

3. LA FATIGA

La fatiga es un proceso de degeneración de un material sometido a cargas cíclicas de valores por debajo de aquellos que serían capaces de provocar su rotura mediante tracción. Durante dicho proceso se genera una grieta que, si se dan las condiciones adecuadas crecerá hasta producir la rotura de la pieza al aplicar un número de ciclos suficientes. El número de ciclos necesarios dependerá de varios factores como la carga aplicada, presencia de entallas...

Si bien no se ha encontrado una respuesta que explique totalmente la fatiga se puede aceptar que la fractura por fatiga se debe a deformaciones plásticas de la estructura de forma similar a como ocurre en deformaciones monodireccionales producidas por cargas estáticas, con la diferencia fundamental de que bajo cargas cíclicas se generan deformaciones residuales en algunos cristales.

Incluso bajo cargas pequeñas pueden aparecer estas bandas de deslizamiento, aumentando con el número de ciclos llegando a provocar la aparición de una fisura. Este proceso inicial, que se puede denominar nucleación, se da preferentemente en granos próximos a la superficie produciendo los efectos de intrusión y extrusión, facilitando la existencia de la intrusión la propagación de la grieta debido a la tracción.

También puede iniciarse el proceso en puntos que presenten algún tipo de irregularidad como inclusiones, discontinuidades superficiales, etc.

La siguiente fase es la de crecimiento de grieta que puede dividirse a su vez en dos fases. La primera fase supone el crecimiento de una grieta corta en pequeñas distancias del tamaño de pocos. En esta fase, dado que el tamaño de la grieta es comparable al de los elementos característicos de la microestructura del material, dicha microestructura (tamaño de grano, orientación de los mismos...) afecta en gran medida al crecimiento de la grieta.

La segunda fase consiste en un crecimiento de la grieta normal al plano principal de tensiones. En este caso de grietas más largas la microestructura del material afecta en menor medida al crecimiento de la grieta dado que la zona de plastificación creada por el propio crecimiento de la grieta es mucho mayor que las dimensiones características de la microestructura.

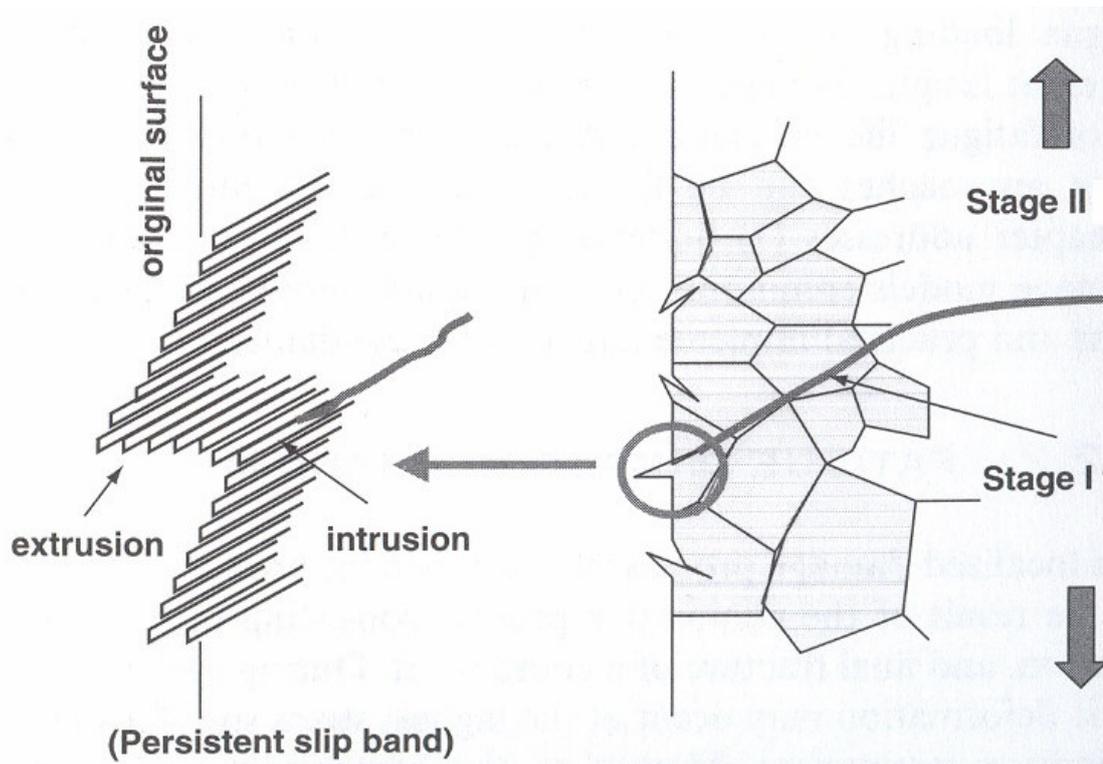


Fig. 3-1. Bandas de deslizamiento y fases de crecimiento de una grieta.

La nucleación junto con la fase I suele denominarse *proceso de iniciación de la grieta*, denominándose a la fase II *propagación de la grieta*. En la siguiente imagen pueden observarse claramente ambos procesos así como la superficie de la rotura final por tracción.



Fig. 3-2. Superficie de rotura por fatiga.

No es posible poner un límite claro entre las longitudes de grieta de iniciación y propagación ya que éstas dependerán de cómo se definan.

Para fatiga a alto número de ciclos (por encima de los 10.000) la mayor parte de la vida del material corresponde al proceso de iniciación. Por el contrario, para fatiga a bajo número de ciclos (por debajo de 10.000), la mayor parte de la vida del material transcurre durante el proceso de crecimiento.

En procesos de daño por fatiga bajo esfuerzos axiales o de flexión pueden aparecer unas marcas en la superficie de rotura de forma más o menos circular y centradas en el punto de inicio de la grieta delimitando claramente varias zonas. Cada una de estas marcas indica el punto en que finaliza un proceso de carga y se inicia el siguiente. Además, dentro de estas zonas aparecen otras marcas menos acentuadas que corresponden a cada uno de los ciclos de carga.

El daño por fatiga dependerá tanto del número de ciclos de carga comprendido en cada uno de estos procesos de carga así como de la tensión aplicada. Existen procedimientos para conocer el daño acumulado que escapan al alcance de este proyecto cuya finalidad es el establecimiento de la curva de comportamiento a fatiga del material, para lo que se realizarán ensayos con una carga constante y durante los que no se realizará ninguna parada.

Baste por tanto saber que para conocer el daño provocado por circunstancias más complejas es necesario calcular el daño acumulado para poder utilizar los datos que se van a obtener.

3.1 Ensayos de fatiga, curva S-N

Desde mediados del siglo XIX se ha empleado un sistema de análisis de fatiga y diseño, conocido como vida a fatiga o curva S-N, caracterizándose por ser la tensión alterna el parámetro principal de la vida a fatiga y por darse bajo condiciones de fatiga a alto número de ciclos (alto número de ciclos antes del fallo y pequeña deformación plástica debida a la carga cíclica).

Durante el ensayo se somete a la pieza a tensiones alternas hasta el fallo de la misma, definiéndose la tensión alterna como la mitad de la diferencia entre la tensión máxima y mínima aplicadas durante un ciclo (S_{\max} y S_{\min} respectivamente).

$$S_a = \frac{(S_{\max} - S_{\min})}{2} \quad (3.1.1)$$

Se considera que las tensiones de compresión son negativas y las de tracción positivas por convención. En la siguiente figura se muestra el significado de estos valores.

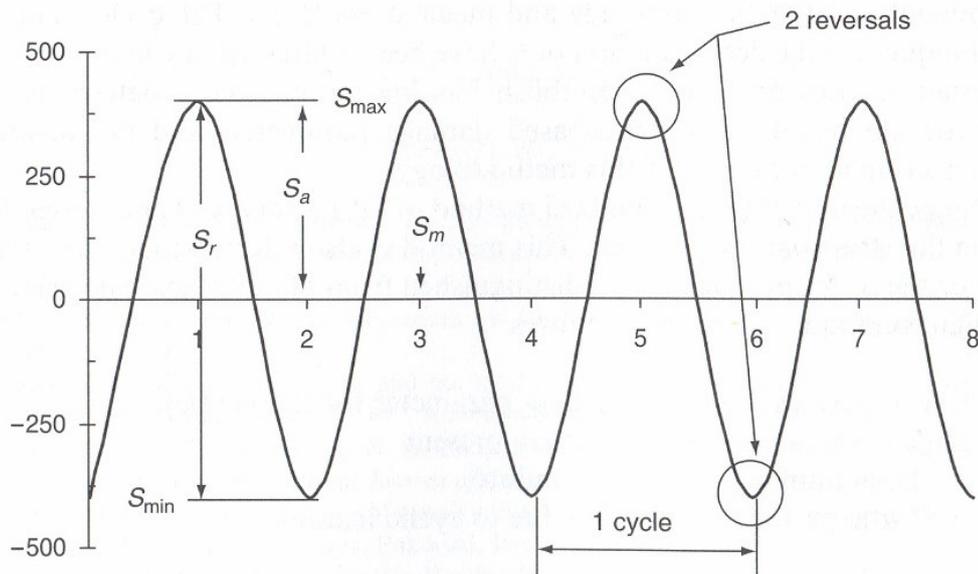


Fig. 3.1-1. Carga cíclica de amplitud constante.

Durante los ensayos la variable independiente (controlada) es la tensión aplicada siendo la variable dependiente el número de ciclos soportados por la probeta (N_f). Además se define la tensión media:

$$S_m = \frac{(S_{\max} + S_{\min})}{2} \quad (3.1.2)$$

Normalmente se realizan ensayos con tensión media nula, es decir, con tensiones oscilando entre $+S_a$ y $-S_a$. Finalmente se definen otros dos parámetros conocidos como coeficiente de asimetría de la carga (R) y amplitud (A).

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} \quad (3.1.3)$$

$$A = \frac{S_a}{S_m} \quad (3.1.4)$$

Normalmente se realizan ensayos con distintos valores de S_a y $R = -1$, empleando probetas preparadas de la misma manera. Los resultados de dichos ensayos se representan en una escala logarítmica en la que aparecen adoptando la forma de una recta aproximadamente. En el caso de materiales con un límite a fatiga aparece un tramo final horizontal que es el citado límite de fatiga y que en el caso del material que se está estudiando no aparece.

Los resultados se aproximan habitualmente mediante mínimos cuadrados a una expresión de la forma:

$$S_a = S'_f (2N_f)^b \quad (3.1.5)$$

La tensión que aparece en las expresiones depende del tipo de ensayos realizados.

$$S = \frac{M}{W} (\text{Flexión}) \quad (3.1.6)$$

$$S = \frac{P}{A} (\text{Tracción}) \quad (3.1.7)$$

$$S = \frac{T}{W_T} (\text{Torsión}) \quad (3.1.8)$$

Donde I, A y J son el momento de inercia, el área de la sección y el momento polar de inercia respectivamente.

Hay otro aspecto interesante en lo tocante a la fatiga y es su carácter fuertemente aleatorio. Debido a la falta de homogeneidad en las características microestructurales incluso dentro de piezas de un mismo material tratado de una misma manera, sucede que la velocidad a la que ocurre el crecimiento y, sobre todo, la iniciación de la grieta puede variar considerablemente dando lugar a resultados con una dispersión importante. Dicha dispersión es aún más importante para cargas reducidas en las que la iniciación adquiere aún más importancia.

Es por esta razón por la que se ha de realizar un tratamiento estadístico de la curva S-N, a fin de obtener una expresión que aproxime el comportamiento a fatiga del material a una recta en escala logarítmica. Se establece como guía para el número de ensayos que es necesario realizar la siguiente sugerencia:

- 6 a 12 muestras para obtener datos preliminares.
- 12 a 24 muestras para permitir diseños fiables a partir de los resultados.

Se define entonces el tanto por ciento de replicación (PR), en función del número de niveles de carga aplicados (L) y el tamaño de la muestra (n_s).

$$PR = 100(1 - L/n_s) \quad (3.1.9)$$

Recomendándose:

- 17-33 para examen preliminar.
- 33-50 para investigación y desarrollo.
- 50-75 para resultados que puedan usarse en diseño.
- 75-88 para un examen fiable.

Los resultados obtenidos de dichos ensayos se aproximan mediante mínimos cuadrados a una expresión del tipo de las presentadas anteriormente y se obtienen intervalos de confianza para indicar la fiabilidad de los resultados.

3.2 Factores que influyen en la fatiga

El comportamiento a fatiga se aproxima pues por una recta en representación logarítmica, llegando a una tensión por debajo de la cual no se produce fallo por fatiga, siendo éste el llamado límite de fatiga. Sin embargo, dicho límite no existe en ciertos materiales y tal es el caso de las aleaciones de aluminio como la que se está estudiando.

Sin embargo, para tener en cuenta los distintos factores que influyen en la fatiga, la curva se modifica manteniendo constante el punto cuya vida es de mil ciclos y se modifica el límite de fatiga de acuerdo a ciertos factores.

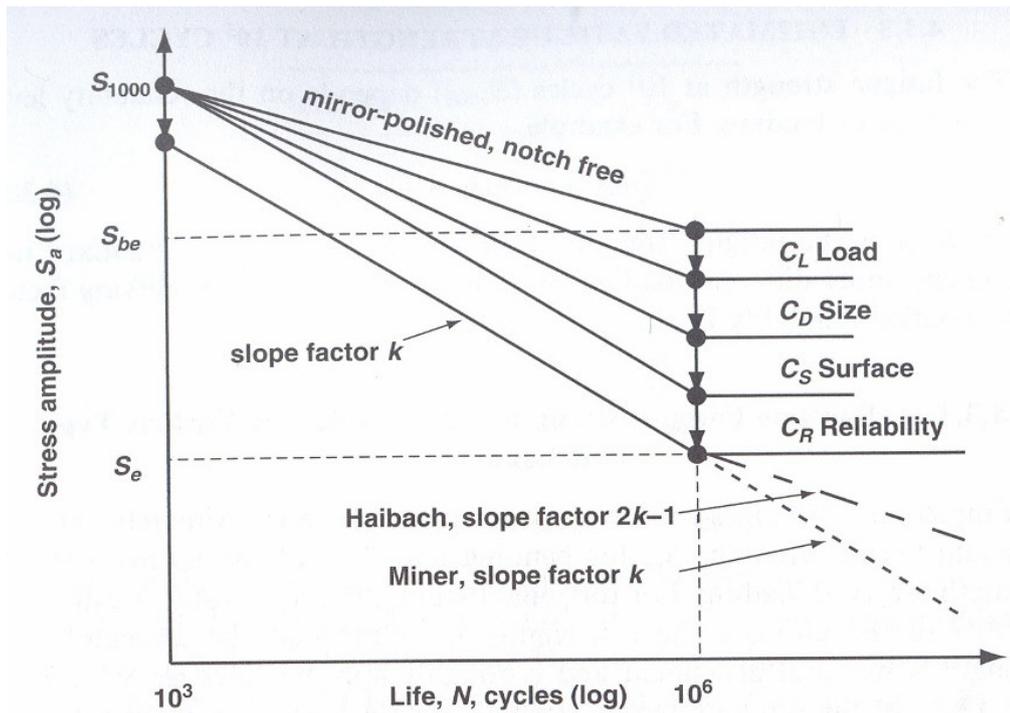


Fig. 3.2-1. Coeficientes correctores de la vida a fatiga.

Aunque las aleaciones de aluminio no tienen un verdadero límite de fatiga, es habitual definir un pseudo límite de fatiga para la resistencia a fatiga a 5×10^8 ciclos usándose este valor para los cálculos.

El límite de fatiga a flexión (S_e) en distintas condiciones se estima a partir del límite a fatiga a flexión del material (S_{be}).

$$S_e = S_{be} \times C_L \times C_S \times C_D \times C_R \quad (3.2.1)$$

Donde los parámetros que aparecen se deben a la influencia de los distintos factores que se van a explicar a continuación.

Factor de fiabilidad, C_R , en S a 10^3 ciclos.

Éste es el único factor que se aplica sobre la tensión aplicada para vida de mil ciclos, los demás corrigen el límite de fatiga. Tiene en consideración el carácter estadístico de la curva de manera que presenta unos valores que

pueden ser empleados en caso de no tener datos suficientes sobre los ensayos como para poder realizar un estudio estadístico riguroso.

A continuación se presentan unos valores recomendados para S_{1000} así como para C_R para realizar una estimación:

Tabla. 3.2-1. Factor de fiabilidad en función del tipo de carga.

Tipo de material	Tipo de carga	S_{1000}
Todos	Flexión	$0.9 \times S_u$
Todos	Axial	$0.75 \times S_u$
Acero	Torsión	$0.72 \times S_u$
No ferrosos	Torsión	$0.63 \times S_u$
Fundición	Torsión	$0.17 \times S_u$

Tabla. 3.2-2. Factor en función de la fiabilidad de los datos.

Fiabilidad	C_R
0.50	1.000
0.90	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

Factor por el tipo de carga, C_L , en el límite de fatiga

Habitualmente los ensayos para determinar la vida a fatiga se realizan con cargas de flexión. Sin embargo, las piezas son solicitadas con otros tipos de cargas que hay que tener en cuenta.

Para una misma tensión nominal máxima en flexión y con carga axial, el material se ve más afectado por la fatiga en el caso de carga axial. Por esta razón cuando se trata de cargas axiales se aplica un coeficiente que varía entre 0.7 y 0.9 en función de si existe cierta excentricidad en la aplicación de la carga.

A continuación se exponen valores de este parámetro en función del tipo de carga.

Tabla. 3.2-3. Factor por el tipo de carga.

Tipo de carga	C_L	Comentarios
Axial pura	0.9	
Axial excéntrica	0.7	
Flexión	1.0	
Torsión	0.58	Aceros
Torsión	0.8	Fundiciones

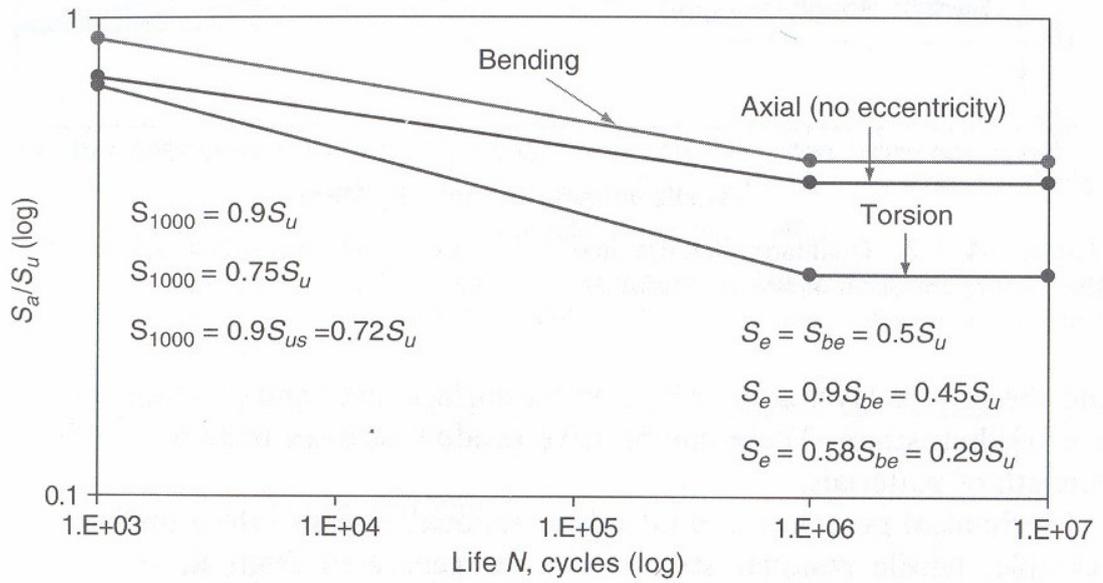


Fig. 3.2-2. Factor de corrección por tipo de carga.

Factor por acabado superficial, C_s , en el límite de fatiga

Dado que las grietas suelen iniciarse en la superficie, el estado de ésta es muy importante ya que en caso de que existan concentradores de tensión se facilita la aparición de grietas. Estos fallos en la superficie pueden estar en forma de irregularidades que actúen como entallas o en forma de tensiones residuales.

Los tratamientos superficiales pueden generar tensiones residuales en la superficie del material que pueden actuar reduciendo o aumentando (en el caso de tensiones residuales de compresión) la resistencia a fatiga.

En general el acabado superficial influye más en el caso de ensayos a alto número de ciclos donde la iniciación de la grieta tiene más importancia.

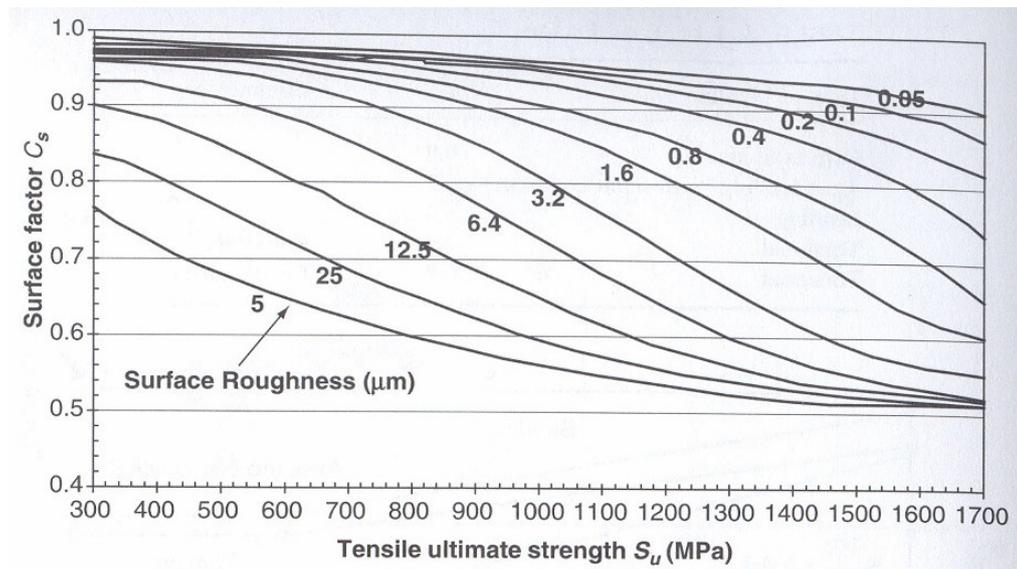


Fig. 3.2-3. Factor de corrección por rugosidad superficial.

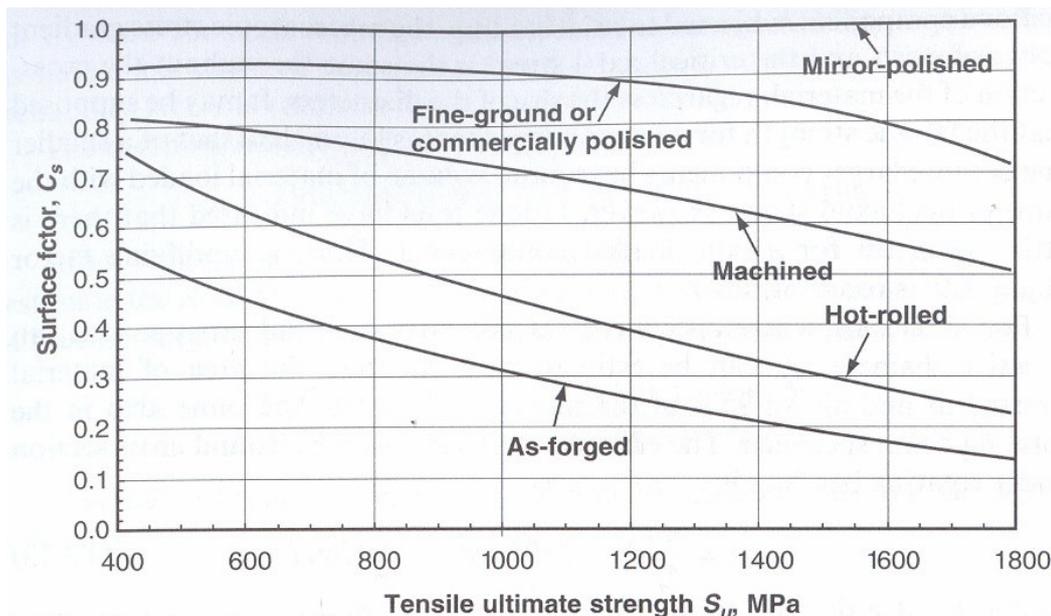


Fig. 3.2-4. Factor de corrección por rugosidad superficial atendiendo al proceso de fabricación.

Factor por tamaño de la probeta, C_D , en el límite de fatiga

El tamaño de la pieza sometida a las cargas también influye en su resistencia a fatiga. Según la teoría del volumen crítico de Kuguel el daño por fatiga se produce en la región sometida a una tensión entre el 95 y el 100% de la máxima y, puesto que para barras circulares sometidas a un mismo esfuerzo de flexión la barra de mayor tamaño tiene una mayor cantidad de material dentro de estos límites de tensión, también se ve más afectada por el daño a fatiga.

En consecuencia, en piezas sometidas a flexión, la vida a fatiga es menor cuanto mayor es el tamaño de ésta, debiendo aplicarse los siguientes coeficientes:

$$C_D = 1.0 \text{ para } d < 8 \text{ mm} \quad (3.2.2)$$

$$C_D = 1.189 \times d^{-0.097} \text{ para } 8 \text{ mm} < d < 250 \text{ mm} \quad (3.2.3)$$

Donde d es el diámetro de la pieza.

En el caso de cargas axiales, en principio piezas sometidas a una tensión de tracción o compresión de un valor determinado tienen idénticas distribuciones de tensión independientemente del tamaño. Efectivamente, se puede comprobar que el efecto del tamaño es mínimo y por tanto se debe considerar un coeficiente $C_D = 1$.

En todo momento se ha hablado de secciones cilíndricas. En caso de que no lo sea se puede calcular un diámetro equivalente para flexión rotativa.

$$d_e = \sqrt{0.65w \cdot t} \quad (3.2.4)$$

Donde d_e es el diámetro equivalente y w y t la longitud de los lados para una sección rectangular.

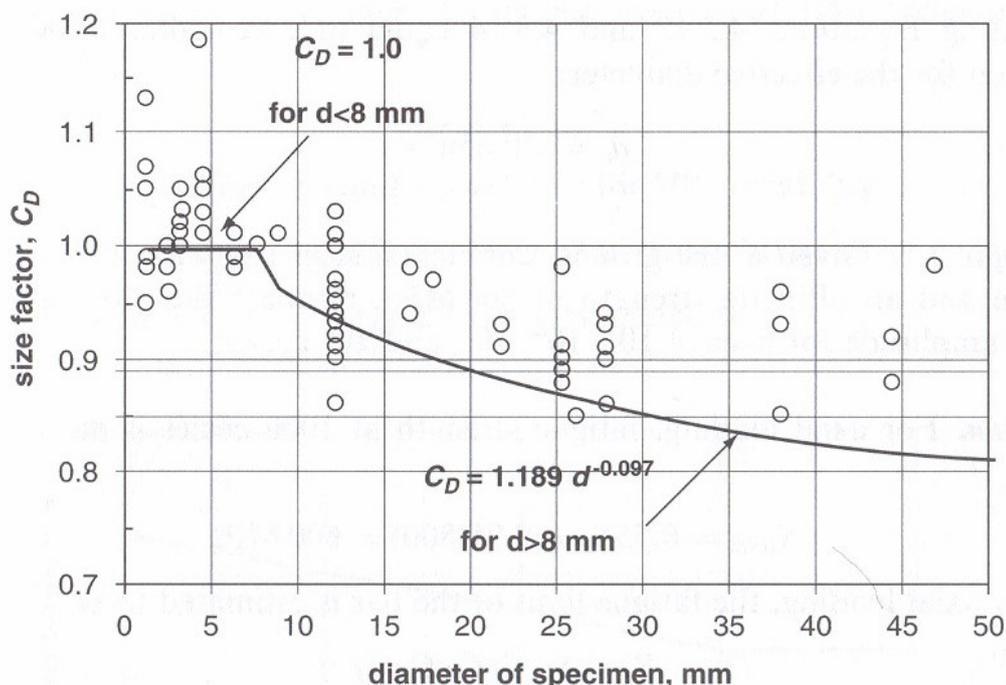


Fig. 3.2-5. Factor de corrección por tamaño.

Efecto de entalla

Se podría definir entalla como una discontinuidad geométrica introducida ya sea por el diseño, por error en fabricación, por mecanizado... En cualquier caso lo que sí es cierto es que el fallo por fatiga de una pieza ocurre típicamente en una entalla por efecto de concentración de tensiones.

Para una pieza con entalla podemos calcular la máxima tensión elástica de la entalla (σ^e) en función de la tensión nominal (S) y el factor de concentración de tensiones elásticas (K_t).

$$\sigma^e = S \times K_t \quad (3.2.5)$$

El factor de concentración de tensiones elásticas es función de la geometría de la entalla y del tipo de carga, pudiendo encontrarse tablas de valores para K_t en el caso de cargas y geometrías sencillas. En caso de cargas o geometrías más complejas se puede determinar el valor de σ^e directamente mediante análisis de elementos finitos.

En principio podría pensarse que la vida a fatiga de un componente entallado respecto a la del no entallado debería reducirse mediante el factor K_t . Sin embargo no es así, aparece un nuevo factor K_f que se define como el cociente entre el límite de fatiga para un componente sin entalla dividido por la del componente entallado.

K_f es menor o igual que K_t , siendo la diferencia mayor (y por tanto, menor el valor de K_f) cuanto menores sean el radio de la entalla y la tensión última de rotura.

Se define el factor de sensibilidad a la entalla (q):

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}; 0 \leq q \leq 1 \tag{3.2.6}$$

Si $q=1$, entonces $K_t = K_f$ y se dice que el material es totalmente sensible a la entalla, siendo no sensible a la entalla si $q = 0$. Esta sensibilidad a la entalla depende también de la dureza del material y del radio de la entalla, aumentando la primera al hacerlo las otras dos.

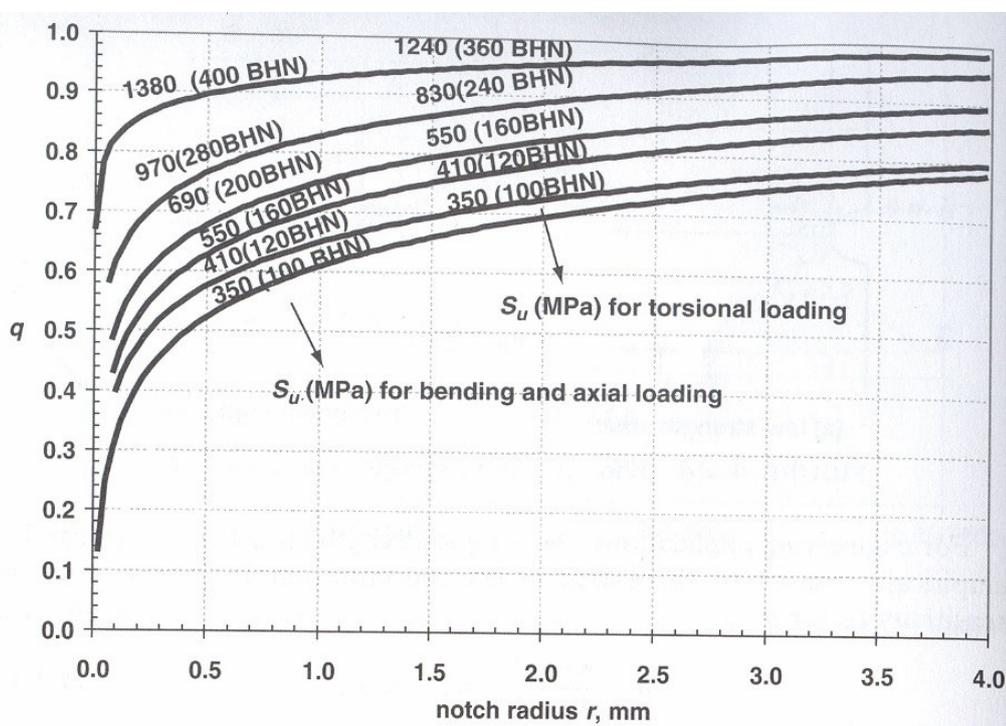


Fig. 3.2-6. Coeficiente de sensibilidad a la entalla en función del radio de la entalla y la dureza del material.

Lo anteriormente explicado se aplica al límite de fatiga. Para tensiones por encima de dicho límite la sensibilidad a la entalla puede ser menor que para el límite de fatiga. En estos casos se define el factor de sensibilidad a la entalla a 1000 ciclos empíricamente de la siguiente manera:

$$q'_{1000} = \frac{K'_f - 1}{K_f - 1} \tag{3.2.7}$$

Donde K'_f es el factor de reducción de la vida a fatiga a 1000 ciclos y K_f es el factor de reducción de vida a fatiga en el límite de fatiga. En la siguiente figura se muestran valores de q'_{1000} para varios materiales en función de S_u .

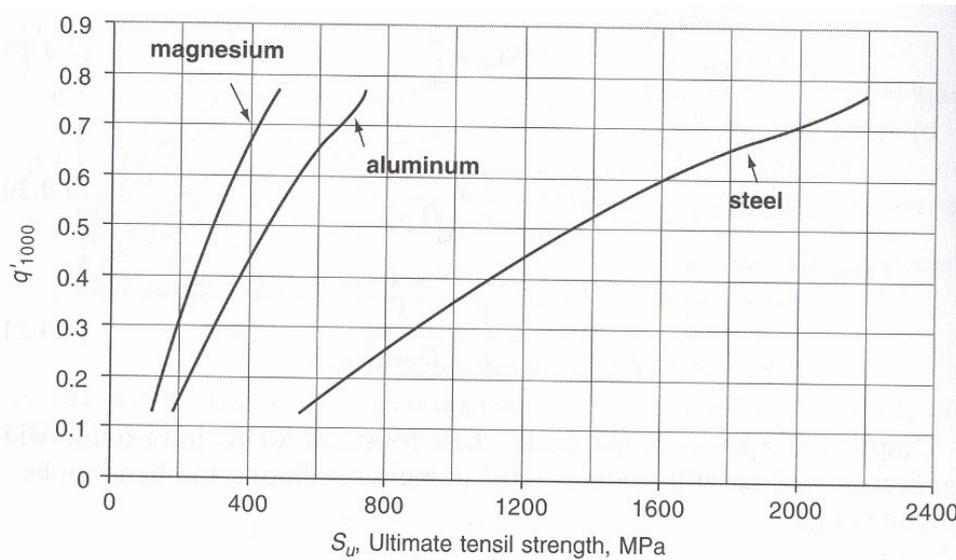


Fig. 3.2-7. Sensibilidad a la entalla a 1000 ciclos en función del material y su tensión última de rotura.

A partir de estos datos se puede calcular la vida de un componente entallado de dos maneras diferentes, siendo la primera de ellas calculando la tensión en la entalla mediante la multiplicación de la tensión nominal por un factor de reducción de la resistencia a fatiga ($K_{f,N}$) determinado de la siguiente manera:

$$\frac{\log(10^3) - \log(10^6)}{\log(K'_f) - \log(K_f)} = \frac{\log(10^3) - \log(N)}{\log(K'_f) - \log(K_{f,N})} \quad (3.2.8)$$

Donde N (debiendo variar N entre 10^3 y 10^6) es el número de ciclos de vida para el que se quiere calcular la tensión. Con el valor obtenido para el factor a ese número de ciclos se calcula la nueva tensión y se entra en la gráfica de la pieza sin entallar con ese valor de tensión.

La otra posible forma para determinar el efecto de la entalla es corrigiendo la curva de vida a fatiga por alguno de los dos métodos que se muestran en las figuras a continuación.

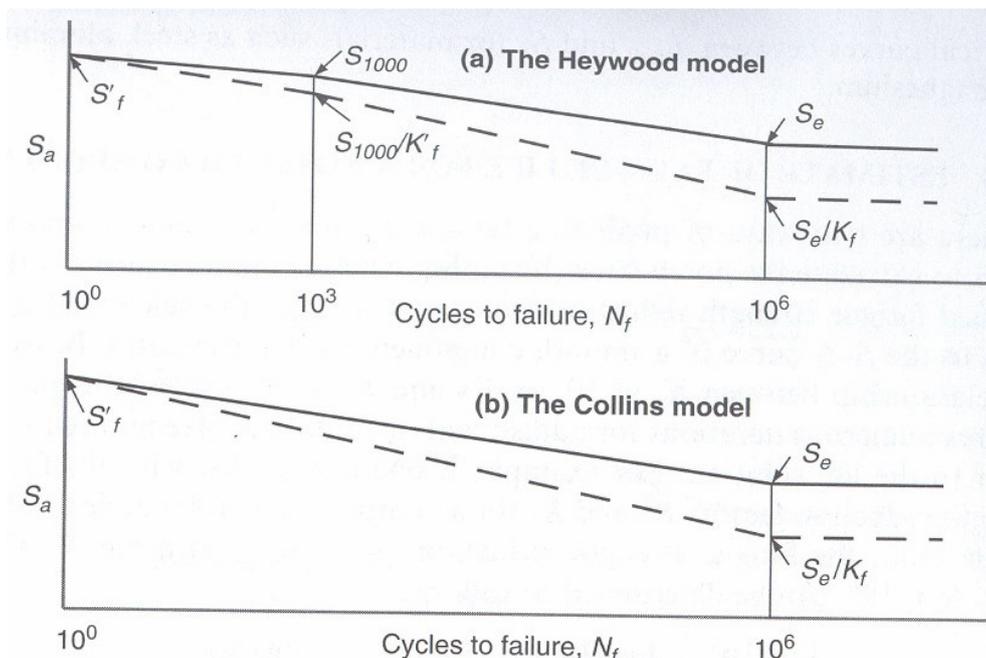


Fig. 3.2-8. Modelos de corrección de Heywood (a) y Collins (b).

El primer sistema es usado normalmente para estados de tensión multiaxial, siendo el segundo empleado más frecuentemente para cargas uniaxiales.

Tensión media

Las tensiones de tracción y compresión son las responsables de la apertura y cierre de grieta respectivamente de modo que una tensión media de tracción empeora el comportamiento a tracción y una de compresión lo mejora. Esto ocurre para fatiga a alto número de ciclos, siendo mucho menor dicho efecto en el caso de fatiga a bajo número de ciclos.

Es posible corregir el comportamiento del material sometido a tensiones medias mediante el cálculo de una tensión alterna equivalente, es decir, un tensión que aplicada con $R = -1$ lleve a una vida a fatiga igual que la carga considerada con tensión media aplicada. Podemos definir el límite de fatiga para el material de acuerdo a las correcciones de Gerber y Goodman.

$$S_e = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2} \text{ (Gerber)} \tag{3.2.9}$$

$$S_e = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_u}\right)} \text{ (Goodman)} \tag{3.2.10}$$

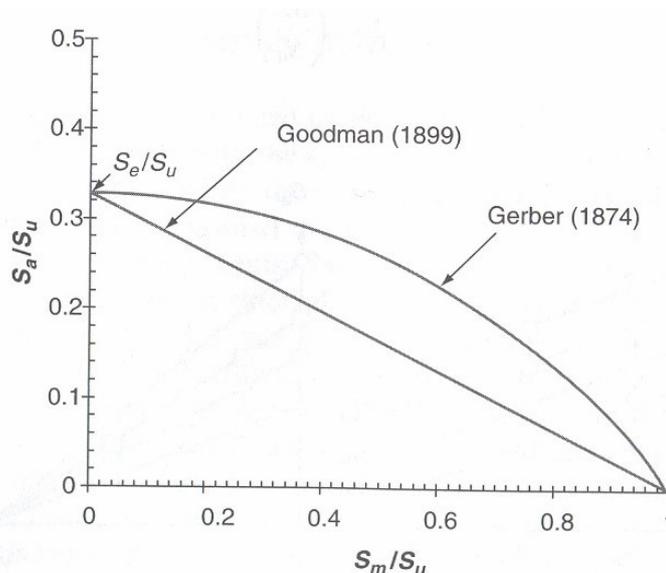


Fig. 3.2-9. Correcciones de Goodman y Gerber para la tensión alterna cuando existe tensión media.

Donde S_e es el límite de fatiga con carga aplicada con $R = -1$ equivalente a una carga de tensión alterna S_a con tensión media S_m . Existe una tercera corrección propuesta por Soderberg en la que se considera que la tensión media debería limitarse al límite elástico (S_y):

$$S_e = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_y}\right)} \text{ (Soderberg)} \quad (3.2.11)$$

Esto se puede aplicar a cualquier tensión, no solo al límite de fatiga. Por tanto, para conocer la tensión alterna equivalente a una carga aplicada con tensión media no nula simplemente hay que introducir las tensiones media y alterna empleadas.

Hay modelos más modernos que tratan de explicar con más detalle este efecto pero estos son los tres clásicos.

En cualquier caso resulta recomendable ser conservador en los cálculos considerando que aunque haya presentes tensiones de compresión no se produce un aumento de vida a fatiga, aunque realmente si pueda darse. En este caso el diagrama queda de la siguiente manera:

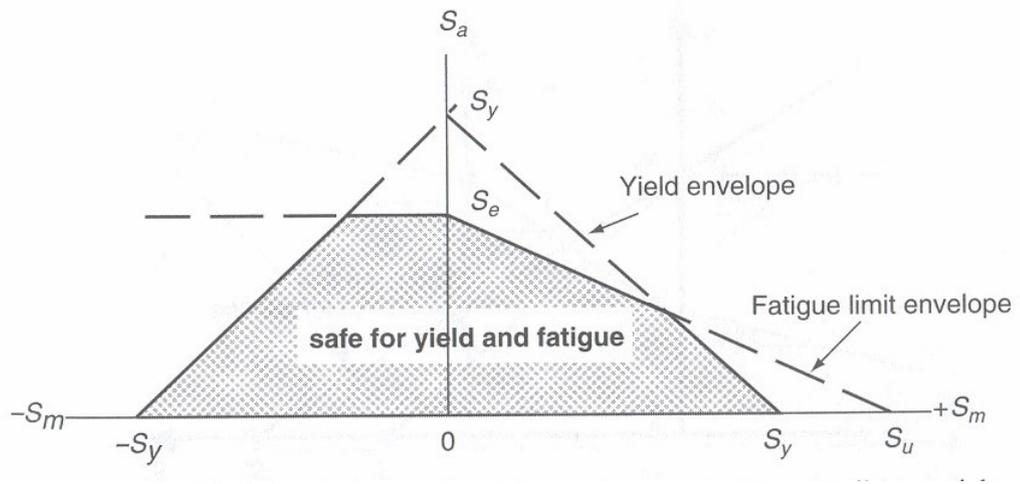


Fig. 3.2-10. Corrección del límite de fatiga en función de la tensión media.