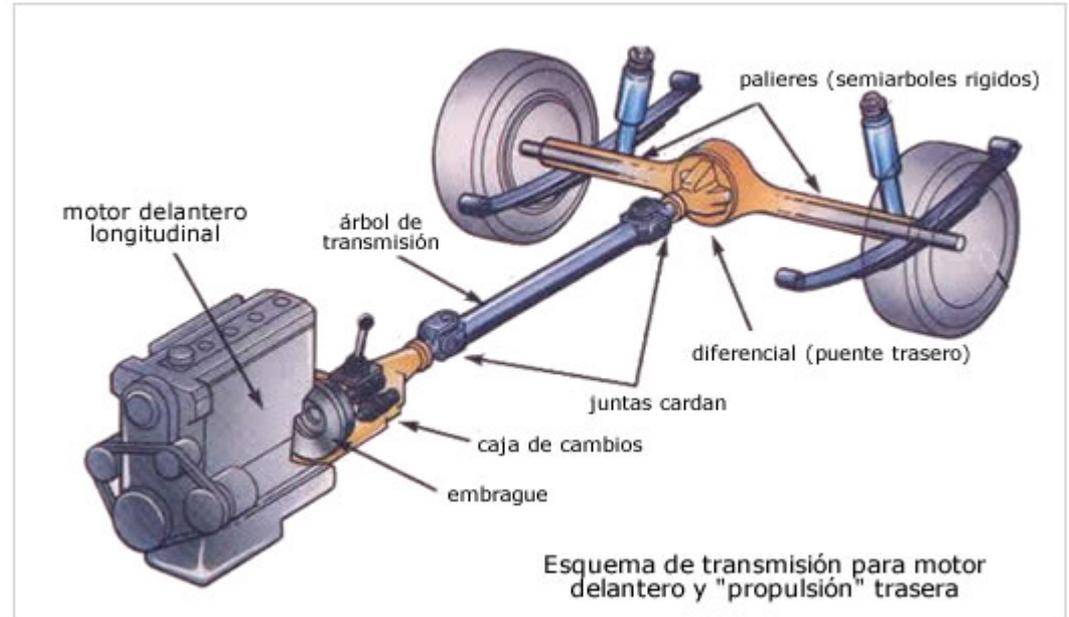
- Esfuerzos residuales
- Corrosión
- Recubrimiento electrolítico
- Metalizado por aspersion
- Frecuencia cíclica
- Corrosión por frotamiento

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

Es muy difícil diseñar una máquina sin permitir algunos cambios en la sección transversal de los elementos o irregularidades.

Cualquier discontinuidad en una parte de una máquina altera la **distribución del esfuerzo** en las **inmediaciones** de la discontinuidad, de manera que las ecuaciones elementales del esfuerzo ya **no describen el estado de esfuerzo en la parte**.



Por ejemplo, los ejes rotatorios deben tener cambios de sección diseñados de tal manera que los cojinetes se asienten apropiadamente y tomen cargas de empuje; además, los ejes deben tener ranuras maquinadas para las cuñas, a fin de sujetar poleas y engranes.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

Se emplea un factor teórico o geométrico de la concentración de esfuerzos (K_t) o (K_{ts}) para relacionar el esfuerzo máximo real en la discontinuidad con el esfuerzo nominal.

Los factores se definen por medio de las ecuaciones

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

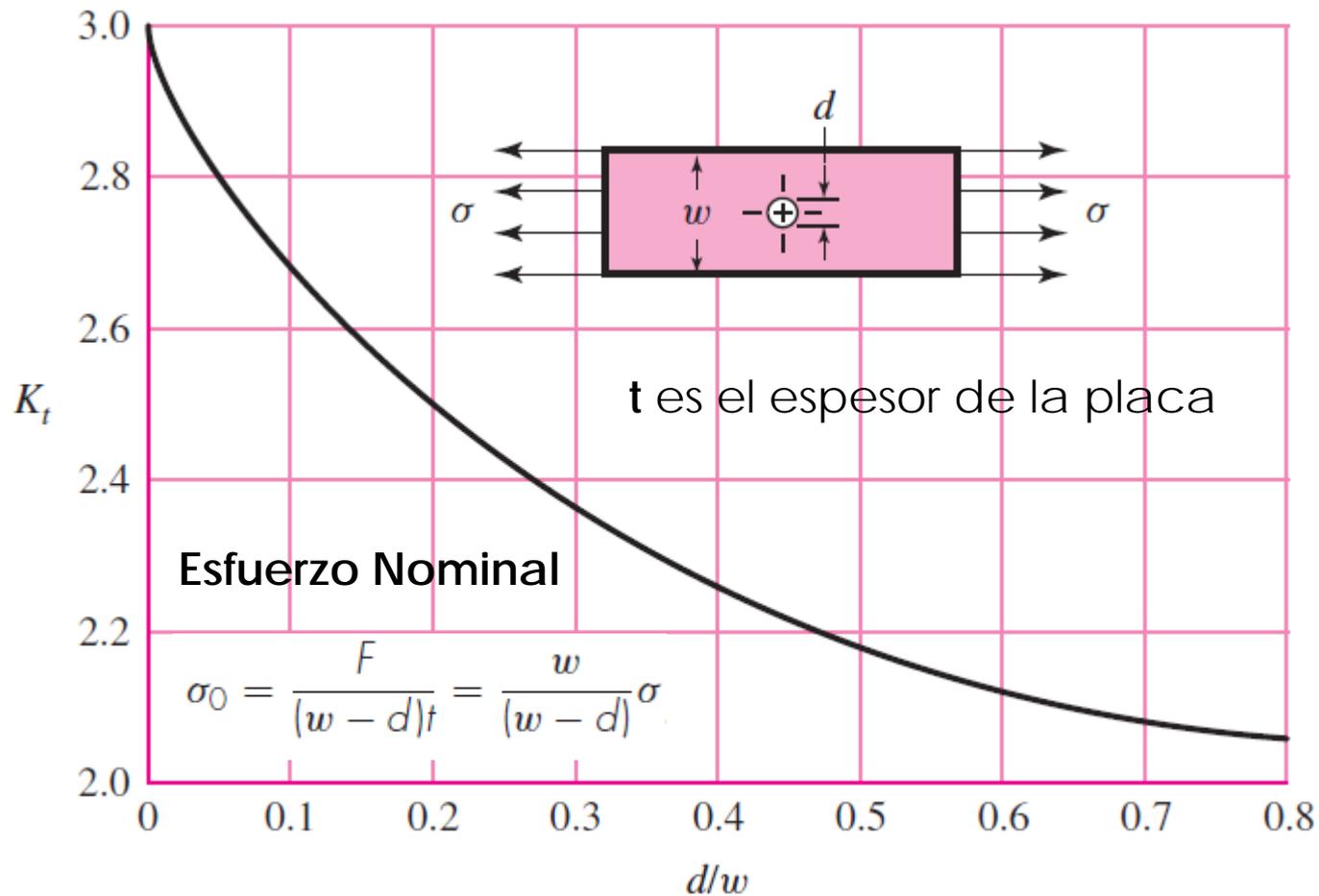
donde (K_t) se usa para esfuerzos normales y (K_{ts}) para esfuerzos cortantes.

El subíndice (t) en (K_t) significa que el valor de este factor de concentración de esfuerzos sólo depende de la *geometría* de la parte. Es decir, el material particular que se haya utilizado no tiene efecto en el valor de (K_t). Ésta es la razón por la que se llama factor *teórico* de concentración de esfuerzos.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

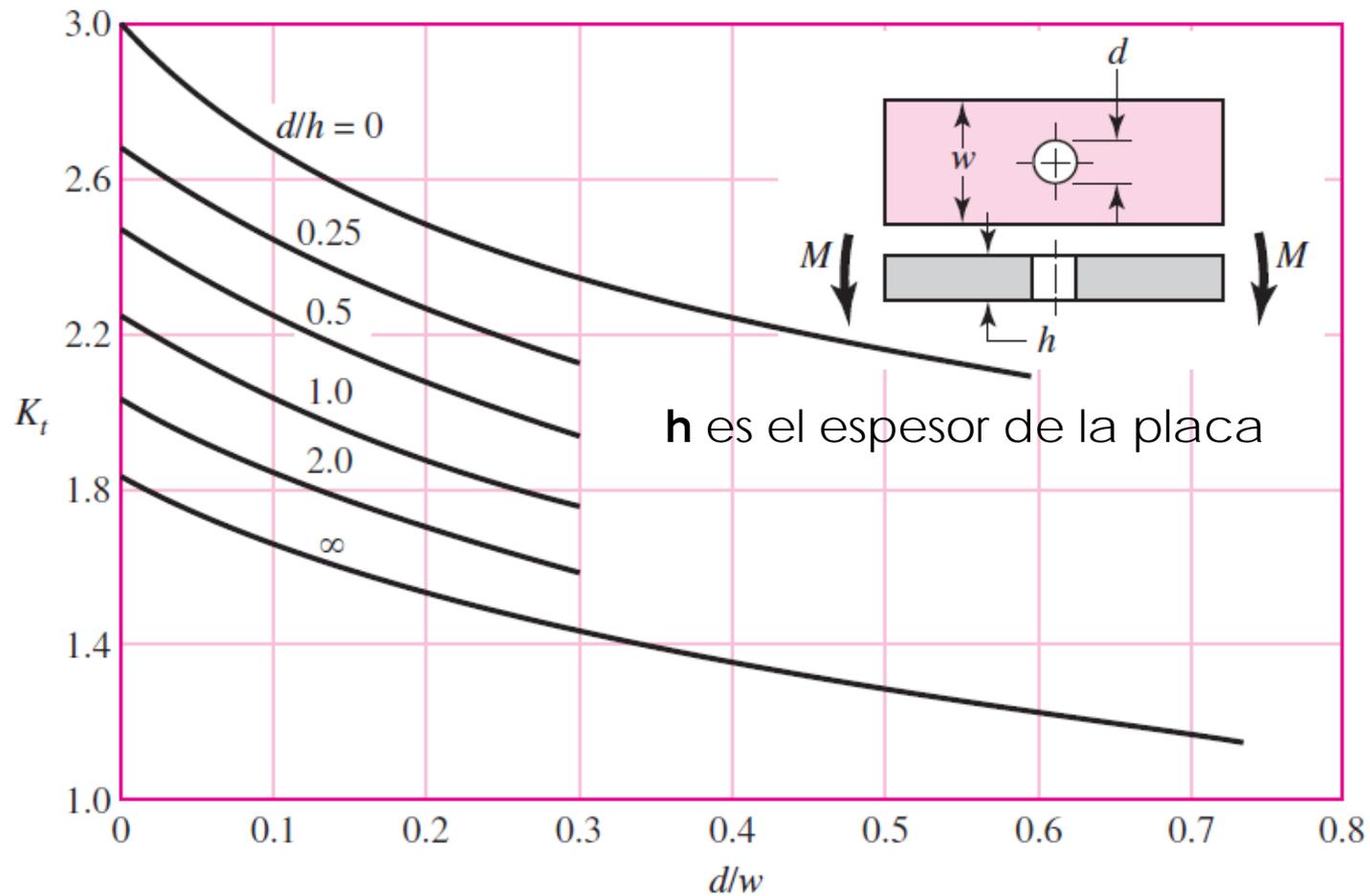
Placa delgada en tensión o compresión simple con un orificio central transversal. La fuerza en tensión neta es $F = \sigma wt$



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

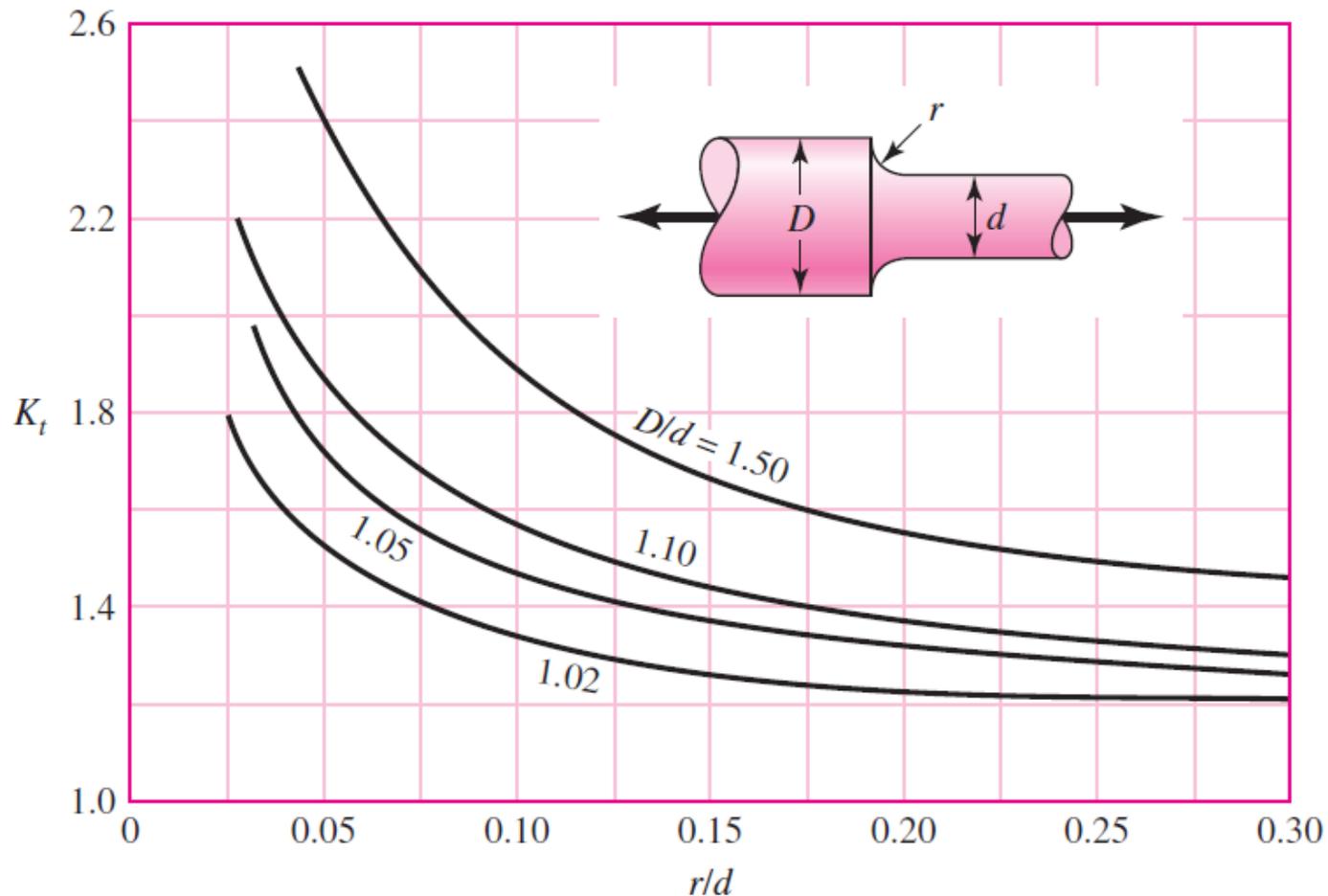
Barra rectangular con un agujero transversal en flexión.
 $\sigma_0 = Mc/I$, donde $I = (w - d)h^3/12$.



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

Eje redondo con filete en el hombro en tensión.
 $\sigma_0 = F/A$, donde $A = \pi d^2/4$.

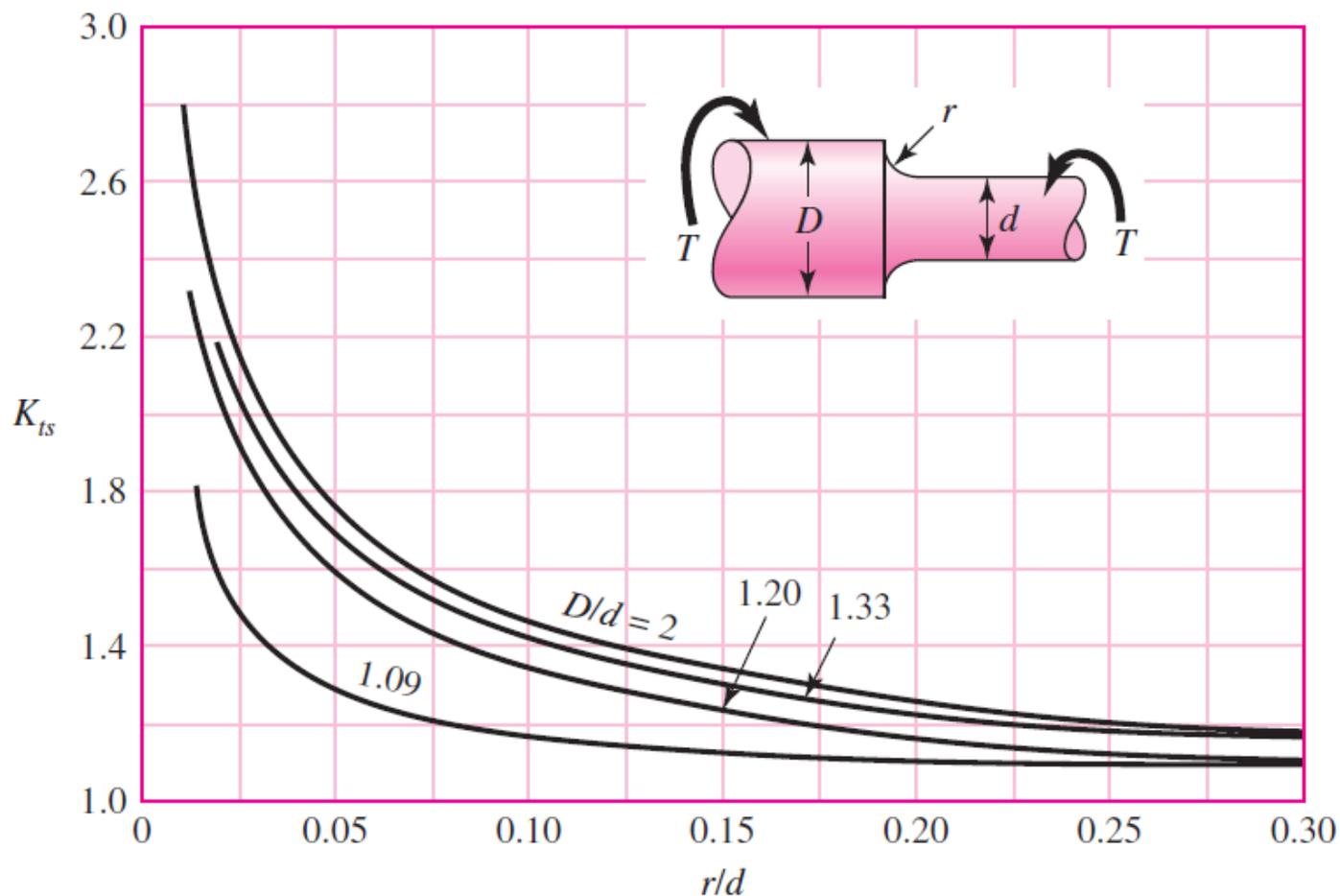


TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

Eje redondo con filete en el hombro en torsión.

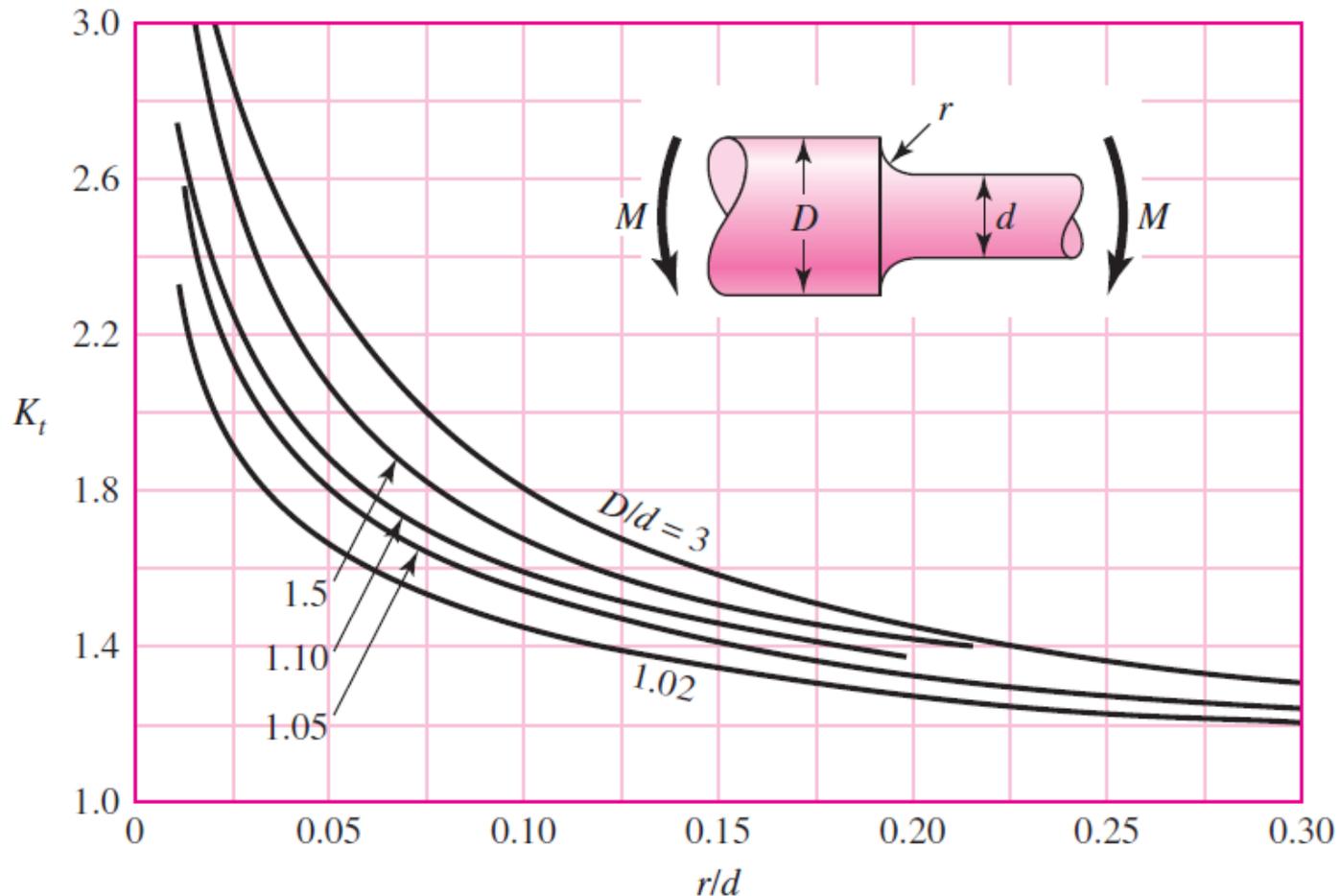
$\tau_0 = Tc/J$, donde $c = d/2$ y $J = \pi d^4/32$.



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

Eje redondo con filete en el hombro en flexión.
 $\sigma_0 = Mc/I$, donde $c = d/2$ y $I = \pi d^4/64$.

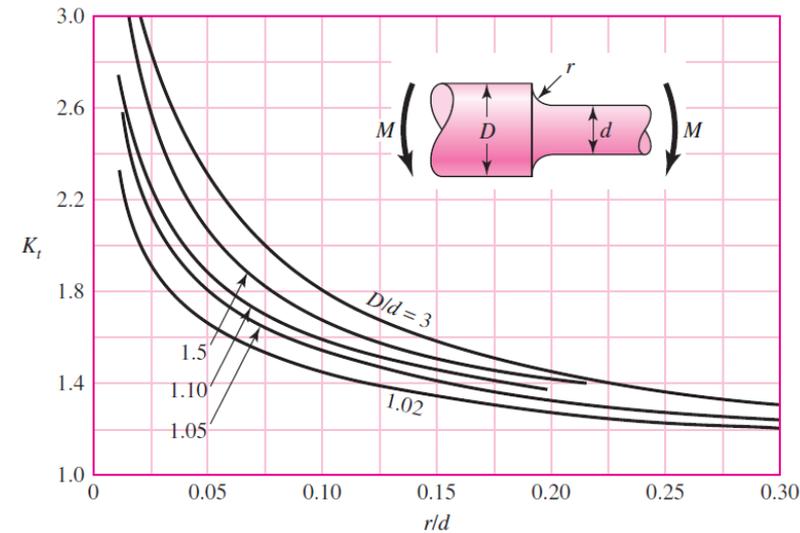


TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

El factor de concentración del esfuerzo K_t (o K_t s), se usa con el esfuerzo nominal para obtener el esfuerzo máximo resultante debido a la irregularidad o defecto.

Algunos materiales no son completamente sensibles a la presencia de muescas y, por lo tanto, para ellos puede usarse un valor reducido de (K_t).



En el caso de estos materiales, el esfuerzo máximo es, en realidad,

$$\sigma_{\text{máx}} = K_f \sigma_0 \quad \text{o bien} \quad \tau_{\text{máx}} = K_{fs} \tau_0$$

El factor (K_f) se llama comúnmente *factor de concentración del esfuerzo por fatiga*, y a eso se debe el subíndice f .

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

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

La sensibilidad a la muesca, q , está definida por

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad \text{o bien} \quad q_{\text{cortante}} = \frac{K_{fs} - 1}{K_{ts} - 1}$$

donde q se encuentra usualmente entre cero y la unidad.

La ecuación muestra que:

- 1) Si $q = 0$, entonces $(K_f) = 1$, y el material no tiene ninguna sensibilidad a la muesca.
- 2) Si $q = 1$, entonces $K_f = K_t$ y el material tiene sensibilidad total a la muesca.

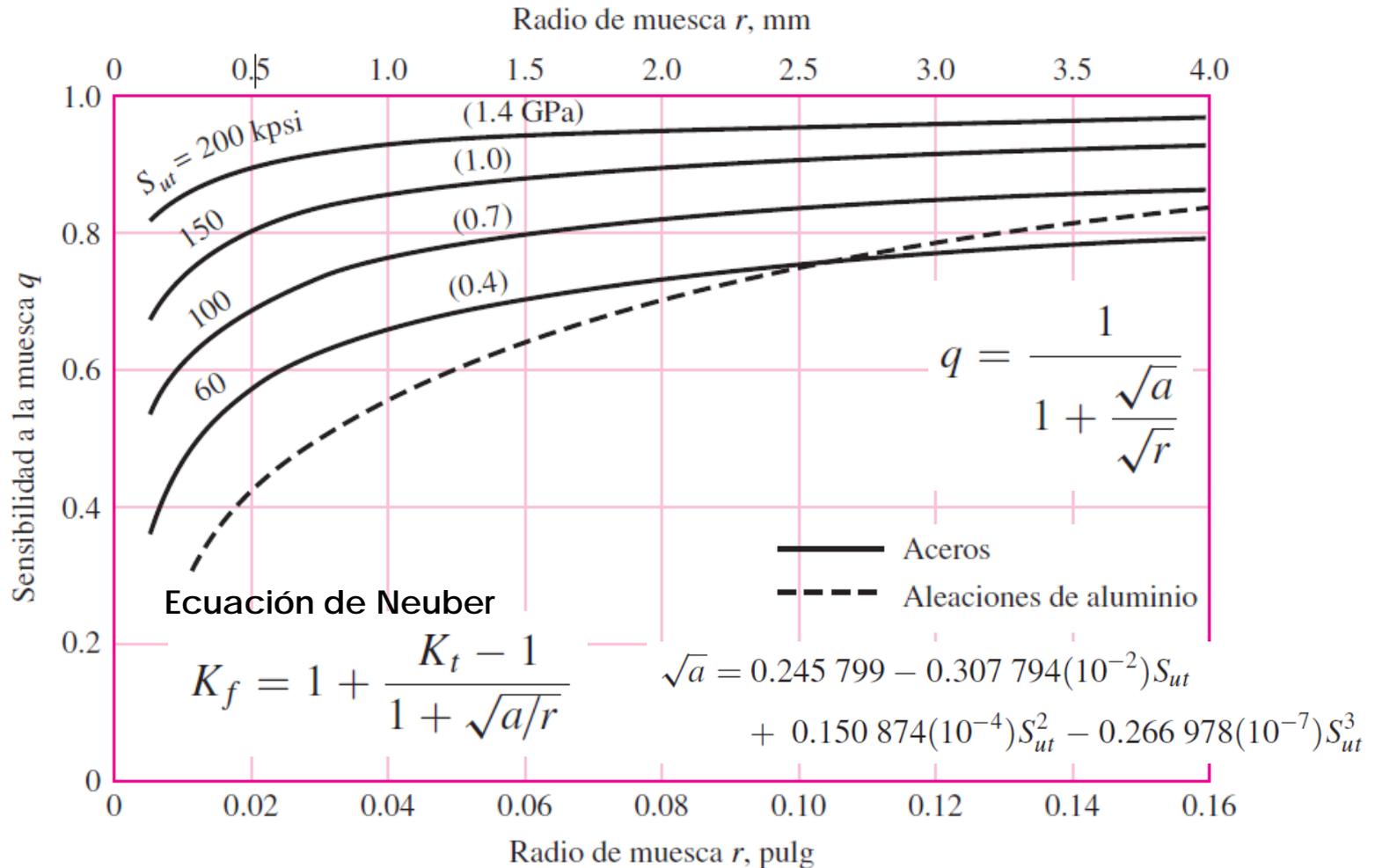
En el trabajo de análisis o diseño, primero encuentre (K_t) , a partir de la geometría de la parte. Después, especifique el material, encuentre (q) , y despeje para (K_f) de la ecuación

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad \text{o bien} \quad K_{fs} = 1 + q_{\text{cortante}}(K_{ts} - 1)$$

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

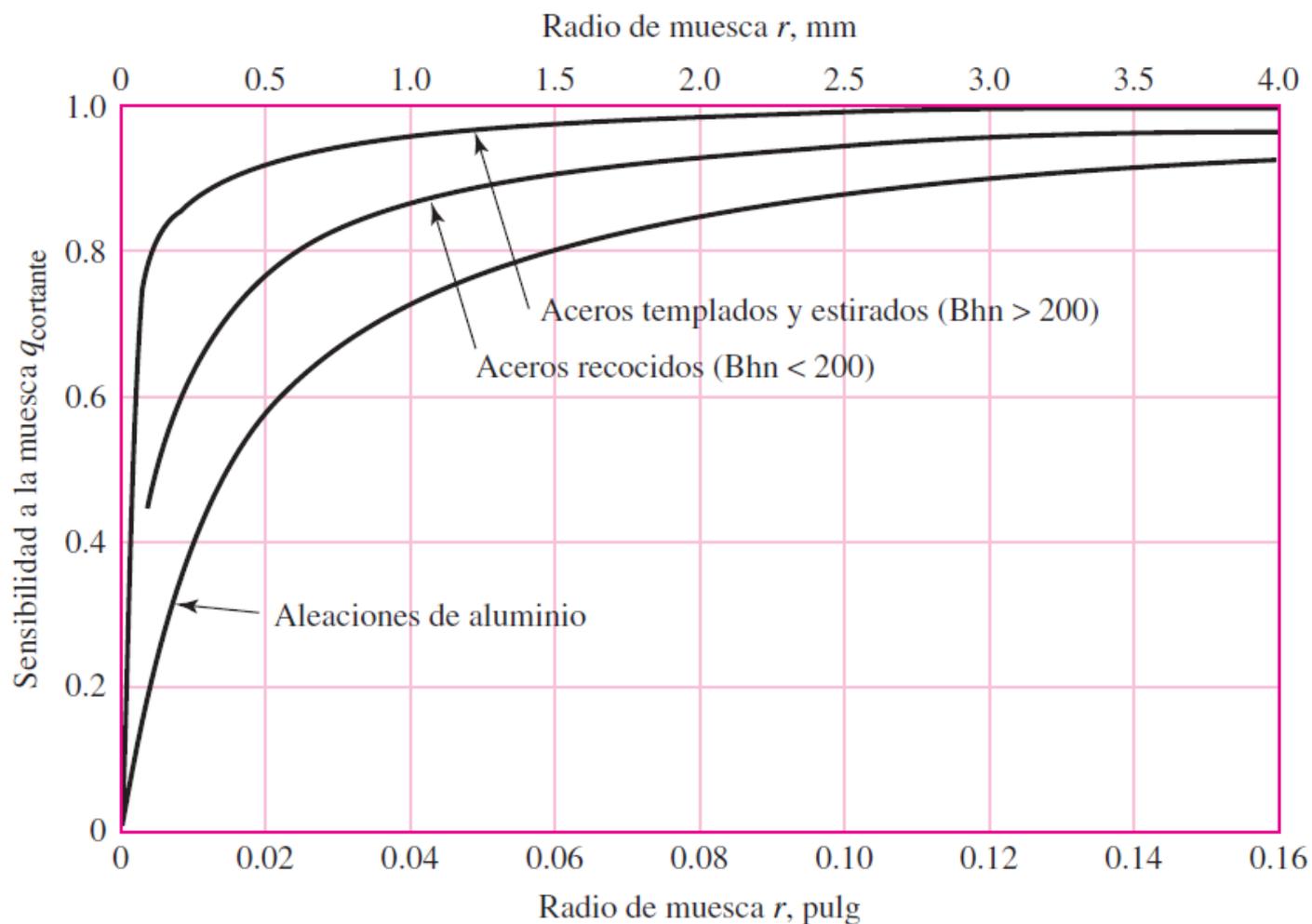
Sensibilidad a la muesca en el caso de aceros y aleaciones de aluminio forjado UNS A92024-T, sometidos a flexión inversa de cargas axiales inversas



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

Sensibilidad a la muesca de materiales sometidos a torsión inversa.

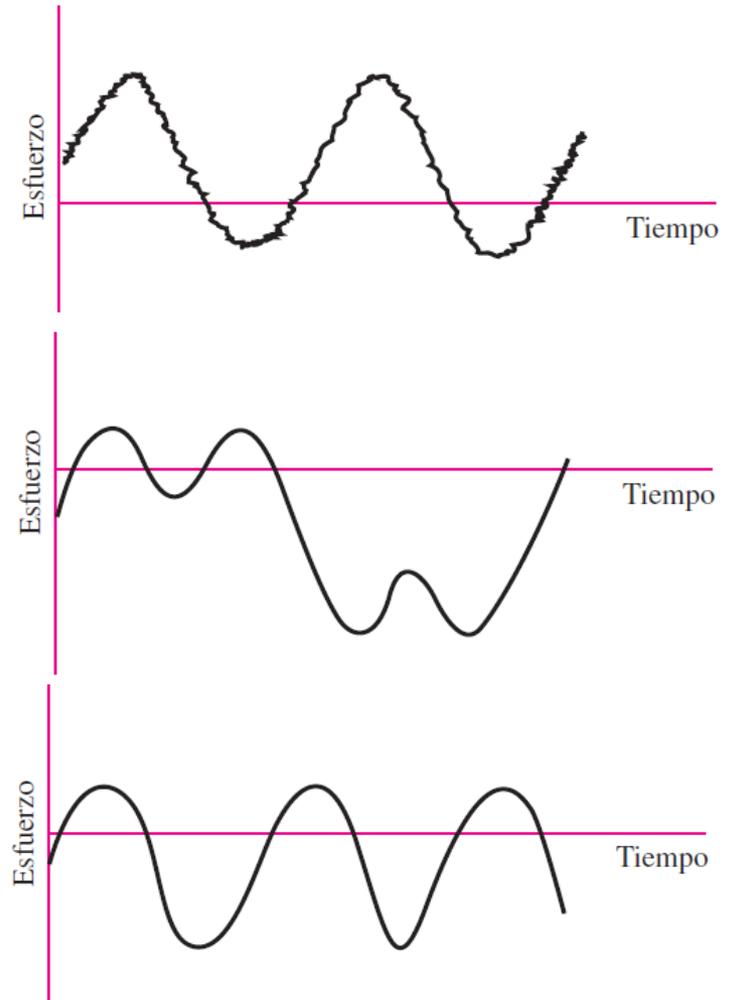


TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

ESFUERZOS FLUCTUANTES

Algunas relaciones esfuerzo-tiempo

- Esfuerzo fluctuante con pulsaciones de alta frecuencia.
- Esfuerzo fluctuante no sinusoidal.



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

ESFUERZOS FLUCTUANTES

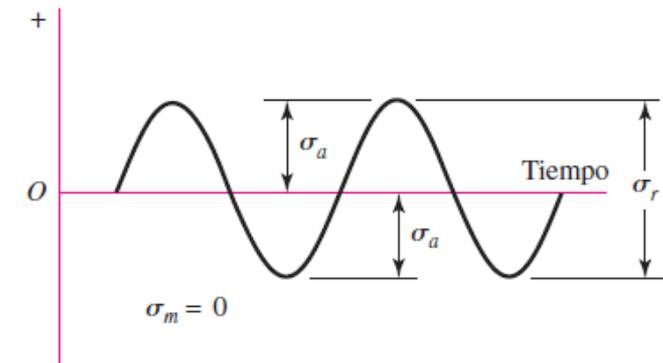
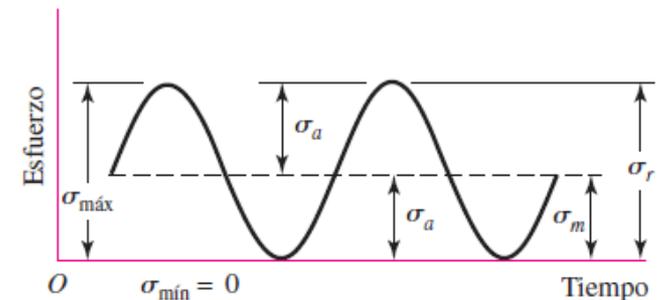
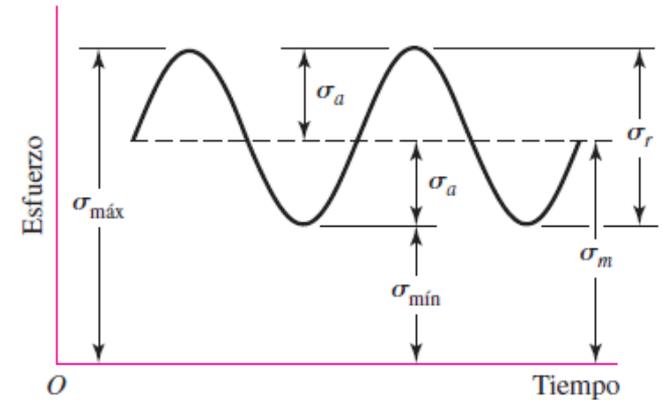
Algunas relaciones esfuerzo-tiempo

- Esfuerzo fluctuante sinusoidal.
- Esfuerzo fluctuante repetido.
- Esfuerzo fluctuante completamente.

Se ha determinado que en los patrones periódicos que presentan un solo **máximo** y un solo **mínimo** de la fuerza, la forma de la onda **no resulta fundamental**, pero los picos en el lado alto (**máximo**) y en el lado bajo (**mínimo**) son importantes.

$$F_m = \frac{F_{\text{máx}} + F_{\text{mín}}}{2} \quad F_a = \left| \frac{F_{\text{máx}} - F_{\text{mín}}}{2} \right|$$

donde **Fm** es la componente de intervalo medio de la fuerza y **Fa** es la componente de la amplitud de la fuerza.



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

ESFUERZOS FLUCTUANTES

Las componentes del esfuerzo que podemos distinguir en un diagrama esfuerzo-tiempo, son:

$\sigma_{\text{mín}}$ = esfuerzo mínimo

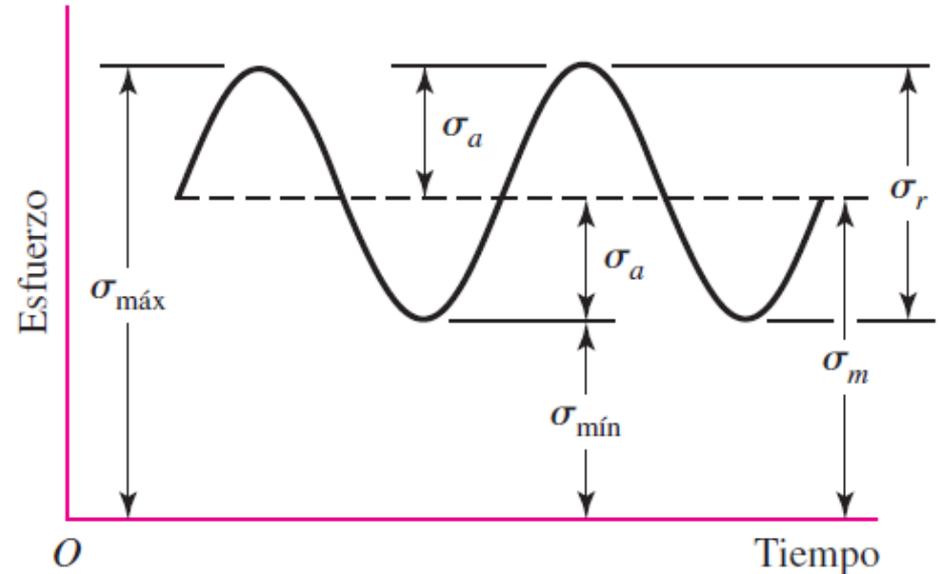
$\sigma_{\text{máx}}$ = esfuerzo máximo

σ_a = componente de la amplitud

σ_m = componente de esfuerzo medio

σ_r = intervalo de esfuerzo

σ_s = esfuerzo estático o constante



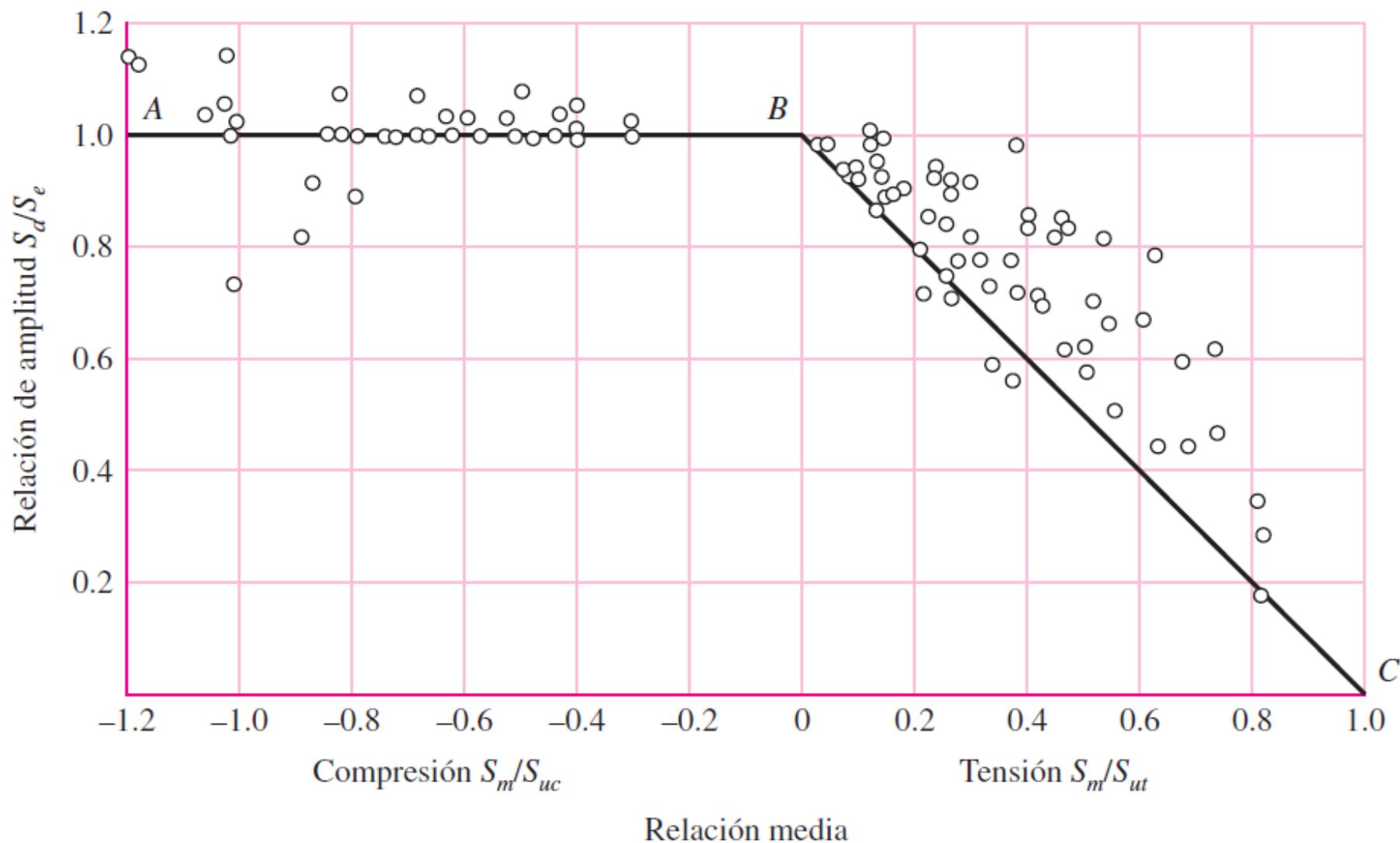
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad R = \frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma_{\text{máx}}}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \right| \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

OBS: El esfuerzo constante, o *estático*, no es el mismo que el esfuerzo medio; de hecho, puede tener cualquier valor entre $\sigma_{\text{mín}}$ y $\sigma_{\text{máx}}$.

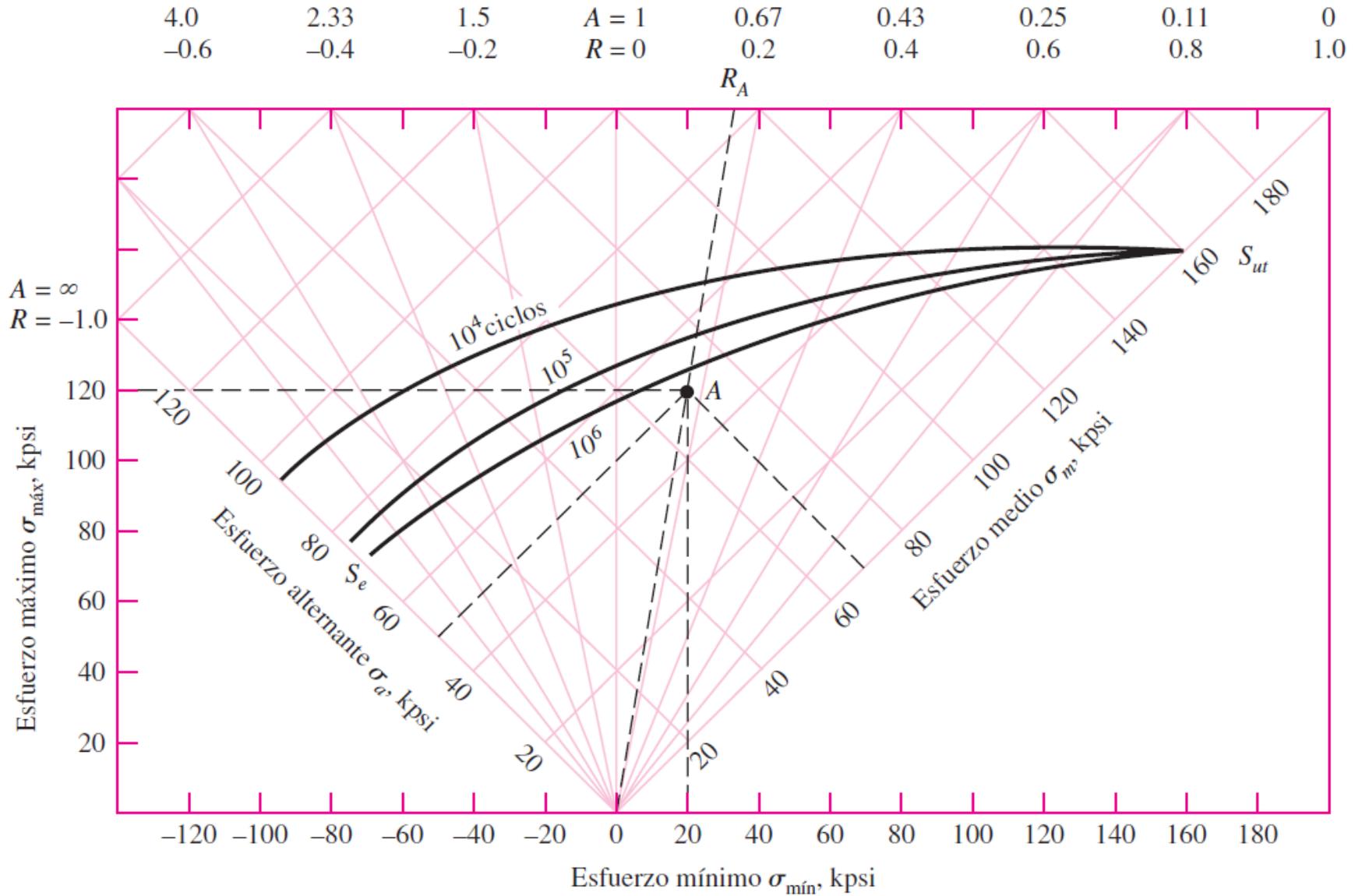
TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

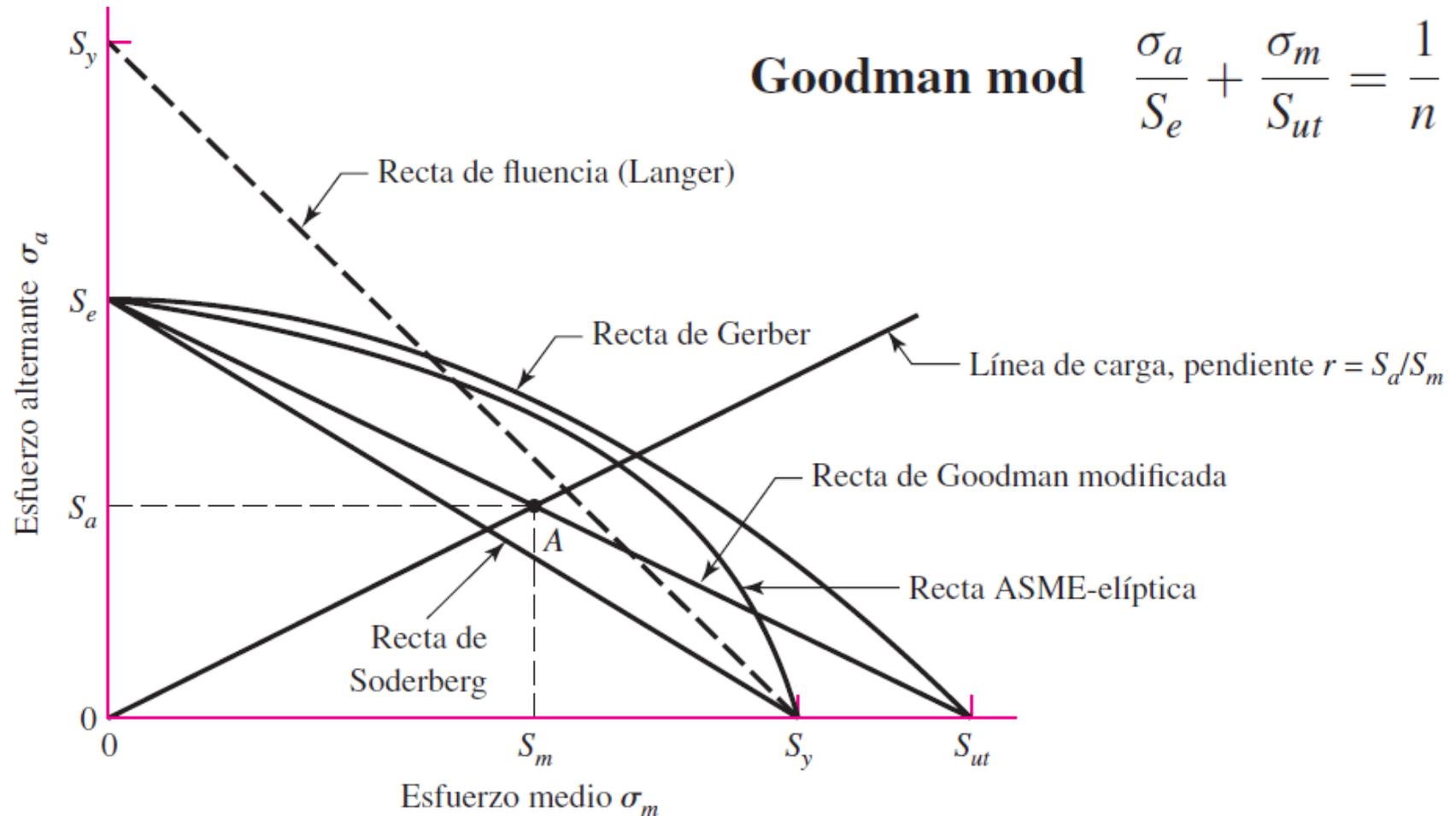
CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA

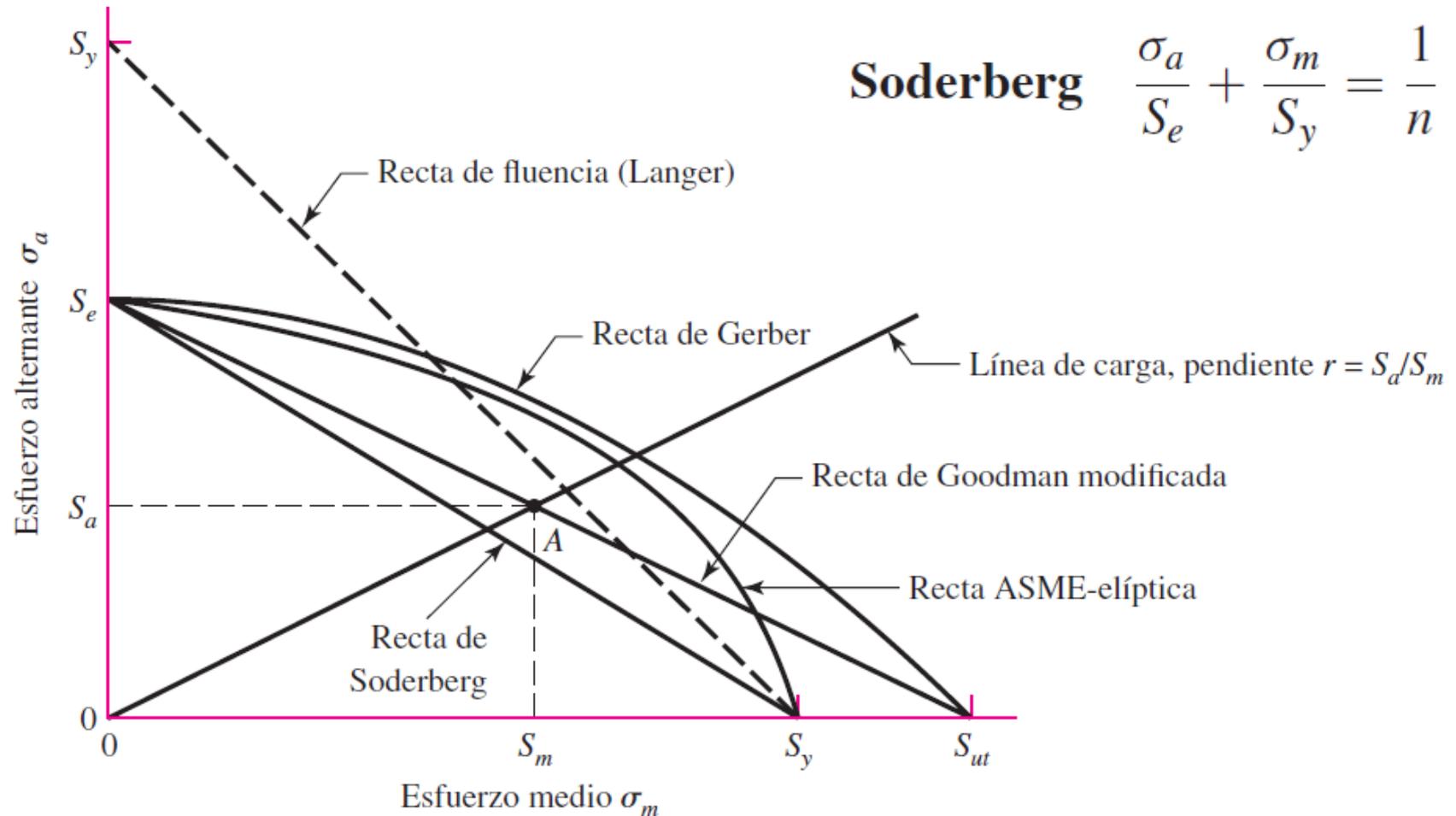
Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla. Para cada criterio, los puntos **SOBRE** la recta respectiva indican falla.



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA

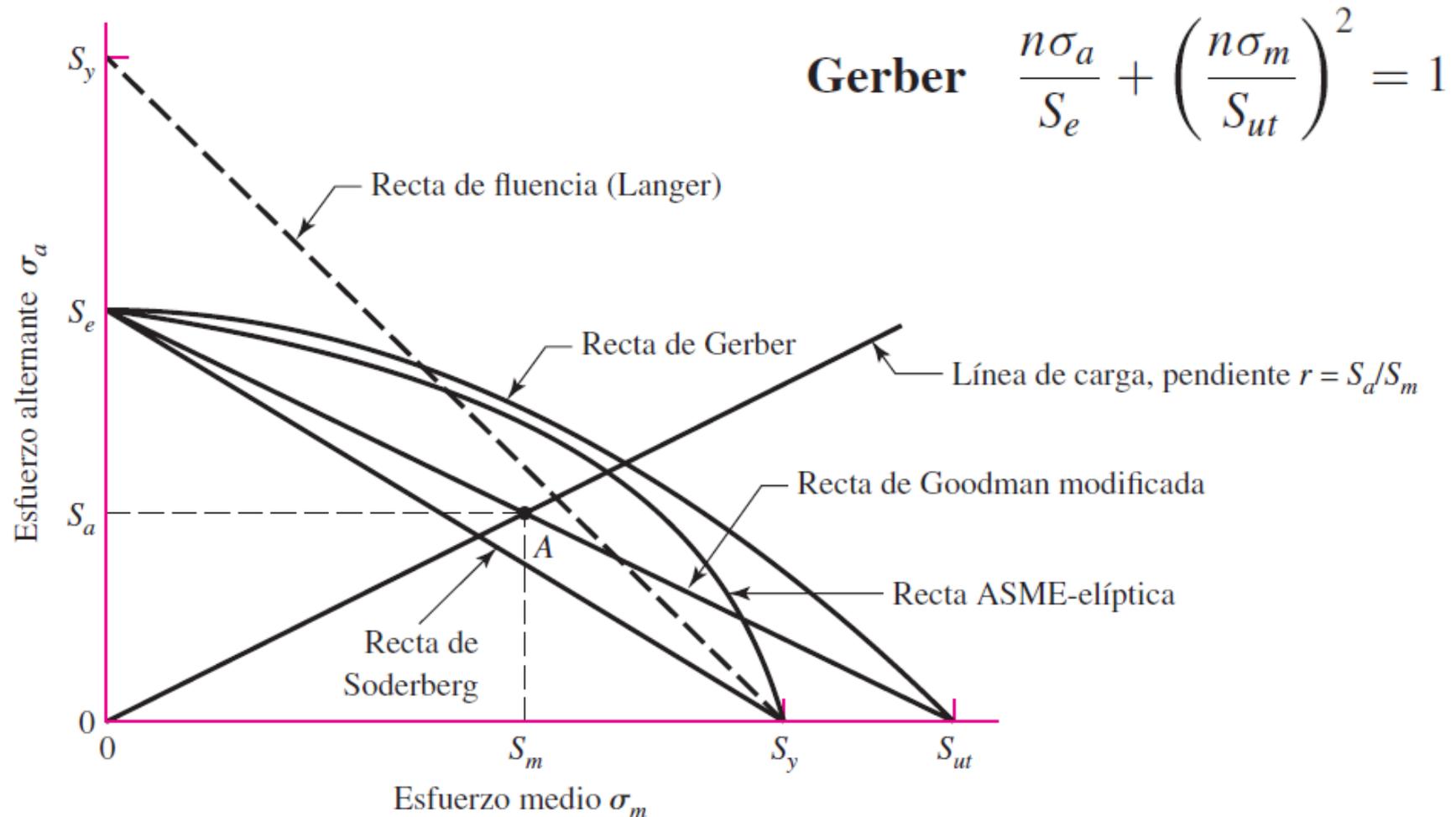
Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla. Para cada criterio, los puntos **SOBRE** la recta respectiva indican falla.



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA

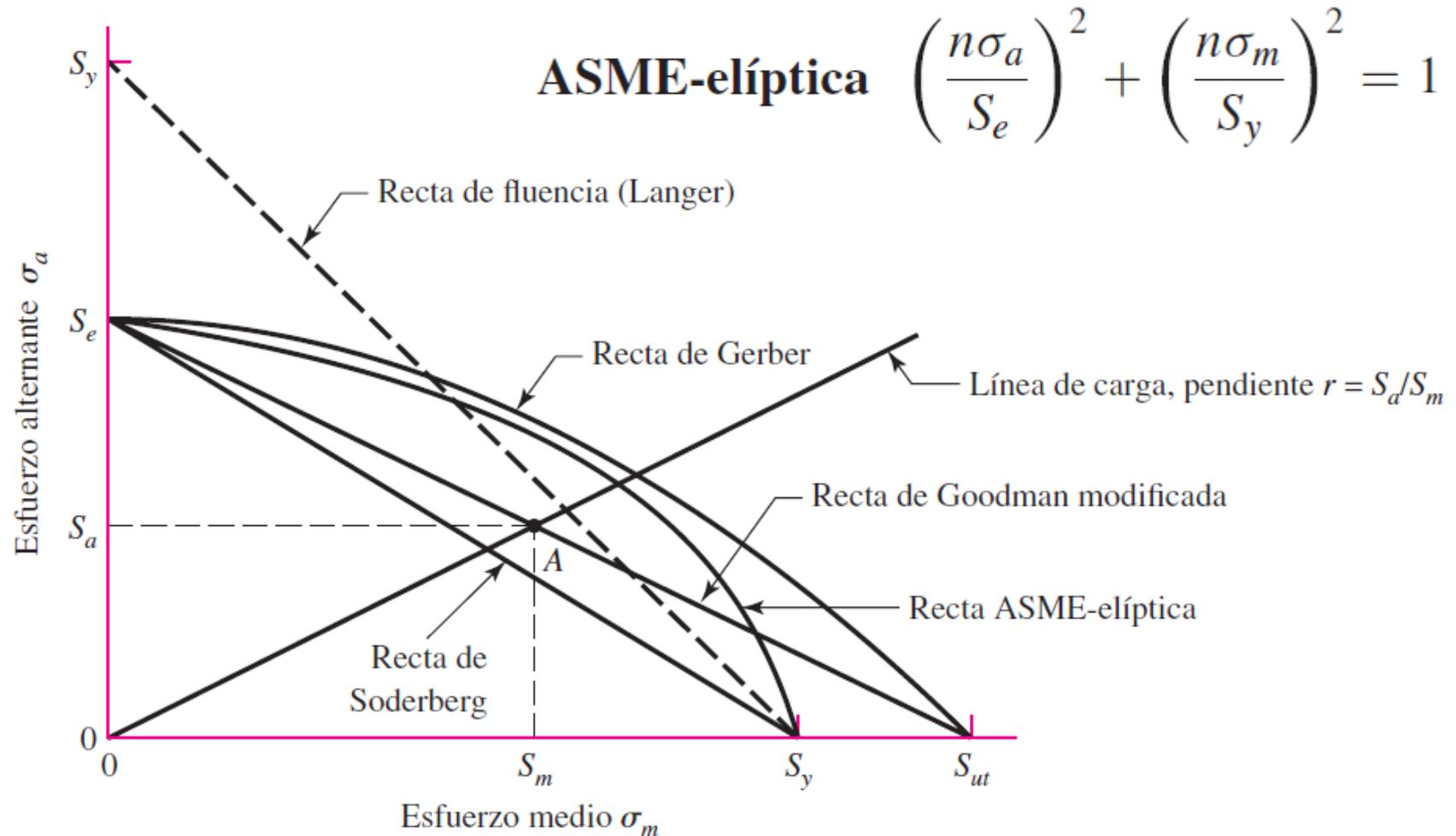
Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla. Para cada criterio, los puntos **SOBRE** la recta respectiva indican falla.



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA

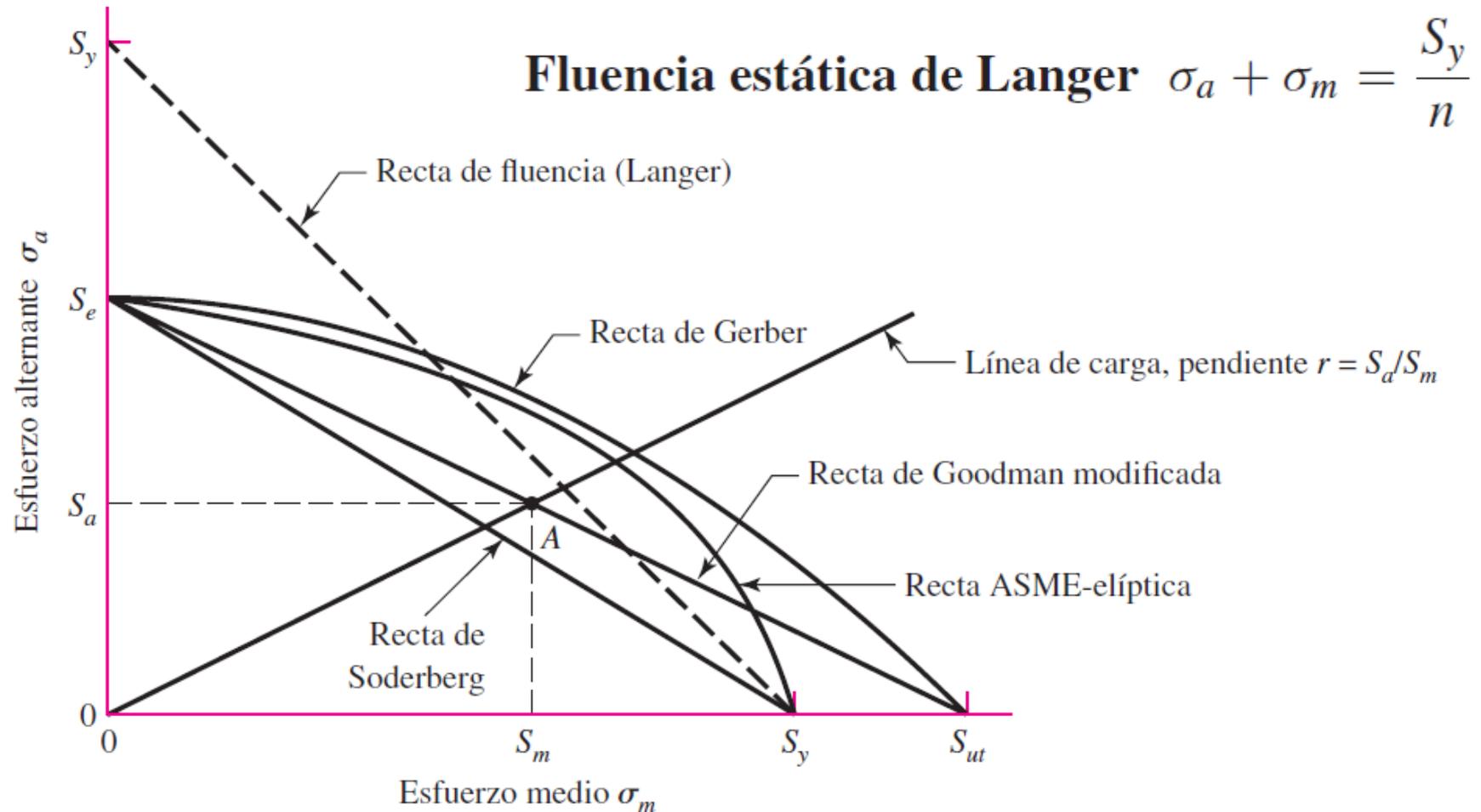
Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla. Para cada criterio, los puntos **SOBRE** la recta respectiva indican falla.



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA

Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla. Para cada criterio, los puntos **SOBRE** la recta respectiva indican falla.



TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA

Tabla 6-6

Coordenadas de la amplitud y constante de la resistencia, e intersecciones importantes en el primer cuadrante de los criterios de falla de Goodman modificado y de Langer

Intersecciones de ecuaciones	Coordenadas de la intersección
$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$ <p>Línea de carga $r = \frac{S_a}{S_m}$</p>	$S_a = \frac{r S_e S_{ut}}{r S_{ut} + S_e}$ $S_m = \frac{S_a}{r}$
$\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$ <p>Línea de carga $r = \frac{S_a}{S_m}$</p>	$S_a = \frac{r S_y}{1 + r}$ $S_m = \frac{S_y}{1 + r}$
$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$ $\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$	$S_m = \frac{(S_y - S_e) S_{ut}}{S_{ut} - S_e}$ $S_a = S_y - S_m, r_{\text{crít}} = S_a/S_m$

Factor de seguridad de fatiga

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

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA

Tabla 6-7

Coordenadas de la amplitud y constante de la resistencia, e intersecciones importantes en el primer cuadrante de los criterios de falla de Gerber y de Langer

Intersecciones de ecuaciones	Coordenadas de la intersección
$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$ <p>Línea de carga $r = \frac{S_a}{S_m}$</p>	$S_a = \frac{r^2 S_{ut}^2}{2S_e} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2S_e}{r S_{ut}}\right)^2} \right]$ $S_m = \frac{S_a}{r}$
$\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$ <p>Línea de carga $r = \frac{S_a}{S_m}$</p>	$S_a = \frac{r S_y}{1 + r}$ $S_m = \frac{S_y}{1 + r}$
$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$ $\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$	$S_m = \frac{S_{ut}^2}{2S_e} \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{2S_e}{S_{ut}}\right)^2 \left(1 - \frac{S_y}{S_e}\right)} \right]$ $S_a = S_y - S_m, r_{crit} = S_a) S_m$

Factor de seguridad de fatiga

$$n_f = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{ut}}{\sigma_m}\right)^2 \frac{\sigma_a}{S_e} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2\sigma_m S_e}{S_{ut} \sigma_a}\right)^2} \right] \quad \sigma_m > 0$$

Tabla 6-8

Coordenadas de la amplitud y constante de la resistencia, e intersecciones importantes en el primer cuadrante de los criterios de falla de ASME-elíptica y de Langer

Intersecciones de ecuaciones	Coordenadas de la intersección
$\left(\frac{S_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 = 1$ <p>Línea de carga $r = S_a/S_m$</p>	$S_a = \sqrt{\frac{r^2 S_e^2 S_y^2}{S_e^2 + r^2 S_y^2}}$ $S_m = \frac{S_a}{r}$
$\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$ <p>Línea de carga $r = S_a/S_m$</p>	$S_a = \frac{r S_y}{1+r}$ $S_m = \frac{S_y}{1+r}$
$\left(\frac{S_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 = 1$ $\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$	$S_a = 0, \frac{2 S_y S_e^2}{S_e^2 + S_y^2}$ $S_m = S_y - S_a, r_{\text{crít}} = S_a/S_m$

Factor de seguridad de fatiga

$$n_f = \sqrt{\frac{1}{(\sigma_a/S_e)^2 + (\sigma_m/S_y)^2}}$$

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

COMBINACIONES DE MODOS DE CARGA

Los problemas de fatiga se pueden dividir en tres categorías:

1) Cargas simples completamente reversibles

Es la categoría más simple. La de un esfuerzo sencillo **completamente reversible** que se maneja con el diagrama S-N, que relaciona el **esfuerzo alternante** con la vida.

Aquí se permite sólo un tipo de carga, y el **esfuerzo medio debe ser cero**.

2) Cargas simples fluctuantes

Incorpora cargas fluctuantes generales, utiliza un criterio para relacionar el **esfuerzo medio** y el **esfuerzo alternante** (Goodman modificado, Gerber, ASME-elíptica o Soderberg).

Sólo se permite *un* tipo de carga a la vez.

3) Combinaciones de modos de carga

Involucra casos donde existen combinaciones de diferentes tipos de carga, como cargas flexionantes, torsionales y axiales.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

COMBINACIONES DE MODOS DE CARGA

¿Cómo se procede cuando la carga es una mezcla de cargas, digamos axial, de flexión y de torsión?

Usaremos la teoría de fallas de energía de distorsión:

- 1) El primer paso consiste en generar dos elementos de esfuerzo:
 - 1) uno para los esfuerzos alternantes y
 - 2) otro para los esfuerzos medios.
- 2) Aplique los factores apropiados de concentración del esfuerzo por fatiga:
 - 1) $(Kf)_{\text{flexión}}$ para los esfuerzos por flexión,
 - 2) $(Kfs)_{\text{torsión}}$ para los esfuerzos torsionales,
 - 3) $(Kf)_{\text{axial}}$ para los esfuerzos axiales.
- 3) Enseguida calcule un esfuerzo de **von Mises** equivalente para cada uno de estos dos elementos de esfuerzo, σ_a y σ_m .
- 4) Finalmente, seleccione un criterio de falla (Goodman modificado, Gerber, ASME-elíptica o Soderberg) para completar el análisis de fatiga.

TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA

COMBINACIONES DE MODOS DE CARGA

¿Cómo se procede cuando la carga es una mezcla de cargas, digamos axial, de flexión y de torsión? (Continuación)

Usaremos la teoría de fallas de energía de distorsión:

- 1) Para el límite de resistencia a la fatiga, S_e , use los modificadores del límite de resistencia a la fatiga, k_a , k_b y k_c , para la flexión.
- 2) El factor de carga de la carga axial puede considerarse al dividir el esfuerzo axial alternante mediante el factor de carga axial de 0.85.

Para el caso común de un eje con esfuerzos debidos a flexión, esfuerzos cortantes por torsión y esfuerzos axiales, el esfuerzo de von Mises de los dos elementos de esfuerzo pueden escribirse como:

$$\sigma'_a = \left\{ \left[(K_f)_{\text{flexión}} (\sigma_a)_{\text{flexión}} + (K_f)_{\text{axial}} \frac{(\sigma_a)_{\text{axial}}}{0.85} \right]^2 + 3 \left[(K_{fs})_{\text{torsión}} (\tau_a)_{\text{torsión}} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$$\sigma'_m = \left\{ \left[(K_f)_{\text{flexión}} (\sigma_m)_{\text{flexión}} + (K_f)_{\text{axial}} (\sigma_m)_{\text{axial}} \right]^2 + 3 \left[(K_{fs})_{\text{torsión}} (\tau_m)_{\text{torsión}} \right]^2 \right\}^{1/2}$$