

MATERIALES AERONÁUTICOS

FATIGA

Introducción:

Una de las causas más comunes de falla de los materiales en Aeronáutica se debe a la *Fatiga* del material. Los materiales sometidos a cargas fluctuantes o repetidas tienden a desarrollar un comportamiento característico que difiere fundamentalmente del comportamiento bajo cargas constantes. Este “comportamiento diferente” se llama **Fatiga**.

Llamaremos fatiga al “fenómeno que afecta la resistencia de las piezas cuando se las somete a un número más o menos grande de sollicitaciones repetidas de una cierta amplitud”. La idea clave es que la sollicitación (carga o deformación) debe variar en el tiempo para obtener fatiga como posible causa de falla.

Podemos definir a la fatiga de los materiales como el “deterioro que se desarrolla bajo la acción de ciclos repetidos de carga o deformación de cierta amplitud, en una determinada pieza”; este deterioro se manifiesta en fisuración y eventualmente rotura.

Si bien la *Fatiga* se desarrolla en todos los materiales (incluyendo metales, plástico, gomas, hormigón, etc.), nuestro estudio se concentrará en metales, tales como aceros o aleaciones livianas (aunque se está haciendo cada vez más necesario conocer el comportamiento en plásticos y materiales compuestos en fatiga pues el diseño aeronáutico recurre cada vez más a este tipo materiales). No obstante, los mecanismos involucrados en la producción de fatiga pueden diferir en los diversos materiales.

La fuente principal de Fatiga son las no homogeneidades de los materiales. Todos los materiales, aún los cristales más perfectos, tienen imperfecciones de muchos tipos, de modo tal que ningún material puede ser considerado perfectamente homogéneo. Bajo cargas repetidas el efecto de las no homogeneidades se ve enfatizado.

Es sabido que un material sometido a tensiones repetidas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura con una sola aplicación de carga. Esto se debe a la Fatiga que se produce principalmente tres efectos: pérdida de resistencia, pérdida de ductilidad, y aumento en la incertidumbre en cuanto a la resistencia y a la duración (vida en servicio) del material.

La acción de la *Fatiga* se puede observar en diferentes piezas, pero sobre todo en partes móviles como ser: componentes de máquinas rotativas (están sujetos a tensiones alternas); resortes (son deformados en cantidades variables); alas de aeronaves (están sometidas a cargas repetidas de ráfagas); neumáticos (son deformados repetidamente con cada revolución de la rueda); etc., y afecta a componentes elementales como un tornillo hasta el transbordador espacial. Se ha prestado poca atención al efecto de la Fatiga sobre materiales frágiles ya que estos, aún bajo cargas constantes, presentan daños similares al de fatiga (por efecto de las no homogeneidades).

Las Normas ASTM definen a la fatiga como: “Término general usado para describir el comportamiento de materiales sometidos a ciclos repetidos de tensión o deformación que ocasiona un deterioro del material que ocasiona una fractura progresiva”. Las fracturas que resultan de la fatiga están entre las más difíciles de prever debido a la dificultad de reconocer las condiciones que las producen. La fatiga puede ocurrir a tensiones dentro del rango elástico; a veces ocurre bajo cargas intermitentes que a primera vista no parecen haberse repetido un número suficiente de veces como para causar fatiga.

Debemos recordar que la fatiga de materiales es primariamente un efecto de la repetición de sollicitaciones y no un efecto del tiempo (como el creep).

Manifestación y Proceso de Falla:

Un material sometido a tensiones repetidas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura bajo carga constante. Es decir: la aplicación repetida de una tensión ocasiona el deterioro progresivo de un material, siendo que la misma tensión aplicada estáticamente no tiene ningún efecto permanente. Este deterioro se manifiesta a través de la formación de fisuras en el material, que eventualmente pueden llevar a la rotura. Cabe recalcar que la fatiga ocurre bajo toda clase de cargas y a tensiones tanto altas como bajas; pero este fenómeno solo afecta a las piezas cuando están sometidas a sollicitaciones repetidas de una cierta amplitud.

Describiremos el proceso que ocurre en los metales al estar sometidos a fatiga simple (la forma más sencilla de fatiga), que tiene lugar bajo tensiones de tracción y compresión alternadas (siempre dentro del rango elástico) sobre miembros libres de discontinuidades. Su progreso puede explicarse de la siguiente manera: a los pocos ciclos de acción de la carga repetida comienzan a producirse cambios aislados en la estructura atómica en puntos dispersos del material; estos rápidamente comienzan a desarrollar fisuras submicroscópicas que crecen a medida que los ciclos continúan, hasta tener proporciones microscópicas y eventualmente llegan a ser visibles; finalmente, cuando la fisura llega a un tamaño tal que debilita la pieza, se produce su rotura. Si bien no existe un cambio notable en la estructura del metal que falló por fatiga, en general, se puede dividir el proceso de evolución de la falla en tres etapas denominadas: nucleación (a), propagación o crecimiento de la fisura (b y c) y rotura (d). (Ver Figura 1)

1) Nucleación (a): se produce en los metales cuando el nivel de tensión aplicada es menor que el límite elástico estático. Aparece una deformación masiva generalizada, hasta que el metal endurece lo suficiente como para resistir la tensión aplicada (Acritud Total) en un punto determinado denominado Punto de Iniciación. Éste suele estar situado en zonas en donde los granos tienen mayor grado de libertad, en zonas de concentración de tensiones como ser entallas, cantos vivos, rayas superficiales o bien en inclusiones y poros.

2) Propagación (b y c): abarca la mayor parte de la duración del proceso fatiga y se extiende desde el momento en que se produjo el endurecimiento por deformación generalizada (acritud total) hasta la formación de una grieta visible.

3) Rotura (d): es la propagación de la grieta hasta que es lo suficientemente grande como para producir la rotura.

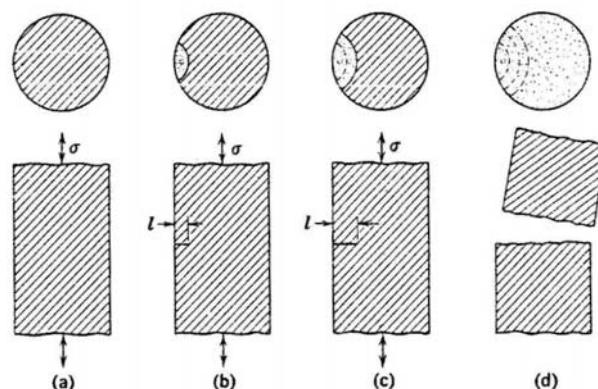


Figura 1: Evolución de la falla

La superficie de la fractura tiene dos zonas características:

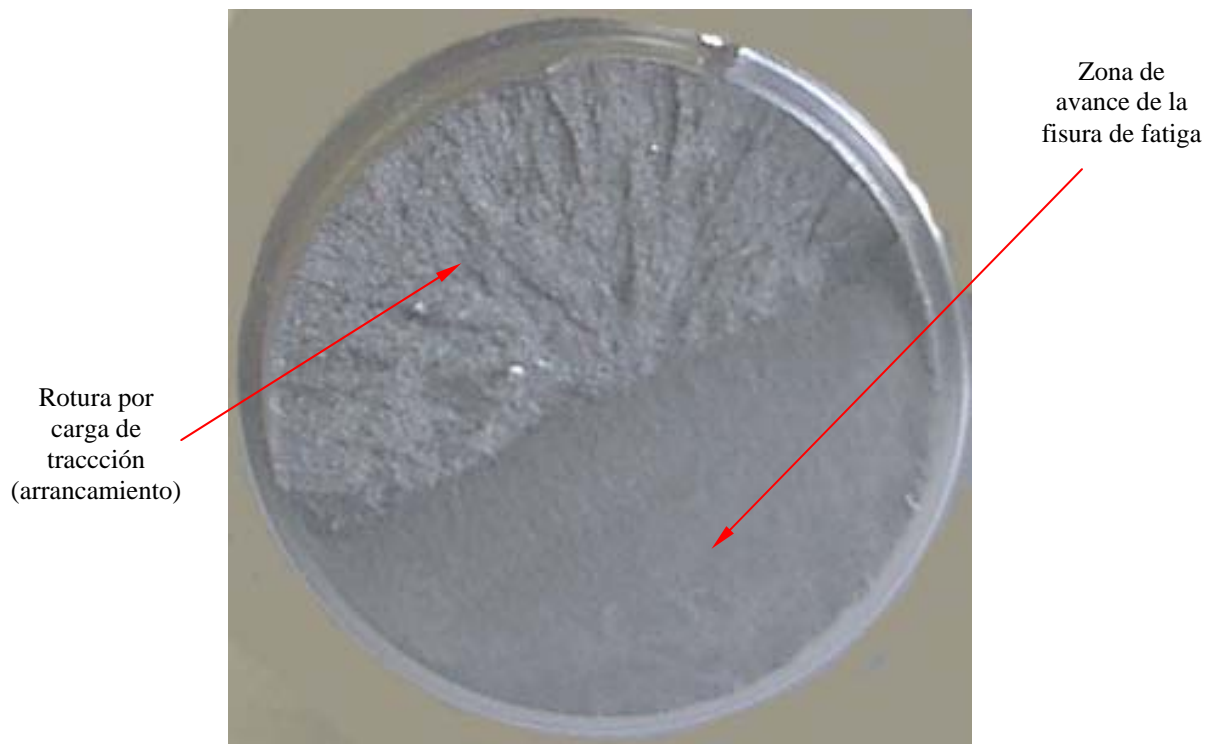
a) Zona Lisa: aparece debido al roce por la propagación de la grieta a través de la sección. Esta propagación, para el caso de procesos de carga en servicio, se indica con una serie de

marcas anulares (llamadas líneas de parada o de reposo, similares a las marcas que dejan las olas sobre la playa), que se generan a partir del Punto de Nucleación (punto de concentración de tensiones). A su vez, podemos distinguir:

-Marcas de Playa: se forman en el frente de la fisura al producirse un reposo en el funcionamiento de la pieza. Consecuentemente no aparecerán en el caso de probetas, que generalmente se ensayan sin interrupción.

-Líneas Radiales: a veces las fisuras que se generan en la superficie (que es el lugar más frecuente) progresan según frentes a niveles levemente escalonados; en un dado momento de su desarrollo, sin embargo, coalescen quedando estas líneas radiales como huellas de las diferencias de nivel iniciales.

b) Zona Rugosa: Aparece al romper la pieza por disminución de la sección efectiva sana ante el mismo valor de carga actuante. La rotura final, contrariamente a la zona con marcas de playa que es lisa y suave, presenta una superficie fibrosa y de relieve muy accidentado. Se trata de la zona remanente sana, demasiado pequeña para aguantar un ciclo mas de sollicitación, que termina rompiéndose frágilmente.



Rotura de una probeta ensayada a cargas cíclicas.
Ensayo realizado sin interrupción de la carga

Análisis del origen de las Fallas por Fatiga

Primero nos ocuparemos del daño al material que resulta solo de la repetición de la carga. Estudiaremos primero los efectos de la fatiga simple. Cuando hayamos entendido sus mecanismos, los efectos de concentración de tensiones y deformaciones plásticas pueden ser estudiados como extensión de estos mecanismos.

La mayoría de las fisuras de fatiga comienzan en discontinuidades visibles, que actúan como multiplicadores de tensiones, como ser: orificios, empalmes, chaveteros y discontinuidades microscópicas tales como inclusiones, rechupes, defectos de fabricación, etc.

1) Nucleación: cómo se origina la fisura.

Las fisuras se originan debido al endurecimiento producido en las regiones donde ha habido fluencia. Sabemos que en metales policristalinos sometidos a tensión simple, algunos cristales siempre estarán orientados de tal forma que deslizarán fácilmente (ver Figura 2). La nucleación se produce a partir esta fluencia altamente localizada.

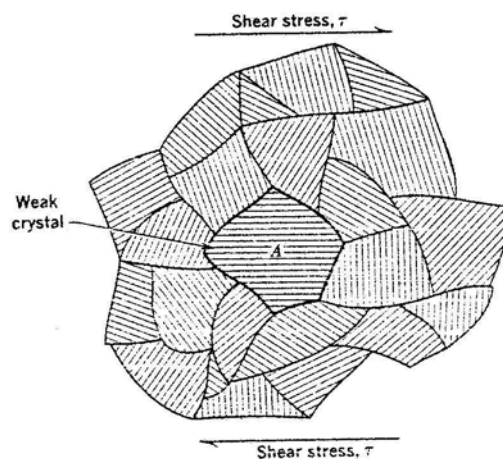


Figura 2

A medida que la tensión (o carga) aumenta, estos cristales "débiles" fluirán primero, pero como están rodeados por material elástico, no afectan apreciablemente el diagrama de tensión-deformación estático. No obstante ha habido fluencia a una tensión nominal que generalmente no sobrepasa el límite elástico.

Si el material se carga solo una vez, este efecto es completamente insignificante. Pero si la carga se repite, cada repetición produce una fluencia localizada adicional que eventualmente resulta en la formación de fisuras de fatiga en las regiones en fluencia.

El proceso es el siguiente: un cristal débil está rodeado enteramente por cristales más fuertes que se orientan de forma tal que permanecen completamente elásticos a la tensión más alta que ocurre durante el proceso de carga. A medida que la tensión sube a su máximo durante el primer cuarto de ciclo, el cristal débil (A) fluye una cantidad pequeña. Durante la fluencia la tensión en A aumenta mucho más lentamente que la tensión total (Ver Figura 3). El cristal A se comporta más o menos como un cristal único, y sus propiedades son por lo tanto bastantes diferentes de las del conjunto.

En el próximo medio ciclo la tensión disminuye a cero y se invierte, subiendo al máximo en la dirección opuesta. Durante esta inversión la deformación en el cristal débil, A, se determina casi enteramente por la rigidez del material elástico circundante, comparada con la cual el cristal A es muy pequeño. La deformación negativa que acompaña la tensión negativa máxima es igual que la deformación positiva que acompañó la tensión positiva máxima. El primer efecto de la descarga es simplemente permitir que los átomos en todos los cristales regresen elásticamente a sus posiciones de equilibrio. Sin embargo, el cristal A alcanza su configuración de equilibrio primero, antes que la deformación de la totalidad haya llegado a cero. A medida que la deformación continúa disminuyendo, el cristal A comienza a deformarse en la dirección opuesta. Este proceso se repite con cada subsiguiente medio ciclo de deformación. Cada vez que la tensión se invierte, el cristal A fluye un poco más, y cada vez que fluye, se endurece por deformación un poco más. Recordemos que el endurecimiento por deformación (strain-hardening) es aditivo porque sólo involucra la interacción de dislocaciones durante el proceso, que casi no son afectadas por la dirección.

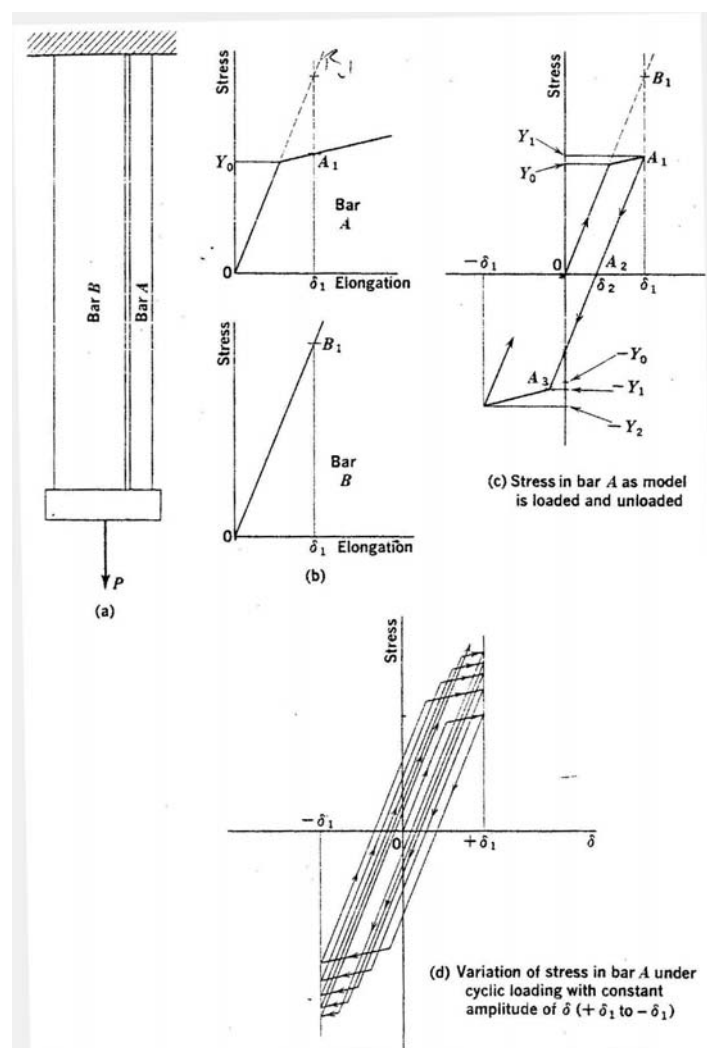


Figura 3: Modelo mecánico, que ilustra el progresivo strain-hardening en un cristal débil

Esto explica aproximadamente lo que sucede durante las primeras etapas de fatiga en metales: la aplicación repetida de una tensión pequeña puede ocasionar el deterioro progresivo de un material aún cuando la misma tensión aplicada estáticamente no tiene ningún efecto permanente perceptible.

En resumen, el primer efecto de la fatiga en metales es la formación de bandas de deslizamiento altamente localizadas en cristales individuales durante los primeros pocos ciclos.

A medida que continúan los ciclos, se forman nuevas bandas de deslizamiento, por lo que la deformación permanece altamente localizada. Como los grupos de las bandas de deslizamiento crecen formando estrías, el material entre ellas pasa a ser progresivamente más duro a causa de la acumulación de endurecimiento por deformación. En algún punto del proceso el material en las estrías llega a ser tan duro que se fisura (en escala submicroscópica). El momento exacto cuando esto sucede es aún desconocido pues la primera evidencia real de la grieta es la aparición de fisuras microscópicas. Sin embargo, se sabe que sucede dentro de los primeros ciclos de carga. Las fisuras submicroscópicas comienzan a formarse en las mismas direcciones que las bandas de deslizamiento. Las grietas individuales crecen, y los grupos de fisuras se unen hasta que el total alcanza un tamaño microscópico.

En general las fisuras de fatiga comienzan en la superficie de la pieza, en discontinuidades visibles, que actúan como concentradores de tensiones. Probablemente los cristales adyacentes a la superficie están menos restringidos que los cristales circundantes, y por eso los cristales "más débiles" suelen encontrarse próximos a la superficie. Aquí, la fluencia inicial es ocasionada no por un cristal desfavorablemente orientado sino por un aumento local en la tensión provocado por una concentración de tensiones. La nucleación sigue siendo altamente localizada. Los puntos débiles ahora son las pequeñas regiones afectadas por la concentración de tensiones. En otro tipo de materiales (metales unicristalinos y sólidos amorfos), los cristales débiles desfavorablemente orientados son reemplazados por otras no homogeneidades que actúan como puntos débiles. Una vez que las fisuras de fatiga comienzan, la propagación y la fractura son igual que antes.

Pese a estas pequeñas discrepancias, podemos considerar que en la nucleación todas las formas de fatiga son básicamente similares; solo en etapas posteriores aparecen diferencias.

2) Propagación: crecimiento de la fisura

Ahora analizaremos como progresan las fisuras en fatiga simple. Algunos materiales más resistentes y de mayor dureza se caracterizan por propagar las fisuras más rápido y fácilmente que otros materiales. Este factor da un indicio de la superioridad de un material sobre otro en la fatiga. Otros materiales menos resistentes pero más "tenaces" originan fisuras que se propagan lo suficientemente lento que frecuentemente pueden ser detectadas a tiempo y remediadas antes que lleguen a ser suficientemente grandes como para ocasionar fallas.

Las primeras fisuras microscópicas aparecen en las bandas de deslizamiento, en cristales desfavorablemente orientados cuya orientación es tal que las bandas de deslizamiento coinciden con los planos de corte máximos. Las fisuras microscópicas crecen en estos planos que incluyen todos los planos a 45° al eje de la pieza. Las fisuras comúnmente se originan en más de uno de estos planos. La intersección y unión de varias de estas fisuras produce una fisura en zigzag, cuya dirección es a ángulos rectos al eje de la pieza. A medida que cada fisura crece es precedida por un proceso de nucleación parecido al que la originó. El deslizamiento localizado tiene lugar a causa de la concentración de tensiones en el borde de la fisura, y las fisuras submicroscópicas se desarrollan en las bandas de deslizamiento, ocasionando una extensión gradual de la fisura. Cuando el área de la sección transversal remanente llega a ser lo suficientemente pequeña, ocurre la fractura final. La falla resulta así de naturaleza frágil.

La propagación de la fisura engendrada por la fatiga involucra muchos factores. A veces la fisura comienza, pero no se propaga. Un factor importante es el gradiente de tensiones: las fisuras se nuclean en zonas de alta tensión, pero si crecen en la dirección de las tensiones decrecientes, la propagación tenderá a hacerse más lenta y aún parar. (Además bajo flexión alternada por ejemplo, la vida es mayor que en tracción o compresión simple pulsátil). La velocidad de la grieta depende también del material y de las condiciones ambientales.

Si analizamos de sollicitaciones a diferentes niveles de tensión resulta lógico, por ejemplo, que una fisura producida a alta tensión no se propague si a la misma le sigue otra de nivel significativamente inferior. En cambio, una tensión de bajo nivel puede propagarse muy rápidamente bajo una siguiente mayor. A todo esto debe agregarse el endurecimiento por deformación (consolidación) que se produce en forma diferente bajo diferentes niveles, y que puede modificar sustancialmente los resultados.

Si las piezas están sometidas a tensiones máximas altas, puede tener lugar la fluencia completa de la pieza. Aquí el endurecimiento por deformación es general en vez de localizado. Aún así, la no homogeneidad natural del material, más cualquier concentrador de tensiones que pueda estar presente, produce diferencias localizadas en el endurecimiento por deformación. El resultado final es casi igual que a tensiones bajas: las fisuras se nuclean en puntos aislados y se propagan a través de la pieza. Al estar involucrada la fluencia generalizada, el mecanismo no es tan altamente localizado como en la fatiga simple. Además, la repetición de deformación plástica en la pieza ocasiona que grandes cantidades de energía sean disipadas en forma del calor y se pueden producir efectos térmicos. Estos efectos son especialmente importantes en plásticos y goma. La fractura final es similar a la fractura bajo tensiones estáticas, aunque quedan evidencias de la reducción de ductilidad.

Condiciones Básicas para la Aparición de la Falla por Fatiga:

- * Valor elevado de tensión (σ) o deformación (ϵ) (esto último solo válido si $\sigma = E\epsilon$).
- * Fluctuación en el valor de la tensión aplicada.
- * Mayor o menor número de ciclos de aplicación de carga o deformación

Cargas que originan Fatiga

El tipo más simple: de carga repetida es una tensión alternada (las tensiones de flexión en un eje rotativo varían de esta manera). La amplitud de tensión es igual a la tensión máxima, y la tensión media o promedio es cero.

Una pieza que es deformada alternativamente sobre cada lado de su configuración de equilibrio, está también sujeta a tensión simple alternada. Si la pieza lleva además una carga constante (como el peso de una máquina), la tensión alternada se superpone a una tensión constante que resulta de la carga constante. La tensión media no es más cero, es igual al valor de la tensión constante; la tensión máxima es igual al valor de la suma de la tensión media y la amplitud de tensión.

Las variaciones sinusoidales simples de tensión como las descritas arriba ocurren en muchas partes de máquinas rotativas. Sin embargo, hay numerosos otros ejemplos de cargas de fatiga en que la variación está lejos de ser regular, como por ejemplo en una aeronave, donde la variación de tensión durante el vuelo es aleatoria. Cuando la variación de tensión es irregular, el espectro real de carga es de poco uso en el diseño para la fatiga y debe reducirse a una forma más simple. El procedimiento usual es separar el espectro de carga en varios grupos de oscilaciones simples, y cada grupo que representa el número de oscilaciones reales debe ser de aproximadamente la misma amplitud y tensión media. La Figura 4 es un espectro real de carga de una aeronave registrado por un acelerómetro y una versión simplificada consiste de varios grupos de oscilaciones sinusoidales.

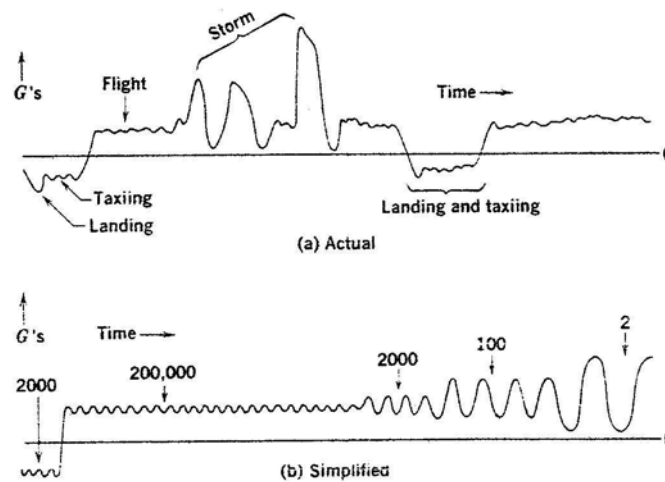


Figura 4: Espectro de carga de una aeronave (a) Real, (b) Simplificado

El espectro simplificado se asume equivalente al espectro real, y se usa en el análisis. De esta manera cualquier forma de carga de fatiga puede ser representada por variaciones simples sinusoidales.

Naturaleza Estadística de la Fatiga

Como resultado de investigaciones empíricas se observó que piezas de igual dimensión, material, tratamiento y trabajando bajo las mismas condiciones de carga fallan por fatiga a distintos valores de tensión.

Esto indica una dispersión en los valores de Límite de Fatiga de una pieza que hace imposible el uso de un valor para diseño, más allá del coeficiente de seguridad usado. La solución es aplicar métodos estadísticos a los resultados de los ensayos para obtener valores coherentes y reales, y así obtener la probabilidad de falla por fatiga (P)

Se ha enfatizado la naturaleza localizada de los mecanismos de fatiga. Las fisuras de fatiga comienzan en unos puntos débiles, y el proceso entero se restringe a la vecindad de estos puntos. El material a una distancia corta de las fisuras permanece totalmente elástico. Hay una gran similitud entre la fatiga y la fractura de materiales frágiles. Recordemos que la resistencia a la fractura de los materiales frágiles depende de una distribución aleatoria de imperfecciones o puntos débiles; y la fractura ocurre cuando la tensión en uno o más de estos puntos alcanza la resistencia de cohesión (una condición altamente localizada). También en la fatiga la fractura depende de una distribución aleatoria de puntos débiles. Además, la cadena entera de sucesos que preceden a la fractura de fatiga depende de una serie de procesos aleatorios y varía ampliamente de un miembro a otro.

Ningún material tiene un único valor de vida en fatiga para una tensión determinada, aún bajo las más cuidadosamente controladas condiciones. En fatiga (como en la fractura frágil), la variabilidad o distribución de valores observados es muy grande. Por lo tanto la vida en fatiga de un material puede solo ser tratada como una distribución de valores para especímenes individuales.

Entonces, no hay una vida definida en fatiga, solo una distribución. Para poder diseñar necesitamos tener valores para las propiedades que podamos manejar, aplicando un factor apropiado de seguridad. Pero para la fatiga tendremos que trabajar con distribuciones de muchos valores, mediante el uso de métodos estadísticos. El factor de seguridad frecuentemente ha sido llamado un "factor de ignorancia", pues comúnmente ignoramos la posible variación de las propiedades de los materiales y sus distribuciones.

Si contamos con información confiable sobre las distribuciones de propiedades podemos desechar este factor de ignorancia y en su lugar podemos diseñar para un porcentaje bajo de fallas, o dicho de otra manera, un porcentaje alto de supervivencia. Por ejemplo, si sabemos que el 99 % de todos los especímenes de una aleación de aluminio se espera que resistan una tensión de 60,000 psi sin fallar, podríamos usar esta tensión como punto de partida. El factor de seguridad necesitaría entonces compensar solo posibles variaciones en las condiciones de uso, tal como métodos de fabricación y magnitud de cargas aplicadas. Cuando hablamos de la distribución de vidas en fatiga para un material nos referimos a las vidas en fatiga de todos los especímenes posibles que pueden hacerse de este material (población). Una estimación de la distribución y sus características pueden hacerse con muestreos de la población. Un muestreo consiste de un número de especímenes hechos de un material determinado según algún plan específico. Cuanto más grande sea el muestreo, más estrechamente su distribución se aproxima a la de la población. Mediante el uso de métodos estadísticos podemos estudiar las características de distribuciones en muestreos e inferir de ellos las características de la distribución en la población.

Las propiedades de un muestreo son medidas por estadísticas; las propiedades de la población se llaman parámetros. Los parámetros no son ordinariamente medibles, pero son estimados por estadísticas.

Parámetros Característicos

Para las cargas de fatiga se usará la notación siguiente: la tensión es designada por σ (aunque suele usarse S para la tensión asociada con la fatiga).

- a) **Solicitud:** es la variable dependiente (que se controla). Pueden ser cargas o deformaciones:
- i- Cargas (o tensiones): la mayoría de los ensayos se caracterizan por ser de ciclos iguales. La Figura 5 (a) muestra un caso que se produciría por flexión alternativa o rotativa. En la Figura 5 (b) se señala el caso de adición de una tensión adicional ("media") constante.
 - ii- Deformaciones: hay veces en que son deformaciones lo que se aplican o controlan. Entonces, las tensiones serán las que resulten de las deformaciones que se producen (su cálculo solo es directo, a través de $\sigma = E \cdot \varepsilon$, cuando las deformaciones son plenamente elásticas).

Las sollicitaciones que producen el fenómeno de fatiga pueden ser de distintos tipos: tracción, compresión, flexo-torsión, etc, variando su magnitud de un máximo a un mínimo, actuando combinados o no. Los casos más comunes son: a) flexión rotativa; b) flexión plana; c) tracción-compresión (axial); d) torsión, etc, siendo necesario conocer, además del tipo de tensión y origen de las mismas, el grado de variación y tipo de ciclos: a) con inversión completa de carga (alternada pura); b) tensiones repetidas; c) tensión irregular o aleatoria (definidas estadísticamente)

- b) **Ciclos:** es la variable dependiente, la que se computa como resultado del ensayo. Nótese que se trata solo de vueltas (o repeticiones o ciclos) y no su número en una unidad de tiempo (en este último caso tendríamos frecuencia, cuyo efecto es secundario)

Podemos en general considerar un ciclo de tensiones fluctuantes compuesto por (ver Figura 5)

- Tensión media o estacionaria
- Tensión alternada o variable
- Intervalo de tensiones
- R = relación de tensiones

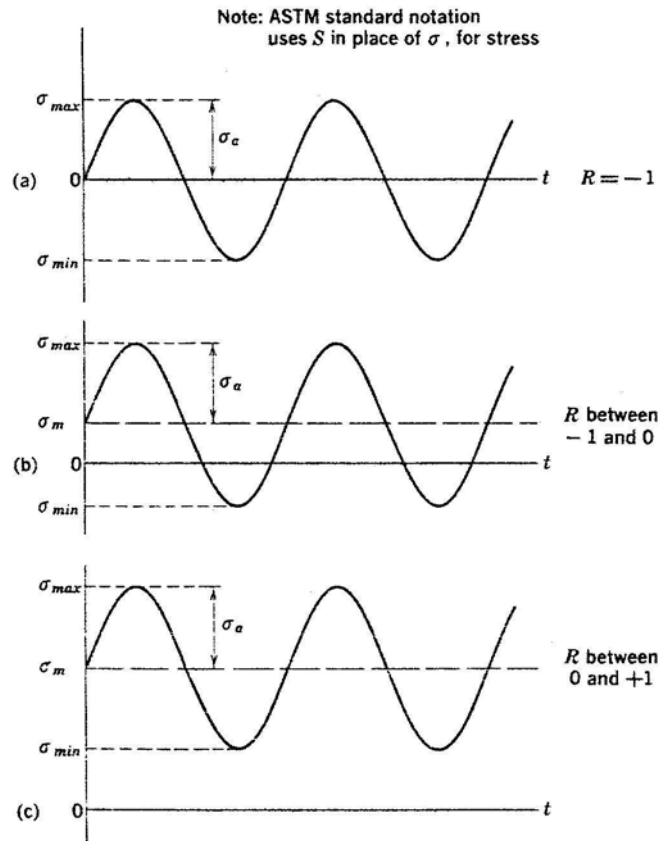


Figura 5: Variación de la tensión con las cargas de fatiga.

Tensión Máxima, σ_{max} : (**Smax**): El valor algebraico más alto de tensión durante un ciclo (la tensión de tracción es positiva)

Tensión Mínima, σ_{min} (**Smin**). El valor algebraico más bajo de tensión durante un ciclo.

Tensión Media, σ_m (**Sm**). La tensión constante (o el promedio), sobre la cual se superpone la tensión oscilante.

Amplitud de Tensión, σ_a (**Sa**). La amplitud de la tensión oscilante superpuesta, $\sigma_{max} - \sigma_m$.

Rango de tensión, σ_r (**Sr**), $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2 \sigma_a$

Relación de Tensiones, **R**. $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$

Ciclos de aguante, **n**. El número de ciclos de tensión al que un miembro es sometido a fatiga sin fallar.

Vida en fatiga, **N**. El número de ciclos requeridos que llevan a la fractura final bajo una condición determinada de uso (por ej.: dados σ_{max} y σ_m , o dados σ_m y σ_a). Es la propiedad básica de fatiga, y la única que es directamente medible experimentalmente. La vida en fatiga para una condición determinada es una propiedad individual de cada probeta, por lo que la vida en fatiga de un material en particular se expresa a través de la distribución de vida en fatiga de la población (donde la población representa al material bajo las condiciones determinadas de carga cíclica). Esta distribución se estima a través del ensayo de una muestra o lote: cuanto mayor es el tamaño de esta muestra, más precisa será la estimación.

Vida en fatiga para un p por ciento de supervivencia, **np**. Es la vida para la cual el p% de la población tiene una vida más larga; por ejemplo, n_{90} es el número de ciclos para el cual se espera fallen no más del 10% de la población (es decir, se espera que el 90% sobreviva). Se estima a partir de la distribución de la muestra, cuyo tamaño influirá la confiabilidad de los resultados.

Vida media en fatiga, n_{50} . Es la vida para la cual se espera que la mitad de la población sobreviva, es decir, haya un 50% de supervivencia (n_{50}). Es estimada por la observación media en el muestreo.

Resistencia a la fatiga, R_n . Es la tensión que el material puede soportar durante n repeticiones o ciclos. Obviamente la resistencia a la fatiga no puede medirse directamente por medios experimentales, y se determina a partir de una distribución. Está vinculada con un dado porcentaje p de probabilidad de supervivencia. Generalmente, cuando no se aclara lo contrario, se refiere a n_{50} .

Límite de fatiga, R_f . Es la máxima tensión que un material puede soportar durante n repeticiones o ciclos, cuando n es muy grande (o sea, tiende a infinito; en la práctica se utiliza un n mayor a 10^7 ciclos). Debajo de este nivel de tensión, para materiales ferrosos (especialmente) las alternancias no producen daño apreciable; si se aplica una tensión menor, cabe esperar una vida indefinidamente larga.

Diagrama Tensión - Número de Ciclos (σ - n):

El diagrama σ - n es la forma fundamental de representar los datos de la duración de una probeta a la fatiga, ilustra la variación de vida media en fatiga con la tensión. Se la suele llamar Curva de Fatiga o Curva S-N (Stress-Number of Cycles (N)), e indica la duración de la probeta expresada en números de ciclos hasta la rotura para la máxima tensión aplicada. Representa en ordenadas las tensiones máximas que producen la rotura por fatiga; y en abscisas, su duración en ciclos (suele representarse $\log N$ en lugar de N). Proviene de someter a ensayos una serie de probetas para determinar el número de ciclos (N) que soporta el material a distintos σ , es un modelo simplificado de la manera en que trabaja una pieza bajo cargas de fatiga en general.

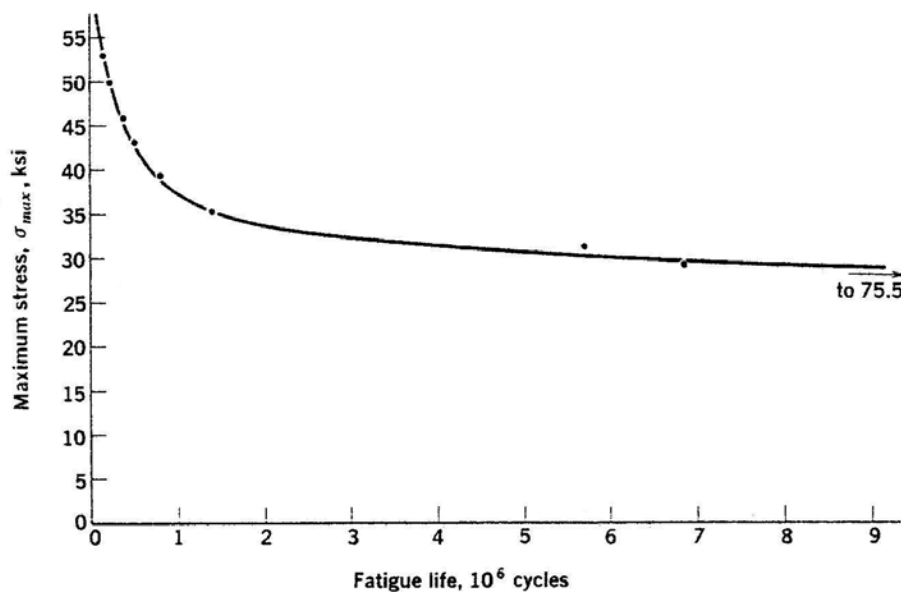


Figura 6: Típico diagrama Tensión Vs. Número de Ciclos

En esta curva pueden distinguirse dos zonas: la que comprende bajo número de ciclos aplicados (fatiga oligocíclica), y la de bajo nivel de tensión aplicada (fatiga multicíclica). En la primera zona, el daño "puro" por fatiga se ve acompañado por el producido por las deformaciones plásticas que son apreciables a esos altos niveles de tensión. La segunda zona es muy larga, lo que obliga a la selección de una escala logarítmica. La rama extrema de la curva se asimila a veces a una recta y otras a una curva.

De todas maneras la porción inferior tiende hacia la horizontal, y en ciertos materiales realmente llega a ser horizontal para todos los propósitos prácticos. Cuando la curva S-N se

acerca asintóticamente a la horizontal, la tensión correspondiente se llama límite de fatiga (también conocido como límite de aguante o duración), y la vida en fatiga a tensiones más bajas se asume que es infinita.

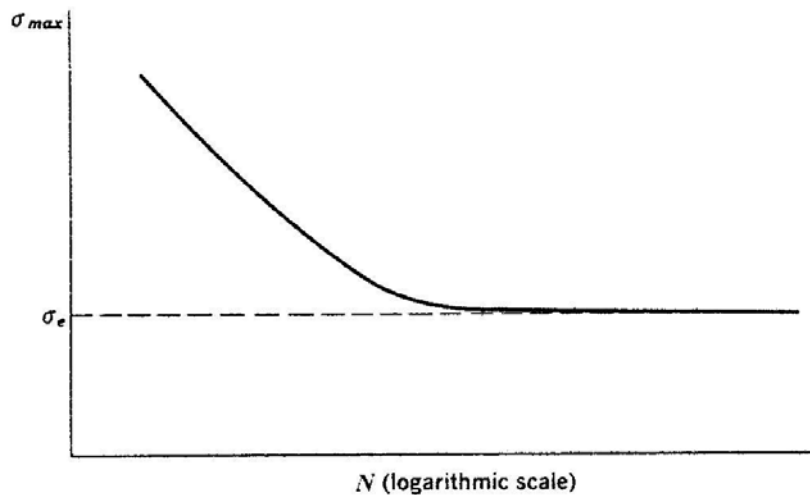


Figura 7: Material con Límite de Fatiga

Del análisis de la curva surge que el número N de ciclos que soporta una probeta antes de fallar aumenta al disminuir la tensión S aplicada. Algunos materiales (ferrosos, aceros, titanio) presentan un tramo horizontal a un valor de tensión bien determinado conocido como Límite de Fatiga (Endurance Limite), valor por debajo del cual se presume que el material durará un número infinito de ciclos sin romper. En el caso de materiales no ferrosos (Al, Mg, Cu) estas curvas son asintóticas a la horizontal, lo cual implica que no existe un verdadero límite de fatiga, por lo tanto se utiliza un número de ciclos N convenido, arbitrariamente inferior a ese valor, debajo del cual se supone que la pieza resistirá infinitos números de ciclos. En resumen, los metales ferrosos tienen generalmente límite de fatiga, mientras que los metales no-ferrosos frecuentemente no.

Debido a estas características el Límite de Fatiga (σ_f) constituye un criterio de diseño muy aceptable. Por ello es una magnitud frecuentemente tabulada, aunque por razones obvias debe basarse en ensayos “finitos”: 500 millones de ciclos para aleaciones de Al y Mg, 100 millones para las aleaciones de base Cu y Ni. Téngase presente que para las frecuencias usuales de las máquinas de ensayo, se requieren 5 semanas para 500 millones de ciclos.

Curvas de Wohler:

Debido a la naturaleza estadística del fenómeno de fatiga en realidad la curva S-N no es la forma en que se presenta el problema en la mayoría de los casos, pues debido a condiciones inherentes al material, de los ensayos de fatiga obtenemos una serie de valores dispersos, siendo imposible predecir la vida de una pieza o estructura con una seguridad completa. Al existir esta indeterminación vemos que el método estadístico es la única forma de tratar el problema, llegando a la conclusión que la probabilidad P de Falla por Fatiga crece con el tiempo, pudiendo llamarse Límite de Fatiga a aquel que nos da un 90% de probabilidad de supervivencia (en aeronáutica se usa la inversa, $P = 0.1$). Al problema de la naturaleza estadística del fenómeno se le agrega la característica errática de la fluctuación de la carga cíclica, lo cual complica aun más el estudio de este fenómeno.

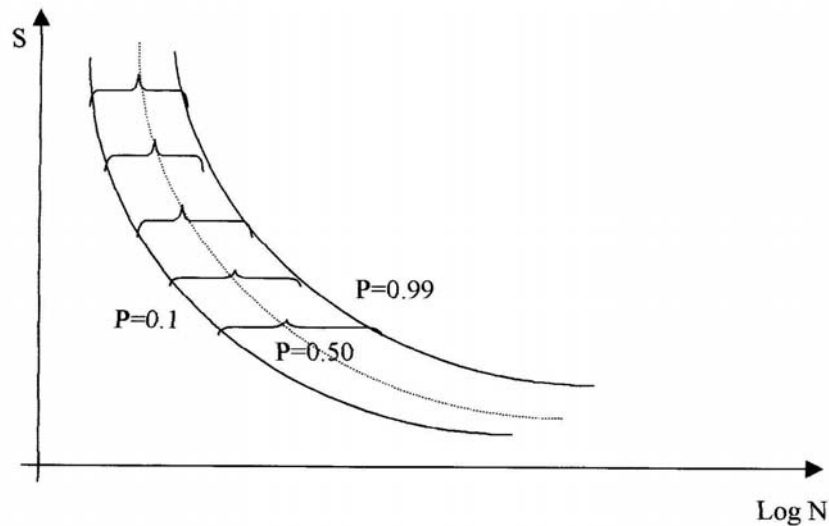


Figura 8: Curvas de Wohler

Las curvas de Wohler constituyen una representación mucho más real del fenómeno de fatiga. Wohler tomó una serie de probetas, las cargó con $\sigma_a = cte$, a una determinada frecuencia y obtuvo una distribución normal de los valores de N en el que fallaba cada una; así determinó el número de N que soporta el material a distintos σ_a y en general con un σ_m común: obteniendo un diagrama Tensión - Número de Ciclos probabilístico, conocido como curvas de Wohler. Su representación gráfica consiste en trazar la curva correspondiente al 50 % de probabilidad de supervivencia (n_{50}), junto con las de las de n_5 y n_{95} , lo que implica definir una banda dentro de la cual se encuentran el 90% de las probetas. En los casos en que N esté en escala logarítmica, se considera que el número de ciclos para un dado nivel de tensión se distribuye en forma normal o gaussiana (Ver Figura 9).

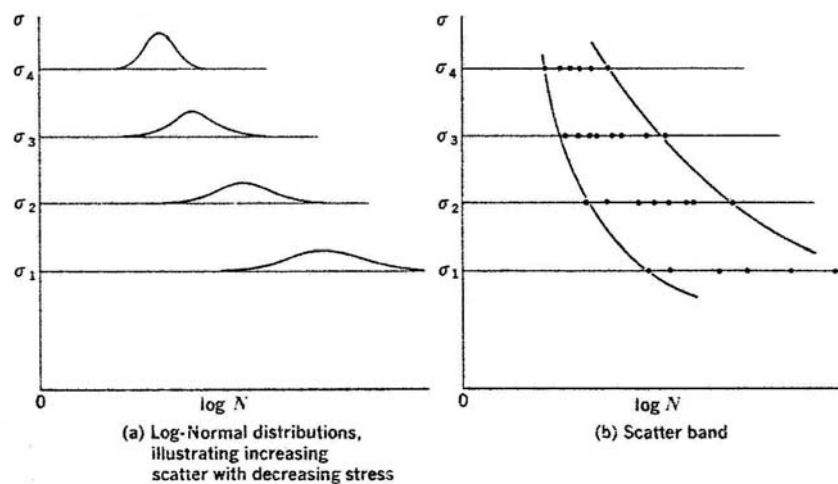


Figura 9: distribuciones de vida en Fatiga

Factores que afectan la fatiga

Diversos factores afectan el valor de la resistencia a la fatiga de un elemento mecánico, como ser: el tipo de material, su grado de aleación, método de fabricación, condiciones y atmósfera de trabajo, presencia de entallas, etc.

Todos estos factores son tenidos en cuenta con coeficientes de corrección, que se aplican al valor de resistencia a la fatiga obtenido para la pieza ensayada en condiciones de laboratorio.

Algunos de estos factores son:

- * Factor de carga: considera si la carga es axial, corte, torsión o combinación.
- * Concentración de tensión o presencia de entallas: se usa ante la presencia de entallas, agujeros o grietas en el material
- * Factor de tamaño: influye la forma y tamaño de la pieza.
- * Factor de temperatura: la baja temperatura de operación puede generar problemas de fragilización del material o por el contrario, las altas temperaturas afectan cuando la tensión se aproxima a la de fluencia.
- * Factor de superficie: debido a que la pieza no tiene el grado de pulido y acabado de la pieza de laboratorio.

Otras formas de carga

Hasta el momento, hemos estudiado solo el caso más simple de fatiga: tensiones uniaxiales que alternan entre tracción y compresión, con $\sigma_m = 0$. Analizaremos ahora brevemente los efectos de ciertas formas más complejas de cargas, como ser tensiones alternadas superpuestas a una tensión constante ($\sigma_m \neq 0$) de tracción o compresión, y la torsión.

* Tensión media ($\sigma_m \neq 0$): ocurre con cierta frecuencia que a una tensión media se le superpone una tensión alternada de cierta amplitud (σ_a). En este caso, es necesario especificar dos variables independientes: σ_m y σ_a , σ_m y σ_{max} , σ_{max} y σ_{min} , σ_{max} y R , etc. Las propiedades de fatiga también deben especificarse en una manera similar. La Figura 10 muestra algunas familias de curvas S-N para diversas condiciones de carga.

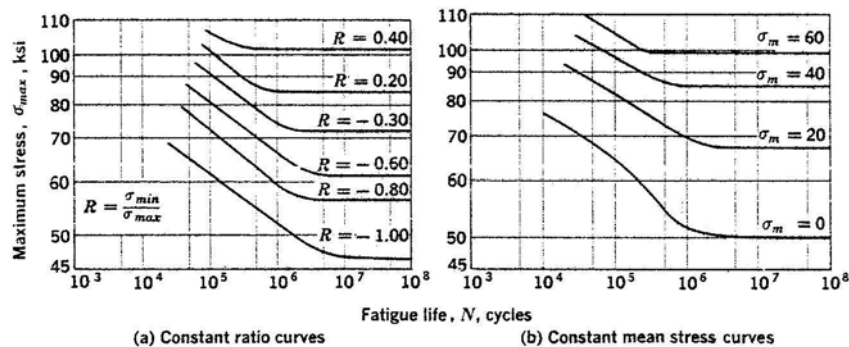


Figura 10: Curvas S-N para distintos valores de R y σ_m

Si llamamos σ_{an} a la amplitud de tensión para una determinada vida en fatiga, vemos que en términos generales la influencia de la tensión media sobre σ_{an} es pequeña, siempre que la tensión de fluencia no sea excedida, por lo tanto, la amplitud de tensión σ_a es el factor controlador en la fatiga simple. De observaciones experimentales vemos que la variación real de σ_{an} es una disminución lineal (ver Figura 11).

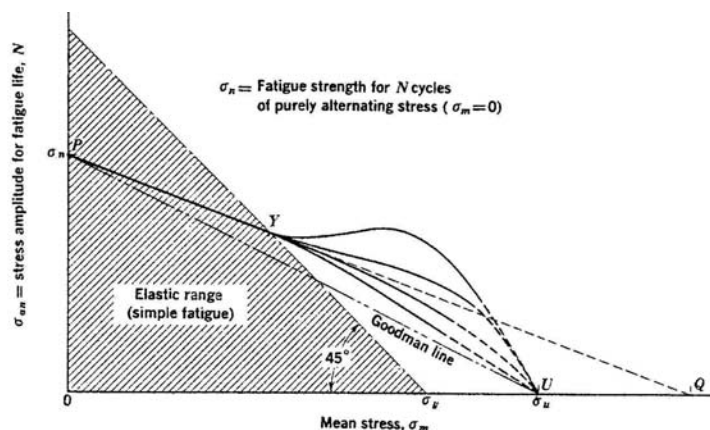


Figura 11: Variación de σ_{an} con σ_m

* **Torsión.** La Fatiga por torsión alternada es un factor importante en la vida de elementos tales como los resortes a espiras, que están sometidos a corte puro según una distribución lineal de tensiones a través de la sección, con el valor máximo sobre la superficie que da al exterior del resorte. La nucleación del daño aparecerá en la superficie, según el plano de corte máximo (ya sea el longitudinal o el transversal), mientras que la propagación se desarrollará a 45° respecto al eje del alambre, en forma frágil hasta la fractura final.

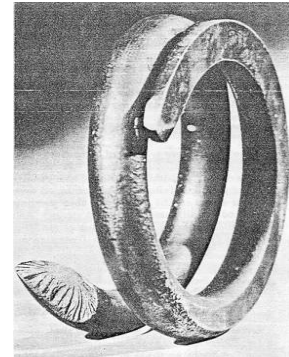


Figura 13: Fractura por fatiga en un resorte helicoidal

Concentración de Tensiones

La concentración de tensiones es responsable de la mayoría de las fallas por fatiga que ocurren en la práctica. Bajo cargas estáticas en materiales dúctiles el pico de tensión que se produce en la entalla (u otra discontinuidad) normalmente incrementa la fluencia en ese punto y la carga se transfiere a otras partes de la pieza; o sea, la fluencia remueve la concentración de tensiones. Bajo cargas repetidas, la fluencia se restringe a regiones mucho más pequeñas y no puede hacer mucho para distribuir las tensiones, los ciclos agotan rápidamente la capacidad de deformación en frío (stress-hardening) llevando rápidamente a la fisura.

El **factor de concentración de tensiones** bajo régimen elástico Kt es utilizado para computar la tensión, provocando una reducción en la tensión real aplicada.

$$\sigma'_n = \sigma_n / Kt$$

Los valores de Kt dependen de la forma de la discontinuidad (entallas, agujeros, filetes, etc.); generalmente son obtenidos de tablas (ver Figura 14), siendo su valor máximo $Kt = 3$.

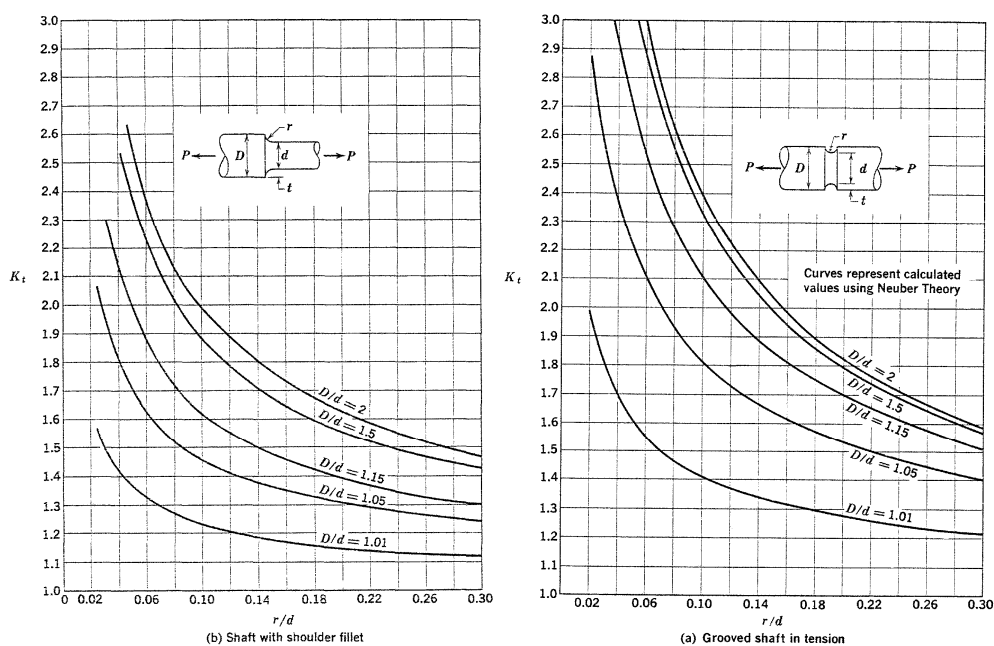


Figura 14: Curvas con valores de Kt : factor de concentración de tensiones

En general, el pequeño alivio dado por la fluencia localizada y el efecto del incremento de la tensión local en la raíz de la entalla reducen algo el valor de concentración de tensiones elástico. En realidad, la concentración de tensiones efectiva se mide con el **factor de reducción de resistencia en fatiga K_f** , que se define como la relación entre la resistencia a la fatiga en una pieza sin concentración de tensiones (σ_n) y la resistencia a la fatiga de la misma pieza con una concentración de tensiones especificada (σ'_n)

$$K_f = \sigma_n / \sigma'_n$$

En general, el valor de K_f es obtenido experimentalmente y suele ser menor que el valor de K_t . El valor de K_f se ve influenciado por variables como: el tipo de material y sus tratamientos, la forma y tamaño de la discontinuidad, la magnitud de la tensión y la cantidad de ciclos.

Un factor útil para el estudio de los efectos de la concentración de tensiones es el **factor de sensibilidad a la entalla** en fatiga: q

$$q = (K_f - 1) / (K_t - 1)$$

El numerador representa la efectividad de la entalla en fatiga, y el denominador representa su efectividad cuando la situación es puramente elástica.

Si $K_f = 1$, la entalla no tiene efecto en la fatiga, y la sensibilidad a la entalla es cero (material insensible a los efectos de entallas).

Si $K_f = K_t$, la entalla es totalmente efectiva en fatiga y la sensibilidad a la entalla es uno (material sensible a la entalla).

Si conocemos el valor de K_f para una dada condición, podemos determinar la resistencia a la fatiga en la entalla a partir de la resistencia a la fatiga en el resto de la pieza mediante:

$$\sigma'_n = \sigma_n / K_f$$

Como la concentración de tensiones es una fuente muy importante de daño cuando actúa la fatiga, se debe tratar que su valor sea el menor posible. Cuando haya cambios de secciones, se deben tratar de evitar los bordes agudos, o introducir filetes para reducir la concentración de tensiones.

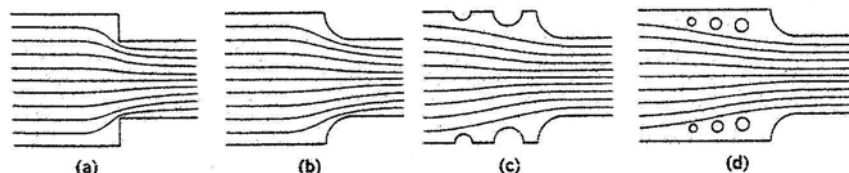


Figura 15: Formas de aliviar la concentración de tensiones.

Tamaño

La resistencia a la fatiga depende del tamaño de la pieza, consecuencia directa de la naturaleza estadística de la fatiga. La rotura en fatiga depende de la distribución aleatoria de “puntos débiles” o imperfecciones en el material; consecuentemente, una pieza de mayor tamaño tendrá una mayor distribución de puntos débiles que una más pequeña, por lo tanto es de esperarse que tenga una menor resistencia a la fatiga, o sea, que falle a tensiones más bajas.

Tasa (rapidez) de Ciclado

En general, la resistencia a la fatiga se incrementa con el aumento de la tasa de ciclado (alta frecuencia), probablemente debido al incremento en la tasa de deformación, pero su efecto es despreciable (siempre que se trabaje a temperatura ambiente).

El efecto de la tasa de ciclado se hace sentir cuando las pérdidas por histéresis son apreciables. Esto ocurre en materiales de alta fricción interna, o sometidos a tensiones suficientemente altas como para provocar deformaciones plásticas.

Temperatura

Si la temperatura es lo suficientemente alta como para producir creep, su efecto es importante en la fatiga ya que, en este caso el efecto de la variación de la resistencia a la fatiga con la tasa de ciclado es muy importante y además, aparece una componente de tensión constante (σ_m) que tiende a incrementar el creep, que se suma al efecto de la fatiga. Sin embargo, no debemos olvidar que mientras el creep es un fenómeno netamente dependiente del tiempo, la fatiga depende fundamentalmente del número de repeticiones de la carga (ciclos).

Es importante señalar que las altas temperaturas disminuyen la sensibilidad a la entalla; pues se enfatiza el efecto endurecedor de la alta tasa de deformación local en la raíz de la entalla.

Efectos superficiales

La mayoría de las fisuras por fatiga se nuclean en la superficie de las piezas, por lo tanto, una superficie rugosa disminuye la resistencia a la fatiga (hasta en un 20%).

La superficie de las piezas sometidas a fatiga debe ser lisa y tener un buen acabado superficial. Un adecuado granallado y pulido pueden incrementar el valor de la resistencia a la fatiga.

Otro tratamiento superficial usual para piezas que sufrirán fatiga es la producción de tensiones residuales de compresión en dirección paralela a la superficie mediante shot peening o rolado.

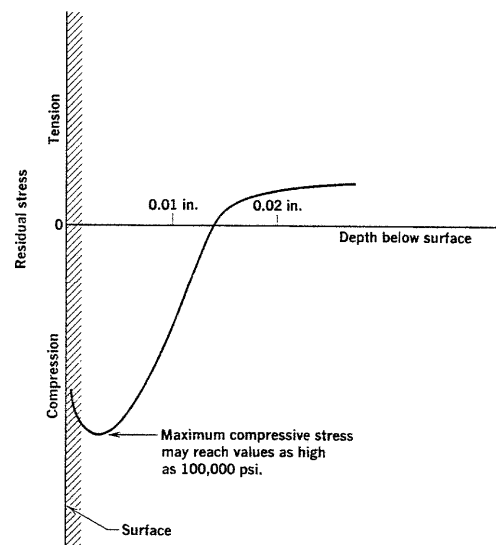


Figura 16: Variación de la tensión residual en superficies con shot-peening.

Subtensionado

Se ha observado en algunos materiales con límites de fatiga bien definidos que la aplicación de ciclos con tensiones por debajo del límite de fatiga, σ_e , pueden aumentar la resistencia del material. Si estos ciclos son aplicados incrementando los niveles de tensión, comenzando justo por debajo de σ_e y aplicando un gran número de ciclos en cada nivel, se ve que estos materiales soportan tensiones muy superiores a σ_e sin manifestar fallas. Este proceso de aplicar repeticiones de ciclos incrementando sucesivamente sus niveles, mejorando así las propiedades en fatiga del material, se llama subtensionado (understressing).

Daños por Fatiga

Como ya vimos, cualquier espectro de carga complicado puede ser reemplazado por un espectro simplificado compuesto por varios grupos de ciclos con diferentes valores de σ_m y σ_a (Ver Figura 4). Ya hemos visto los métodos para analizar la fatiga para ciclos con valores determinados de σ_m y σ_a , ahora veremos los efectos de la aplicación sucesiva de varios ciclos a distintos niveles de tensión.

Debemos tener en cuenta que las fisuras por fatiga se nuclean en los primeros ciclos de carga, pero su propagación involucra muchos factores, uno de los más importantes es el gradiente de tensiones. Las fisuras comienzan en regiones de altas tensiones, pero si crecen en la dirección en que las tensiones disminuyen, su crecimiento es lento e incluso puede llegar a detenerse. Además, las fisuras pueden propagarse a diferentes velocidades en distintos materiales y bajo diferentes condiciones.

El orden en el cual los niveles de tensión son aplicados tiene un efecto importante en el progreso del daño por fatiga. Es lógico pensar que si aparece una fisura con la aplicación de altos niveles de tensión, no se propagará rápidamente si luego se aplican tensiones más bajas; por el contrario, si aparece una fisura con la aplicación de bajas tensiones, es probable que se propague rápidamente si se aumentan las tensiones. Estos efectos tienden a promediarse si los niveles de tensión se aplican aleatoriamente.

La **teoría del daño acumulado** estipula que cada serie de ciclos de tensión se computa como una cierta fracción del daño total, y cuando estas fracciones sumadas llegan a la unidad, ocurre la fractura. La fracción del daño total ocasionado por una serie de ciclos a un determinado nivel de tensión está dado por la relación entre el número de ciclos aplicados (a ese nivel de tensión), y la vida en fatiga a esa tensión (relación de ciclos $C = n_i / N_i$, donde N se obtiene de las curvas S-N para un dado p por ciento de supervivencia). Matemáticamente:

$$\sum n_i / N_i = 1$$

La teoría del daño acumulado puede graficarse en la curva S-N (ver Figura 17). Si comenzamos los ciclos de cargas en σ_1 , y aplicamos una cantidad de ciclos igual a n_1 , los ciclos remanentes a ese nivel de tensión serán $N_1 - n_1$, en escala logarítmica, $\log N_1 - \log n_1 = \log (N_1/n_1)$.

Sabemos que: $n_1/N_1 + n_2/N_2 = 1 \rightarrow n_1/N_1 = 1 - n_2/N_2 = (N_2 - n_2) / N_2$; por lo tanto, los ciclos remanentes si se aplica un nuevo nivel de tensiones (σ_2), serán iguales a $\log [N_2/(N_2 - n_2)]$.

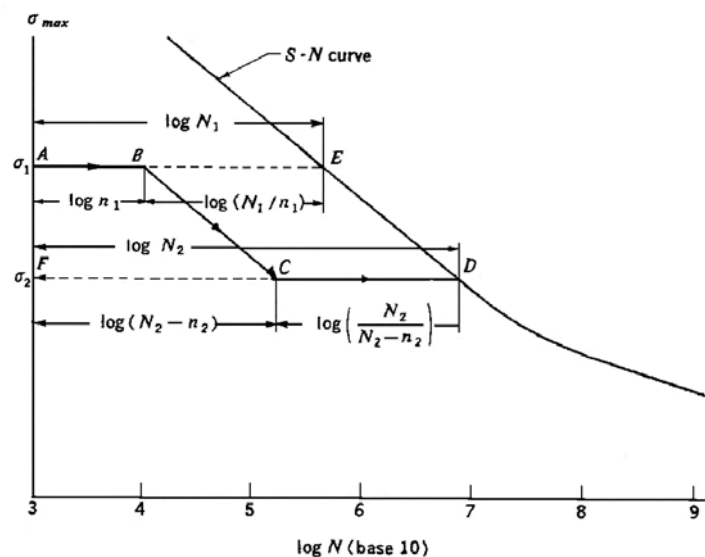


Figura: 17: Diagrama S-N ilustrando el progreso de la aplicación de carga a dos niveles de tensión

Es recomendable para computar los valores de N_i , utilizar las curvas S-N para el mayor porcentaje de supervivencia (o lo que es lo mismo, la curva S-N más baja) (ver Figura 8)

Criterios de Diseño:

A partir de la incertidumbre que genera el desconocimiento de las causas que originan la Fatiga, se debe necesariamente recurrir a ensayos, cálculos estadísticos y simulaciones para arribar a datos confiables. Para calcular la VIDA REAL de una pieza la única forma es efectuar los ensayos necesarios simulando las condiciones de servicio de la forma más real posible. Surgen así dos criterios de diseño:

A) FALLA SEGURA (SAFE-FAIL): asegura que la falla de la pieza no afecte al resto del conjunto o estructura.

B) VIDA ASEGURADA (SAFE-LIFE): asegura la vida del componente, sometido a la fatiga, durante determinado tiempo (o número de ciclos) de uso.

Detección y vigilancia de fallas; evaluación no destructiva.

Las fallas producidas por fatiga (especialmente las fisuras) se detectan aplicando el método no destructivo más apropiado a las circunstancias. Así, por medio del ensayo con partículas magnetizables o con líquidos penetrantes, pueden detectarse fisuras incipientes, mientras que la radiografía (con rayos equis o gamma) permitirá determinar fallas de carácter interno. El método ultrasónico permitirá actuar en principio sobre las dos clases de fallas, en especial sobre las internas.

Remedio y prevención de fallas; mantenimiento; normas de diseño y especificaciones.

Ya hemos visto que la fisuración es la manifestación de la falla por fatiga. El remedio a la fisuración consiste en remover el material adyacente a la fisura sin dejar concentración de tensiones, y proceder eventualmente a rellenarlo con material de aporte. Este procedimiento, si bien utilizado frecuentemente, es raramente válido. Antes de utilizarlo debe tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

- * Cuando aparece la fisura la pieza ya está dañada por fatiga. En efecto, la fisura no es en estos casos una causa, sino un efecto. Si se elimina la fisura, la fatiga no desaparece de las zonas adyacentes que pueden estar afectadas.
- * La limpieza de la fisura debe consistir en quitar suficiente material como para eliminar una posterior propagación por un fondo de grieta no eliminado.
- * El relleno de la cavidad con soldadura por ejemplo, puede llevar a más fisuración si no se observan cuidadosamente las reglas, especialmente con relación a la eliminación de tensiones residuales;
- * En todos los casos, la pieza reparada debe ser objeto de controles periódicos, especialmente frecuentes en los primeros momentos.

El mantenimiento preventivo es una de las medidas más efectivas para evitar los desastres que pueden acarrear las roturas por fatiga. Consiste en la aplicación de métodos no destructivos como los ya mencionados en la vigilancia de los elementos, en especial en sus zonas críticas tendientes a la detección temprana de fisuras: es decir antes que tienda a alcanzar su longitud crítica.

La programación de este mantenimiento deberá efectuarse teniendo en cuenta el mecanismo de crecimiento de fisuras, que depende del número de ciclos aplicados.

En cuanto al diseño, podemos mencionar las siguientes consideraciones:

- * Evitar marcas de herramientas en las zonas críticas.
- * Evitar los bordes agudos.
- * Dentro de lo posible, efectuar ensayos a escala y en condiciones tan reales como sea posible.