

Falla bajo cargas cíclicas – Fatiga en metales

Carlos Armando De Castro P.

1. Introducción

Los metales (materiales dúctiles) sujetos a cargas cíclicas o que varían en el tiempo muchas veces pueden presentar falla frágil a esfuerzos menores a su esfuerzo de fluencia debido a un fenómeno conocido como “*fatiga*” del material. Ésta se presenta por crecimiento de micro-grietas en el material que crecen con cada ciclo de carga; generalmente el crecimiento de las grietas inicia en un punto de concentración de esfuerzos. Un material que ha fallado por fatiga presenta unas marcas llamadas “*líneas de playa*” y un área de fractura frágil.

La investigación ha mostrado que para un esfuerzo fluctuante no importa la forma de la fluctuación sino los picos de ésta, es decir, los valores máximo y mínimo del esfuerzo.

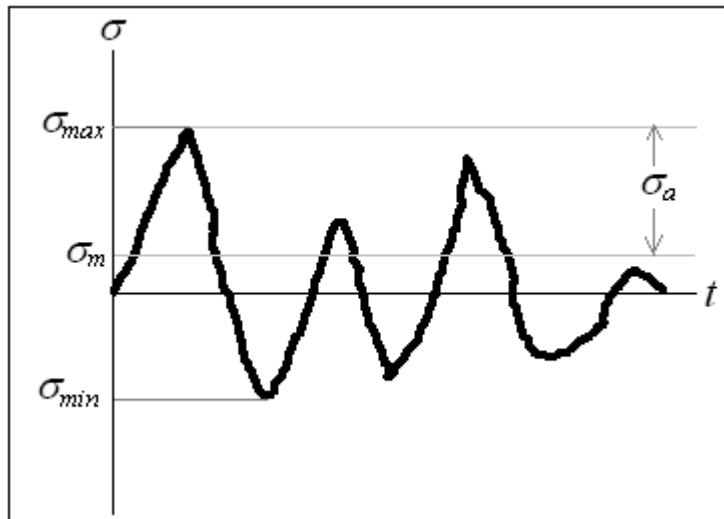


Figura 1.1. Caracterización de esfuerzos fluctuantes.

En el análisis de fatiga se utilizan la amplitud del esfuerzo (σ_a) y el esfuerzo medio (σ_m), que son:

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

(1.1)

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

(1.2)

La fatiga es un fenómeno estocástico y no se conocen muy bien sus mecanismos, aunque para efectos de resolver problemas de ingeniería se han desarrollado métodos determinísticos como el de Esfuerzo-Vida, el de Deformación-Vida, y el Método de

Mecánica de la Fractura Lineal Elástica (LEFM). El LEFM es usado para predecir la vida restante de un componente una vez se ha detectado una grieta en el material; el método más usado cuando no se detectan grietas es el primero debido a su facilidad para ser implementado, si bien no es el más preciso de todos.

En el presente escrito se presentan los métodos LEFM y Esfuerzo-Vida para aceros, junto con algunos criterios para determinar si un material fallará por fatiga.

2. Método de la Mecánica de la Fractura

Utilizado cuando se ha detectado una grieta de tamaño a_i en la segunda etapa de crecimiento.

Para un material sujeto a un rango de esfuerzos de tensión $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, el rango del factor de intensidad de esfuerzos es:

$$\Delta K_I = \beta\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.1)$$

Donde a es el tamaño de la grieta y β es el factor geométrico. Se utiliza la *ecuación de Paris* para el crecimiento de la grieta con el número de ciclos:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m = C(\beta\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m \quad (2.2)$$

Donde C y m son constantes del material y se hallan en tablas o por medio de la experimentación. El material fallará cuando la grieta alcance un tamaño crítico

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\beta\sigma_{\max}} \right)^2 \quad (2.3)$$

Donde K_{IC} es la tenacidad a la fractura del material. Entonces, el número de ciclos restantes hasta la falla del material es:

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\beta\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m} \quad (2.4)$$

Como β varía con el tamaño de la grieta, la integral en 2.4 se evalúa generalmente en forma numérica. Si se asume un factor geométrico constante, tenemos:

$$N_f = \frac{a_f^{1-m/2} - a_i^{1-m/2}}{C(\beta\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m (1-m/2)} \quad (2.5)$$

3. Método Esfuerzo-Vida

Basado en la experimentación, tiene su fundamento en las curvas S-N, que representan los números de ciclos a los cuales una probeta cuidadosamente pulida falla a cierto esfuerzo aplicado.

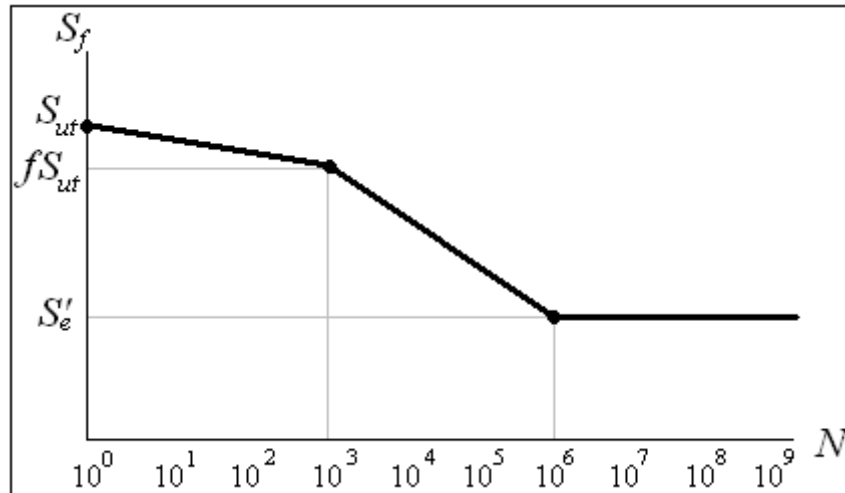


Figura 3.1. Curva S-N para un acero.

Para $1 \leq N \leq 1000$ se considera *fatiga de bajos ciclos*, para $1000 \leq N \leq 10^6$ se considera *fatiga de altos ciclos* y para aceros $N > 10^6$ se considera que es *vida infinita*.

3.1. El límite de endurecimiento

El *límite de endurecimiento* (S'_e) es el esfuerzo por debajo del cual el material no fallará por fatiga. La prima (') se reserva para la probeta del ensayo de fatiga, la forma de hallar el límite de endurecimiento para un elemento de máquina se verá más adelante.

Los aceros alcanzan el límite de endurecimiento entre 10^6 y 10^7 ciclos. Los aluminios y algunos otros metales no presentan límites de endurecimiento.

Para aceros, la experimentación ha mostrado que el límite de endurecimiento es aproximadamente:

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut}, & S_{ut} < 200\text{kpsi}(1400\text{MPa}) \\ 100\text{kpsi}, & S_{ut} > 200\text{kpsi} \\ 700\text{MPa}, & S_{ut} > 1400\text{MPa} \end{cases} \quad (3.1)$$

Para una pieza real de una máquina, el límite de endurecimiento se modifica con los factores de Marin, los cuales han mostrado tener una mejor correlación con los datos experimentales si se aplican al límite de endurecimiento de la probeta de la siguiente forma:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (3.2)$$

Factor de acabado superficial k_a
Factor de tamaño k_b
Factor de carga k_c
Factor de temperatura k_d
Factor de confiabilidad k_e
Factores misceláneos k_f

Los factores de Marin se hallan de tablas y gráficas que no se mostrarán en este escrito.

3.2. Fatiga de altos ciclos

Para aproximar la curva entre 10^3 y 10^6 ciclos, Mischke recomienda utilizar la relación:

$$S_f = \sigma'_F (2N)^b \quad (3.3)$$

Donde σ'_F es el *esfuerzo real* correspondiente a la fractura en un ciclo, y se aproxima para aceros con HB<500 como

$$\sigma'_F \approx S_{ut} + 50 \text{ kpsi}, \quad \sigma'_F \approx S_{ut} + 345 \text{ MPa} \quad (3.4)$$

En 10^3 ciclos, se considera que el esfuerzo de fatiga es una fracción f de la resistencia a la tensión del material, $(S_f)_{10^3} = fS_{ut}$, entonces en 3.3:

$$fS_{ut} = \sigma'_F (2 \times 10^3)^b$$

$$f = \frac{\sigma'_F (2 \times 10^3)^b}{S_{ut}} \quad (3.5)$$

En 10^6 ciclos el material alcanza su límite de endurecimiento, entonces en 3.3:

$$S'_e = \sigma'_F (2 \times 10^6)^b$$

$$b = \frac{\log(S'_e / \sigma'_F)}{\log(2 \times 10^6)} \quad (3.6)$$

La curva S-N entre 10^3 y 10^6 ciclos también es aproximada como:

$$S_f = aN^b \quad (3.7)$$

En 10^3 ciclos: $fS_{ut} = a(10^3)^b$

En 10^6 ciclos: $S'_e = a(10^6)^b$

Entonces las constantes a y b son:

$$a = \frac{(fS_{ut})^2}{S'_e} \quad (3.8)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{fS_{ut}}{S'_e}\right) \quad (3.9)$$

3.3. Fatiga de bajos ciclos

La curva S-N se aproxima como una recta en la escala logarítmica entre $1 \leq N \leq 1000$, en $N = 1$, $S_f = S_{ut}$; en $N = 10^3$, $S_f = f S_{ut}$, entonces para bajos ciclos la curva S-N se aproxima como

$$S_f \geq S_{ut} N^{(\log f)/3} \quad (3.10)$$

4. Concentración de esfuerzos y sensibilidad a las muescas

Para una pieza con muescas, agujeros, discontinuidades o reducción de área transversal, el esfuerzo máximo bajo carga estática es

$$\sigma = K_t \sigma_0 \quad (4.1)$$

Donde K_t es el *factor de concentración de esfuerzos* (puede hallarse en tablas y curvas) y σ_0 es el esfuerzo nominal en ese punto de la pieza.

Para análisis de fatiga, se utiliza el factor de concentración de esfuerzos en fatiga K_f tal que

$$\sigma = K_f \sigma_0 \quad (4.2)$$

Los factores K_t y K_f están relacionados por la *sensibilidad a la muesca*, q , así:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (4.3)$$

Hay curvas experimentales para q en función de la geometría de las piezas. Cuando no se tiene certeza sobre el valor de q , se recomienda asumirlo como $q = 1$ y $K_t = K_f$.

5. Teorías de falla por fatiga

Diversas teorías han sido desarrolladas para determinar si un material fallará por fatiga. Para un factor de seguridad n , tenemos los siguientes criterios:

- **Línea de Soderberg:**

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

(5.1)

- **Goodman modificado:**

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

(5.2)

- **Gerber:**

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

(5.3)

- **Elíptica ASME:**

$$\left(\frac{n\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{n\sigma_m}{S_y}\right)^2 = 1$$

(5.4)

RESUMEN DE LAS ECUACIONES DE FATIGA

MÉTODO DE MECÁNICA DE LA FRACTURA

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\beta \sigma_{\max}} \right)^2$$

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a})^m}$$

$$N_f = \frac{a_f^{1-m/2} - a_i^{1-m/2}}{C(\beta \Delta \sigma \sqrt{\pi})^m (1-m/2)},$$

cuando β es constante.

MÉTODO ESFUERZO-VIDA. ALTOS CICLOS

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut}, & S_{ut} < 200\text{kpsi}(1400\text{MPa}) \\ 100\text{kpsi}, & S_{ut} > 200\text{kpsi} \\ 700\text{MPa}, & S_{ut} > 1400\text{MPa} \end{cases}$$

$$\sigma'_F \approx S_{ut} + 50\text{kpsi}, \quad \sigma'_F \approx S_{ut} + 345\text{MPa}$$

$$b = \frac{\log(S'_e / \sigma'_F)}{\log(2 \times 10^6)}$$

$$f = \frac{\sigma'_F}{S_{ut}} (2 \times 10^3)^b$$

$$S_f = \sigma'_F (2N)^b$$

$$a = \frac{(fS_{ut})^2}{S'_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{fS_{ut}}{S'_e} \right)$$

$$S_f = aN^b$$

CRITERIOS DE FALLA POR FATIGA

- **Línea de Soderberg:**

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

- **Goodman modificado:**

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

- **Gerber:**

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

- **Elíptica ASME:**

$$\left(\frac{n\sigma_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{n\sigma_m}{S_y} \right)^2 = 1$$