

## CAPITULO XII

### INTRODUCCION A LA FATIGA DE MATERIALES

#### 12.1 INTRODUCCION

Cuando las cargas aplicadas sobre un elemento pasan de estáticas a fluctuantes, generalmente se alcanza fractura en el material a un nivel inferior. La falla, llamada *falla por fatiga*, es causada por la propagación de una grieta en un elemento que se encuentra bajo esfuerzos de tracción y/o compresión de naturaleza fluctuante. El fenómeno comienza con una pequeña grieta en alguna discontinuidad del material tal como un cambio de sección, un chavetero, un orificio o simplemente un defecto de fabricación (rayaduras, muescas). El efecto de concentración de tensiones se hace mayor y se extiende rápidamente. Al aumentar el tamaño de la grieta, disminuye el área de esfuerzo, lo que hace que el esfuerzo vaya en aumento cada vez hasta romper el material en forma repentina. La falla por fatiga se caracteriza por 2 áreas distintas: formación y desarrollo de la grieta, y la ruptura final. Cuando las piezas fallan por resistencia estática sufren una deformación muy grande debido a que el esfuerzo excedió el límite de fluencia. En la fatiga, no hay señal de falla, es repentina y total y, por tanto, peligrosa.

#### 12.2 DIAGRAMA S-N

Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas de fatiga, las probetas se someten a fuerzas repetidas o variables de magnitudes especificadas y así, se cuentan los ciclos o alteraciones del esfuerzo que soporta el material hasta su ruptura. Haciendo un gran número de pruebas se logra un *diagrama S-N* (esfuerzo-número de ciclos). Las ordenadas corresponden a las resistencias  $S_f$  a un cierto número de ciclos, como se ilustra en la Figura 12.1.

Para aleaciones no-ferrosas y materiales no ferrosos tal curva no es igual a la dibujada anteriormente (no existe la parte horizontal).

Para aceros entonces se define el *límite de resistencia a la fatiga*  $S_e'$  como el valor de  $S_f$  en la parte horizontal del diagrama S-N. Empíricamente se ha encontrado que:

$$\bar{S}_e' = 0.5 S_{UT} \quad \text{para } S_{UT} \leq 200 \text{ Kpsi} \quad (12.1)$$

$$\bar{S}_e' = 100 \overset{\text{Kpsi}}{S_{UT}} \quad \text{para } S_{UT} > 200 \text{ Kpsi} \quad (12.2)$$

donde  $S_{UT}$  es la resistencia última o resistencia a la tracción del material. Estos valores son para uso de los estudiantes exclusivamente. En el caso de la ingeniería de diseño se dispone de otras opciones tales como procedimientos experimentales para obtener la media y desviación standard del límite de fatiga. Nótese que la marca prima de  $S_e'$  indicará el valor del límite de resistencia a la fatiga para la probeta que se ha usado en el test de viga rotatoria del diagrama S-N, que corresponde a la probeta rotando con un rodamiento en el extremo, cargado con una cierta carga, como se ilustra en la Figura 12.2.

$$\begin{aligned} S_e' &= 0.5 S_{UT} & S_{UT} &\leq 1400 \text{ MPa} \\ S_e' &= 700 \text{ MPa} & S_{UT} &> 1400 \text{ MPa} \end{aligned}$$



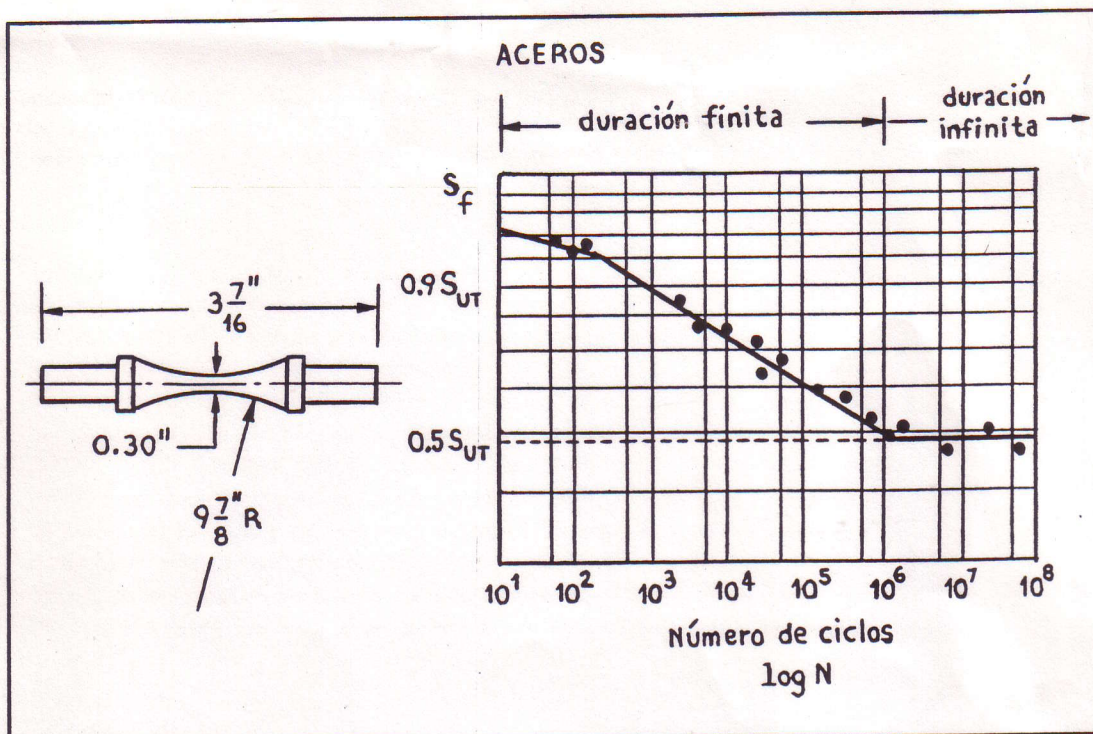


Fig. 12.1

Los tipos de cargas fluctuantes se pueden definir como sigue:

**1. Carga fluctuante senoidal:** (Figura 12.3) Aquí se define  $\sigma_m$  como el esfuerzo medio y  $\sigma_a$  como el esfuerzo amplitud.

**2. Carga repetida:** (Figura 12.4) El esfuerzo mínimo,  $\sigma_{min}$ , es nulo.

**3. Alternante senoidal con inversión completa:** (Figura 12.5) Donde el esfuerzo medio  $\sigma_m$  es nulo, el esfuerzo máximo es igual al esfuerzo mínimo y el esfuerzo amplitud es igual a la diferencia entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo.

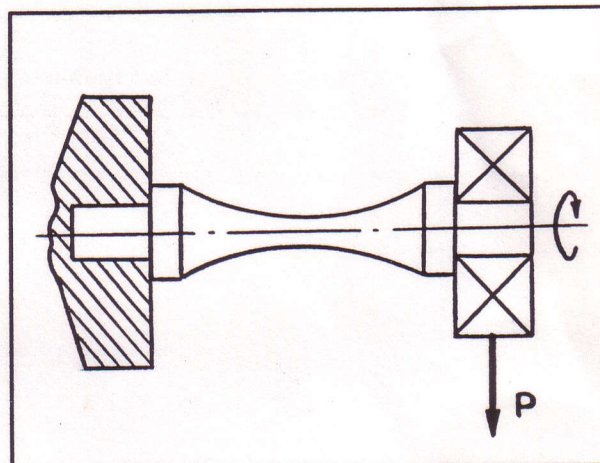


Fig. 12.2

En el caso de esfuerzo uniaxial, el **esfuerzo amplitud** y el **esfuerzo medio** se definen de acuerdo a las relaciones siguientes:

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} \quad (12.3)$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \quad (12.4)$$



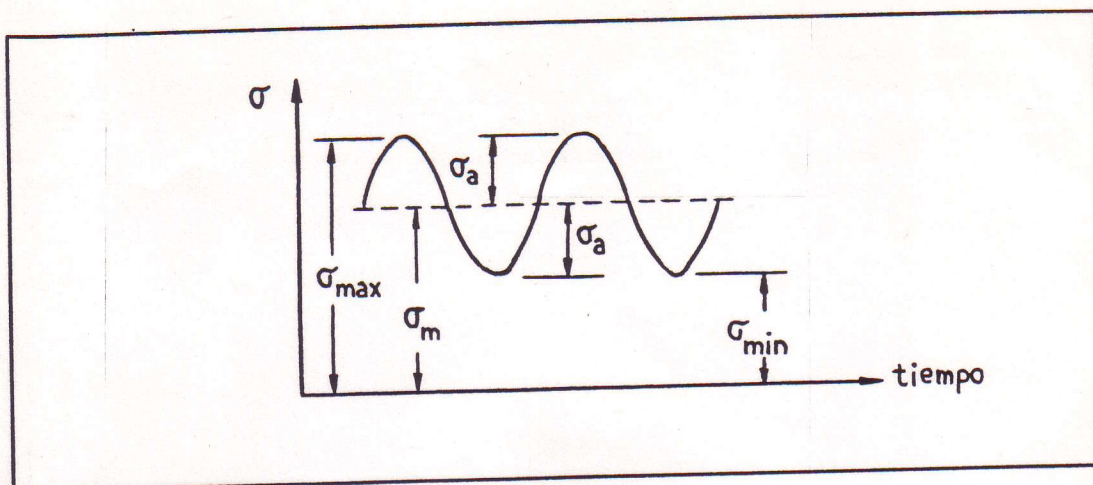


Fig. 12.3

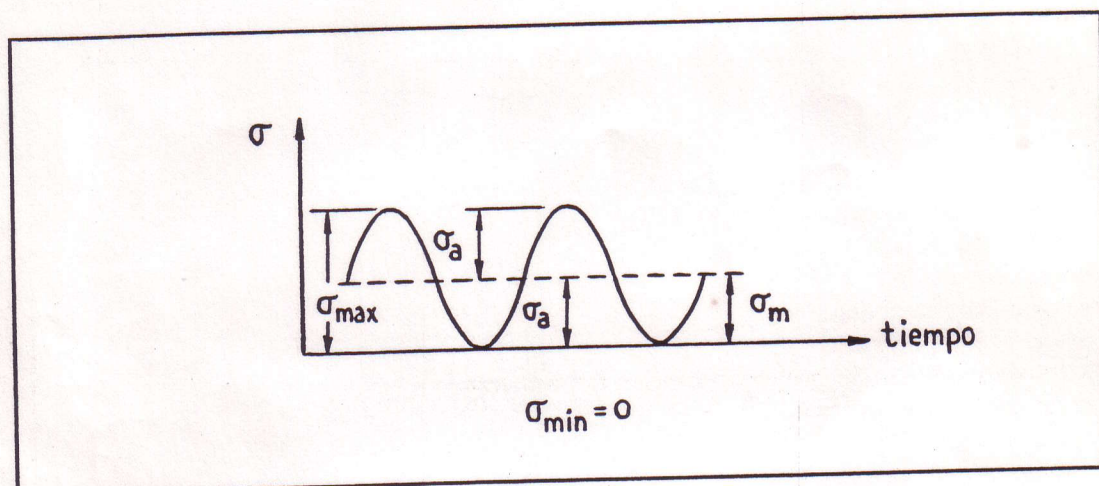


Fig. 12.4

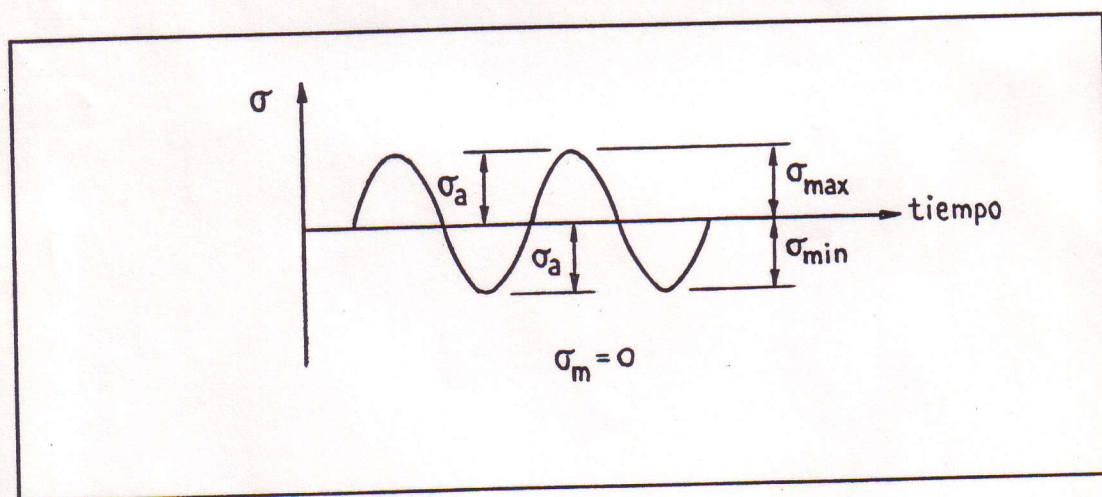


Fig. 12.5



En el caso de esfuerzo biaxial (en dos dimensiones), estos mismos esfuerzos se definen mediante las relaciones de los esfuerzos de Von-Mises:

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{1a}^2 - \sigma_{1a}\sigma_{2a} + \sigma_{2a}^2} \quad (12.5)$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{1m}^2 - \sigma_{1m}\sigma_{2m} + \sigma_{2m}^2} \quad (12.6)$$

### 12.3 FACTORES QUE MODIFICAN LA RESISTENCIA A LA FATIGA

Para un elemento (pieza) de máquina, de un cierto material, se tiene que el límite de resistencia a la fatiga se relaciona con el límite de resistencia a la fatiga de la probeta rotatoria por:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (12.7)$$

donde cada término es:

$S_e$  = Límite de resistencia a la fatiga del elemento.

$S'_e$  = Idem para la muestra de viga rotatoria.

$k_a$  = Factor de superficie.

$k_b$  = Factor de tamaño.

$k_c$  = Factor de confiabilidad.

$k_d$  = Factor de temperatura.

$k_e$  = Factor de modificación por concentración del esfuerzo.

$k_f$  = Factor de efectos diversos.

Cada uno de estos factores se estudiará en forma particular en lo que sigue.

#### 12.3.1 FACTOR DE SUPERFICIE ( $k_a$ )

Este factor depende del acabado superficial y de la resistencia a la tracción del material, como se muestra en la Figura 12.6.

#### 12.3.2 FACTOR DE TAMAÑO ( $k_b$ )

Este factor toma en cuenta las dimensiones, la forma y el método de carga de los elementos de máquina que tienen diferente tamaño y sección transversal que el de la viga rotatoria. Para barras redondas en flexión y torsión, según la Teoría de Kuguel, este factor se determina por las relaciones:

$$k_b = \begin{cases} 0.869 d^{-0.097} & 0.3'' \leq d \leq 10'' \\ 1 & d \leq 0.3'' \text{ ó } d \leq 8 \text{ mm} \\ 1.189 d^{-0.097} & 8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (12.8)$$

y para barras sometidas a carga axial:



$$k_b = \begin{cases} 0.71 & \text{cuando se efectúan pruebas} \\ 0.60 & \text{cuando no se realizan pruebas} \\ & \text{(caso más desfavorable)} \end{cases} \quad (12.9)$$

En todo caso, el valor de  $k_b$  tiene una media de 0.85.

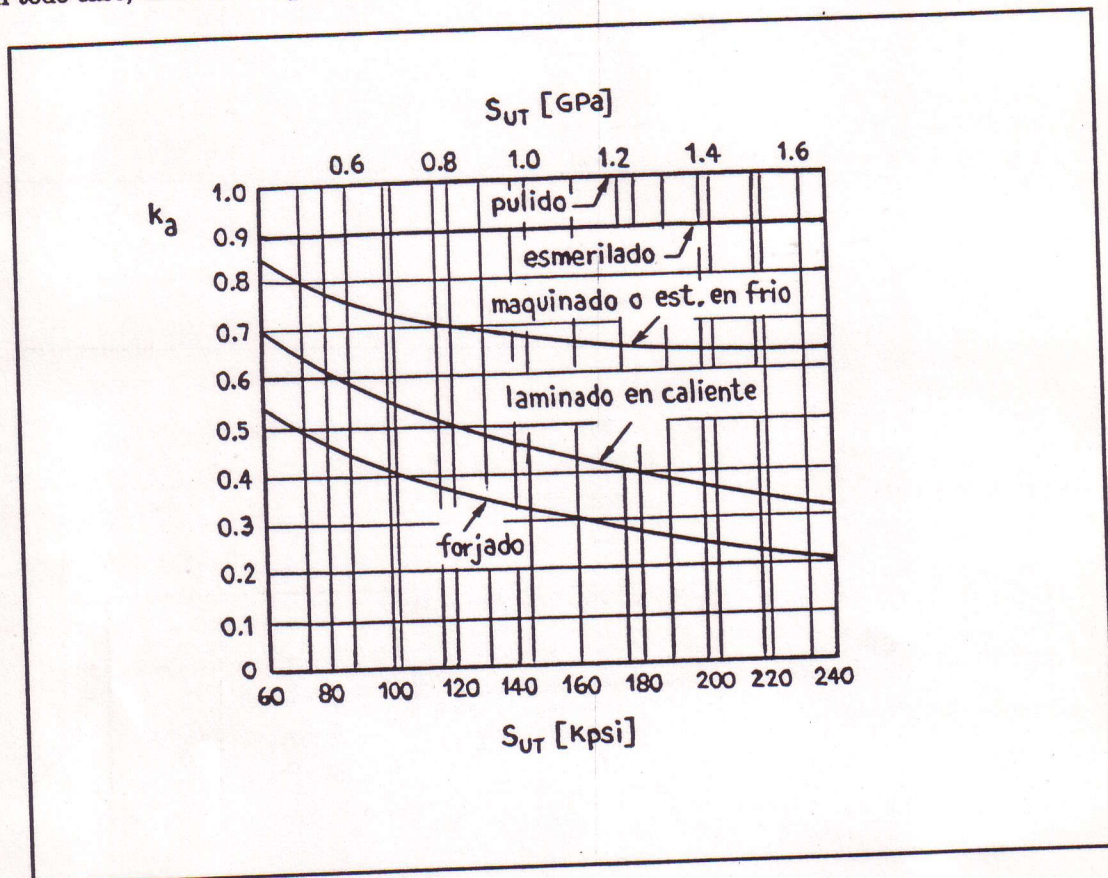


Fig. 12.6

### 12.3.3 FACTOR DE CONFIABILIDAD ( $k_c$ )

Usaremos factores de confiabilidad correspondientes a una desviación estándar de 8% del límite de fatiga. Luego, para obtener el límite de fatiga correspondiente a una confiabilidad especificada  $R$ , sólo hay que restar cierto número de desviaciones estándar del límite medio de resistencia a la fatiga. Por lo tanto:

$$k_c = 1 - 0.08 Z_r \quad (12.10)$$

La relación entre la confiabilidad  $R$ , la variable estandarizada  $Z_r$  y el factor de confiabilidad  $k_c$  se ilustran en la Tabla 12.1.



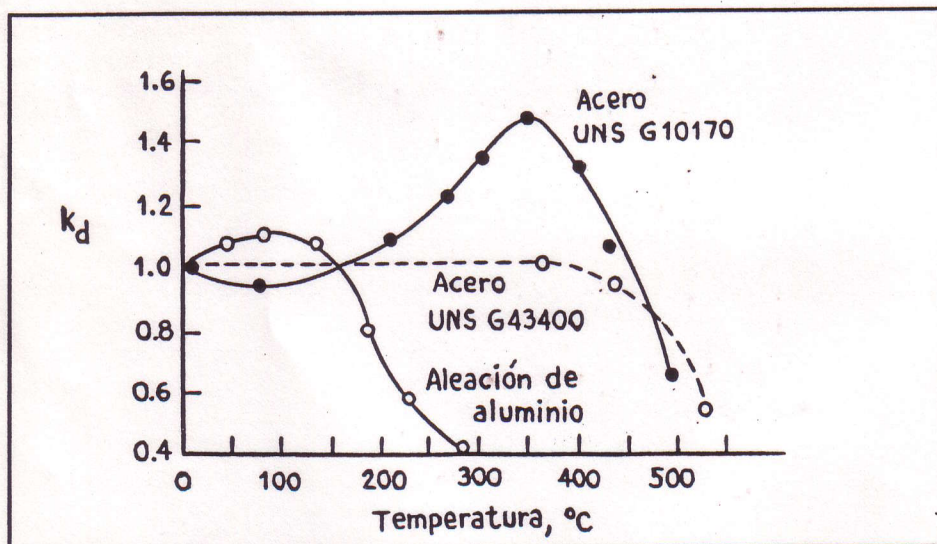
**TABLA 12.1** Relación entre  $R$ ,  $Z_r$  y el factor  $k_c$ .

Confiabilidad	Variable $Z_r$	$k_c$
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
0.9999	3.719	0.702

#### 12.3.4 FACTOR DE TEMPERATURA ( $k_d$ )

Obsérvese la Figura 12.7 para un acero de aleación UNS G 43400, que retiene aproximadamente la misma resistencia a la fatiga hasta una temperatura de 450° C. Por lo tanto, a temperaturas relativamente bajas tendremos  $k_d = 1$ .

En general, dependiendo del material de diseño, debería realizarse pruebas empíricas para determinar el valor de  $k_d$  a temperaturas algo mayor que la ambiente.



**Fig. 12.7**

#### 12.3.5 FACTOR DE CONCENTRACION DE ESFUERZOS ( $k_s$ )

En general, los elementos mecánicos no tienen sección transversal constante y tienen irregularidades diversas. Por ejemplo, los ejes deben tener hombros o resaltos de tal manera de alojar cojinetes. Igualmente, los engranajes deben instalarse con chavetas, por lo tanto los ejes deben tener chaveteros o ranuras de alojamiento. En general, todos los elementos requieren de



agujeros, ranuras de lubricación y aberturas o muescas de diversas clases.

Por otra parte, toda discontinuidad altera la distribución del esfuerzo en la proximidad de aquella característica. Estas áreas son llamadas áreas de concentración del esfuerzo. Existe un *factor de concentración del esfuerzo*, teórico o geométrico,  $K_t$  o  $K_{ts}$ , el cual se usa para relacionar el esfuerzo máximo real en la discontinuidad con el esfuerzo nominal. Estos factores no necesitan ser aplicados en el caso de esfuerzos estáticos en materiales dúctiles, pero sí deben emplearse en materiales de alta resistencia, baja ductilidad, endurecimiento superficial y/o trabajados en frío intensamente. Para obtener una mayor información al respecto, revítese la sección de concentración de esfuerzos del Capítulo XI.

En carga fluctuante se define el factor de esfuerzos en el caso de fatiga,  $K_f$ , como el límite de fatiga de probetas sin discontinuidades dividido por el límite de fatiga de probetas con discontinuidades. El factor de modificación por concentración del esfuerzo será el inverso del factor de esfuerzos en el caso de fatiga, es decir,  $k_s = 1/K_f$ . Por otra parte, la sensibilidad a las ranuras o muescas se define por:

$$q = \frac{(K_f - 1)}{(K_t - 1)} \quad (12.11)$$

donde  $0 \leq q \leq 1$ . Si  $q=0$ , entonces  $K_f=1$  y el material no tendrá sensibilidad a las ranuras. Si  $q=1$ , entonces  $K_f=K_t$  y el material será completamente sensible. El valor de  $q$  se obtiene de un diagrama empírico como el mostrado en la Figura 12.8 para algunos aceros.

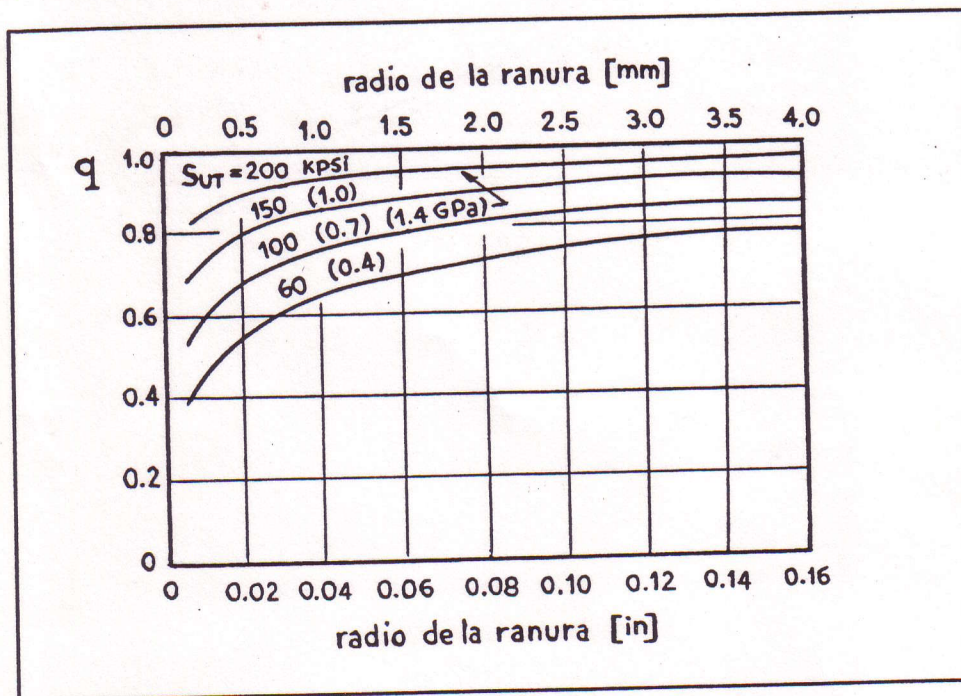


Fig. 12.8

De la ecuación (12.11) se tiene que

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (12.12)$$

$K_t$  se obtiene de los diagramas de concentración de esfuerzo que se muestran en el anexo D.

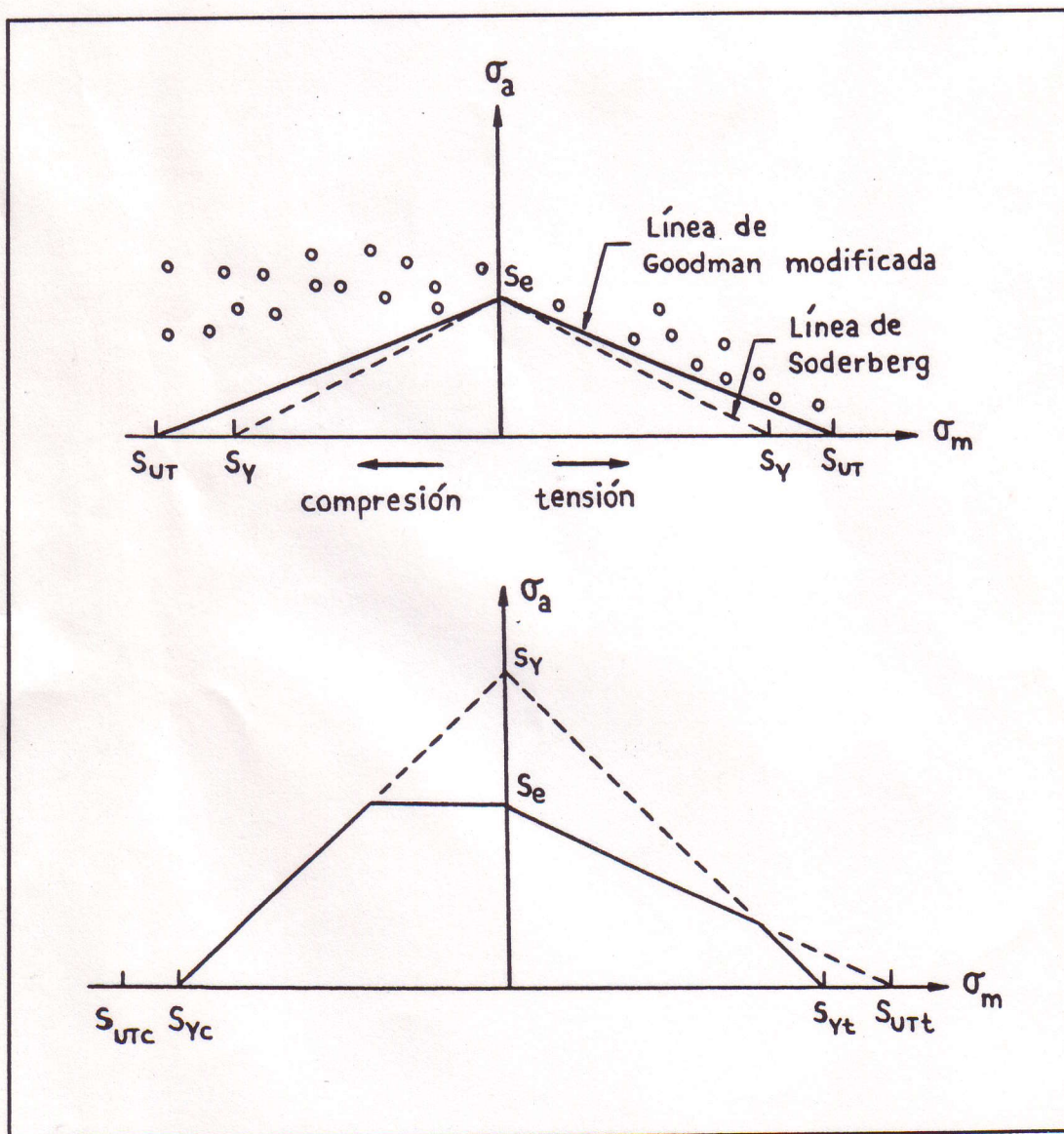


### 12.3.6 FACTOR DE EFECTOS DIVERSOS ( $k_f$ )

En este factor deben incluirse efectos adicionales como la corrosión, temple superficial, o simplemente como un factor de corrección de seguridad en caso de que alguno de los factores anteriores no haya sido completamente determinado.

### 12.4 DIAGRAMA DE FATIGA

Para efectos del diseño, se tiene a disposición un diagrama obtenido empíricamente por Soderberg, que se muestra en la Figura 12.9, y que usa como criterio una línea trazada de  $S_e$  (límite de resistencia a la fatiga) a  $S_y$  (esfuerzo de fluencia), ya que la fluencia también se utiliza para definir la falla. Sin embargo, se obtienen resultados más satisfactorios cuando se emplea el *diagrama de fatiga* de la Figura 12.10, que corresponde a la reunión o colección de los resultados de dos criterios (Goodman modificado y Soderberg). Estos resultados son válidos para los aceros.



Figs. 12.9 y 12.10