

Ensayo de fatiga. Representación de los resultados y dimensionamiento de la vida a fatiga.

Mercedes Rodenas Pastor

Profesora de Tecnologías del IES. Cristóbal Pérez Pastor. Tobarra, Albacete.

Resumen.

Las propiedades mecánicas dinámicas son difíciles de desarrollar de manera completa en el currículo del área de Tecnología Industrial, debido a que es casi imposible disponer del equipamiento necesario para su ensayo. Los vídeos existentes sobre estos ensayos, junto a la correcta interpretación de los resultados obtenidos, nos permitirá acercarnos a esta parcela de la Ciencia de los Materiales desde la Enseñanza Secundaria. Los ensayos de fatiga en materiales metálicos nos ofrecen como resultado el número de ciclos de previos a la rotura. La forma en que se representan, sus posibles modelizaciones y el criterio utilizado para su dimensionamiento, es el eje central del siguiente artículo.

1.-Introducción

Los materiales utilizados normalmente en ingeniería se suelen clasificar frente a la fractura como materiales dúctiles o frágiles, siendo su principal característica la capacidad para sufrir deformación plástica ó no.

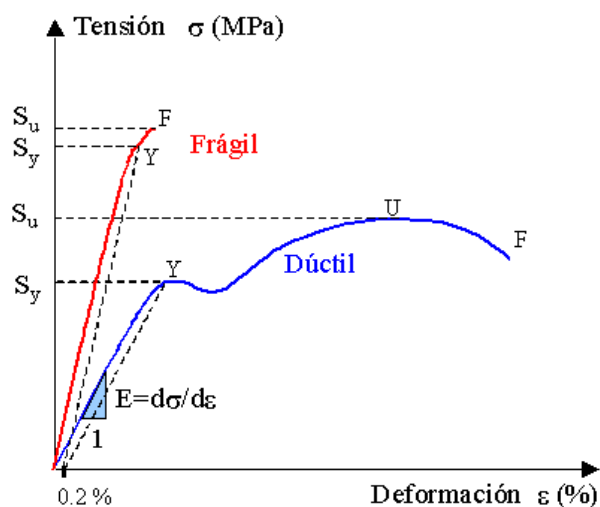


Figura 2.13.- Diagrama tensión deformación.

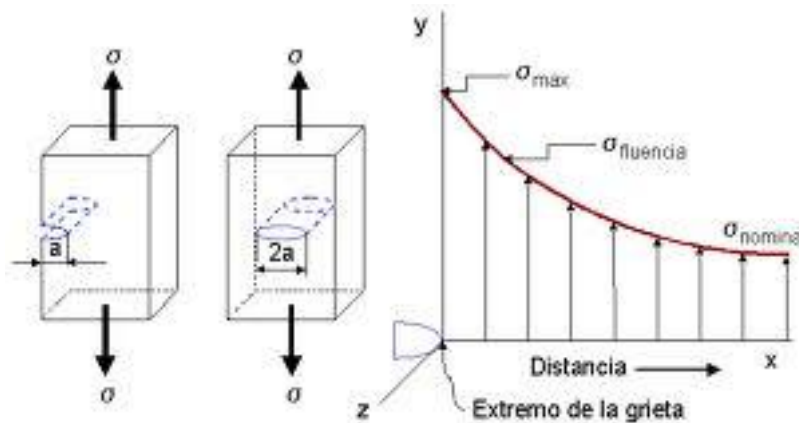
El reto actual es predecir y controlar que factores hacen que un material dúctil sufra un fallo de forma frágil. Es normal encontrar fracturas de tipo mixto, dúctil-frágil, que inician con procesos de fluencia tipo dúctil y se ultiman con fracturas tipo frágil.

Los procesos de fractura están condicionados por la estructura del material, condiciones de aplicación de la carga, diseño, y las condiciones ambientales. La fractura de los materiales requiere de la existencia de defectos, grietas premonitorias o resultantes del propio proceso de

fractura, así como ciertas formas geométricas, agujeros, etc, que actúan como multiplicador de tensiones.

La existencia de estos defectos o grietas microscópicas es la justificación que Griffith, en la década de los años veinte, propuso a la discrepancia entre la resistencia cohesiva teórica y experimental.

$$\sigma_f = \sigma \left(1 + \sqrt{\frac{4a}{\rho e}} \right)$$



[Figura 2.14. a\) Entalla superficial. b\) Entalla cerrada. c\) Representación del aumento de tensiones en fondo de entalla.](#)

(Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales UPV)

La tenacidad es una propiedad que nos indica el comportamiento dúctil o frágil de un material y su valor es una constante del material. Siendo la condición de inestabilidad, para que se produzca fractura frágil

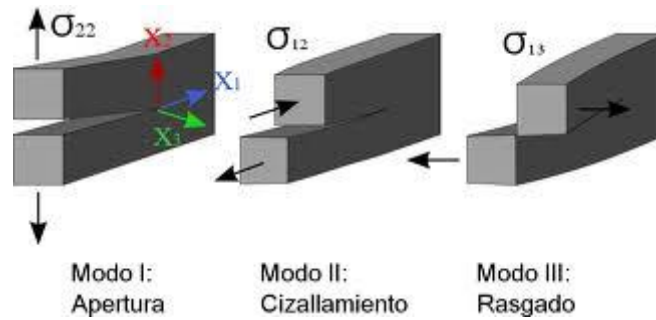
$$K_{ICt} = \sigma_c \sqrt{\pi * a_c} = \sqrt{G_{ICt} * E}$$

σ_c = tensión de trabajo; a_c = tamaño de la grieta;

G_{ICt} = tenacidad de fractura en tensión plana; E= módulo elástico

En los materiales con comportamiento dúctil – frágil la grieta sufre un avance estable necesitando un aumento de la carga para continuar el avance de la grieta. El crecimiento estable esta unido a la deformación plástica en fondo de entalla, que produce un endurecimiento, aumento de tensiones necesarias y una fragilización de la zona por nucleación de microgrietas. Son los materiales metálicos los que presentan normalmente este comportamiento.

Los modos de fractura se clasifican en tres tipos:



2.- FRACTURA POR FATIGA

La fatiga se puede definir como el fenómeno de deterioro irreversible de un material bajo cargas cíclicas, en estas condiciones la fractura se produce a tensiones menores que en el caso de las cargas estáticas y normalmente sin previo aviso, ya que no se observan deformaciones plásticas, como ocurre en el caso de las cargas estáticas.

Otra definición más amplia podría ser “La fatiga en sólidos es un fenómeno en el que cargas variables pueden originar grietas las cuales pueden crecer de forma estable”.

[En el video tutorial de la UPV podemos observar cómo se realiza e interpreta un ensayo de fatiga.](#)

Los fallos por fatiga pueden ser reconocidos fácilmente por unas zonas características concéntricas con el punto de inicio de la grieta, que avanzan conforme esta lo hace hasta que se produce la rotura frágil del material, estas siempre se encuentran en la superficie fracturada, (figura. 2.1)

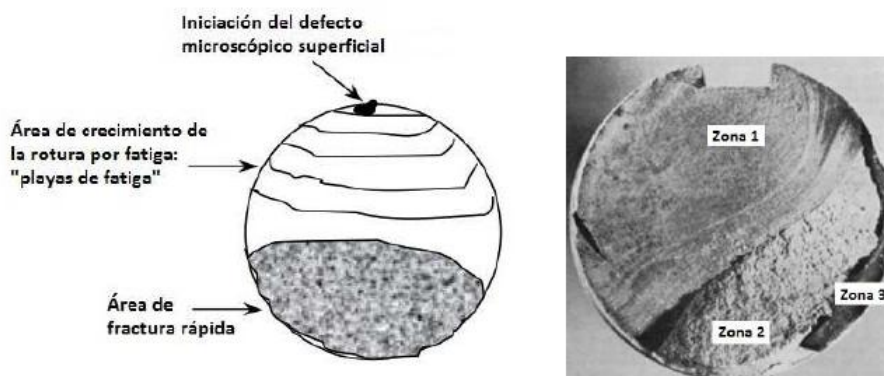


Fig. 2.1. Superficies fracturadas por fatiga.

Zona 1: Es la zona con más sección, corresponde a la propagación lenta de la grieta (fuente de concentración de tensiones). Suele tener un aspecto liso y a veces es posible distinguir la propagación de la grieta ciclo a ciclo (cada línea o estría de la figura) una vez rota la pieza. La mayor o menor nitidez con las que aparecen estas líneas o estrías dependen de la natu-

raleza del material. La zona 1 será mayor para menores esfuerzos. Como se puede comprobar en la Imagen 2.1.

Zona 2: Corresponde al crecimiento rápido de la grieta, presentando una superficie irregular, y cubre casi el resto de la sección del eje.

Zona 3: Finalmente, la sección neta de la pieza queda tan reducida que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista puramente estático, produciéndose la rotura final en un ciclo de carga.

El aspecto macroscópico global de la rotura por fatiga, incluso en metales, puede ser catalogado como un tipo particular de fractura frágil, en el sentido de que no hay deformación plástica importante asociada con la rotura. Si observamos con detalle esta superficie, es posible encontrar detalles que nos revelan la forma en que se ha producido el avance de la grieta.

El proceso de fatiga se desarrolla en tres etapas: Iniciación o incubación de la grieta, propagación de la grieta y rotura.

Según se ha visto anteriormente, la fractura por fatiga ocurre como resultado de una grieta, que por lo general empieza en alguna discontinuidad en el material o en cualquier lugar que actúa como concentrador de tensiones. Según crece la grieta, las tensiones en la sección transversal a la aplicación de carga crecen hasta alcanzar el nivel suficiente para provocar la fractura catastrófica del material.

La grieta inicial (etapa 1) que se forma es transcristalina siguiendo la dirección de los máximos esfuerzos cortantes; es decir, a 45° de las tensiones axiales. Por este motivo, la superficie de fatiga que se forma en esta etapa tiene una apariencia plana y sin características.

La etapa de crecimiento de grieta o etapa 2, es la zona de fatiga sobre la superficie de fractura y se caracteriza por dos tipos de marcas, denominadas marcas de playa y estrías de fatiga. Las marcas de playa son de dimensiones macroscópicas, visibles en una superficie de fractura a simple vista, y aparecen cuando se producen cambios en la velocidad de propagación de la grieta debido a cambios en la amplitud de tensión. Las estrías de fatiga son de tamaño microscópico y sólo pueden observarse por SEM (scanning electrón microscope) y representan la progresión del frente de grieta en cada ciclo, su ancho depende y se incrementa con el aumento del rango de tensiones. La presencia de marcas de playa y/o estrías sobre la superficie de fractura confirma que la causa ha sido por fatiga, no obstante, la ausencia de una o de ambas marcas no excluye a la fatiga como causa de la fractura.

En esta etapa la propagación es estable y se ajusta a una ley potencial de intensidad de tensiones, de acuerdo a la ley empírica que propuso Paris:

$$\frac{da}{dN} = C * \Delta K_I^m$$

Donde a es el tamaño de la fisura, N el número de ciclos y C y m son constantes que dependen del material y del medio ambiente. K_I es el rango del factor de intensidad de tensiones, calculado como:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta \sigma * \sqrt{\pi a}$$

K_{max} y K_{min} son los valores máximo y mínimo respectivamente del factor de intensidad de tensiones durante un ciclo de tensión, que dependen de la geometría de la probeta y de la longitud de la fisura. A medida que crece el tamaño de la grieta, si las tensiones alternantes son constantes, aumenta K_I y en consecuencia su velocidad de crecimiento: da/dN .

La etapa 3 de la fractura de fatiga tiene lugar cuando la grieta de fatiga alcanza una determinada longitud crítica. En esta etapa, la grieta avanza rápidamente durante un ciclo de carga. Como resultado, después de haber cargado el componente con tensiones relativamente bajas, se produce de manera imprevista la fractura, sin ningún tipo de cambio en el aspecto exterior de la pieza. La fractura puede ser dúctil o frágil; cuando hay evidencias de deformación plástica se tomará como dúctil y en su ausencia como fractura frágil.

El tamaño relativo entre la zona de fractura final en comparación con la zona de fatiga está relacionado con la intensidad de las cargas aplicadas a la estructura. Si el nivel de tensiones aplicadas ha sido muy elevado, el área de la zona de fatiga es muy pequeña en comparación con la zona de fractura final, y en cambio, cuando se aplican niveles de tensión bajos, se observa que en la superficie de fractura la extensión de la zona de rotura final es muy pequeña.



Imagen 2.1- Secuencia de probetas ensayadas a fatiga de material de entrega ordenadas según niveles de carga descendiente hacia la derecha.

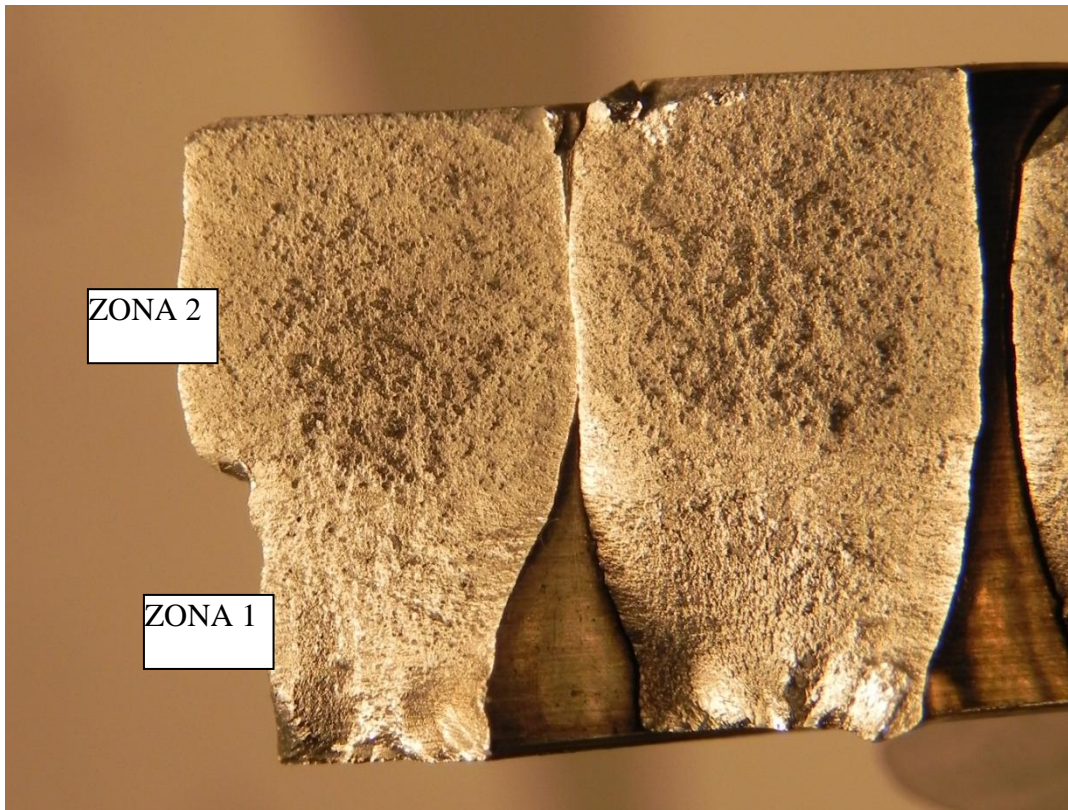


Imagen 2.2- Detalle de probetas ensayadas a fatiga de material de entrega.

Las conclusiones que se pueden extraer sobre el comportamiento general a fatiga en metales son:

a) Los metales, no poseen homogeneidad en su estructura, ni continuidad de resistencia (aún a pesar de la hipótesis del continuo de la elasticidad clásica) en los metales que poseen cristales de una sola fase, que varían de tamaño y orientación, hacen que la resistencia promedio sea sólo válida para sollicitaciones estáticas, debido a que estas sollicitaciones permiten un acomodamiento adaptativo de los cristales a medida que aumenta la carga.

b) A su vez las cargas variables tienen su aplicación prácticamente instantánea, lo cual no deja mucho margen temporal para el acomodamiento, siendo este el motivo de la separación de los cristales en aquellos lugares donde hay menor cohesión intercrystalina, generando el inicio de una microfisura, la que por el efecto de concentración de tensiones producida por la microentalla, crea en esa zona un incremento de tensiones que va aumentando rápidamente la fisura hasta que la sección resistente no puede soportar la carga, produciéndose en ese instante la rotura súbita de la pieza.

c) Las micro-fisuras o grietas iniciales de fatiga comienzan sobre la superficie de las piezas en varios puntos simultáneamente y se propagan a los sustratos inferiores. Estas grietas que son normalmente muy pequeñas y difíciles de observar, pero se propagan en conjunto ante la presencia de un defecto dominante pueden llevar rápidamente a la catástrofe.

En consecuencia la vida o la duración de una pieza se pueden maximizar si se tienen en cuenta las siguientes pautas:

1) Minimizando defectos superficiales: con esto se tiene un gran cuidado de no generar superficies demasiado rugosas y en consecuencia susceptibles a los fenómenos de fatiga, y en consecuencia las superficies son cuidadosamente protegidas.

2) Maximizando el tiempo de iniciación: se ha observado que las tensiones residuales superficiales se reducen por medio de procesos de acabado de manufactura como el granallado o el bruñido (Shoot peening).

3) Maximizando el tiempo de propagación: también son importantes las propiedades del sustrato superficial, dado que las grietas se propagan más rápido por las fronteras reticulares que a través de los granos. De esta manera empleando materiales que no presenten granos alargados en la dirección de propagación de la grieta permite maximizar el tiempo de propagación.

4) Maximizando la longitud crítica de la grieta.

3.- CURVAS S-N ó DIAGRAMAS DE WÖHLER.

El método más extendido para analizar y predecir el comportamiento a fatiga en el rango de la fatiga de alto número de ciclos, es el estudio de la amplitud o del rango de la tensión frente al número de ciclos totales a fractura. Para este método se utilizan las conocidas curvas S-N o diagramas de Wöhler. Las curvas S-N se representan de forma directa o de forma semilogarítmica S-logN o logS-LogN.

Las curvas S-N se suelen trazar para ensayos de fatiga con $R=-1$ es decir tensión media igual a cero, ya que la mayoría de los ensayos se realizan con máquinas de flexión rotativa.

Mediante las curvas S-N se puede determinar el valor de la tensión límite de fatiga, el número de ciclos de vida máxima para una determinada tensión de trabajo y viceversa.

A continuación se presenta la curvas S-N en sus posibles representaciones, para una aleación de aluminio Al-Zn-Mg AA7020, el ensayo se ha considerado finalizado para $1,5 \cdot 10^6$ ciclos.

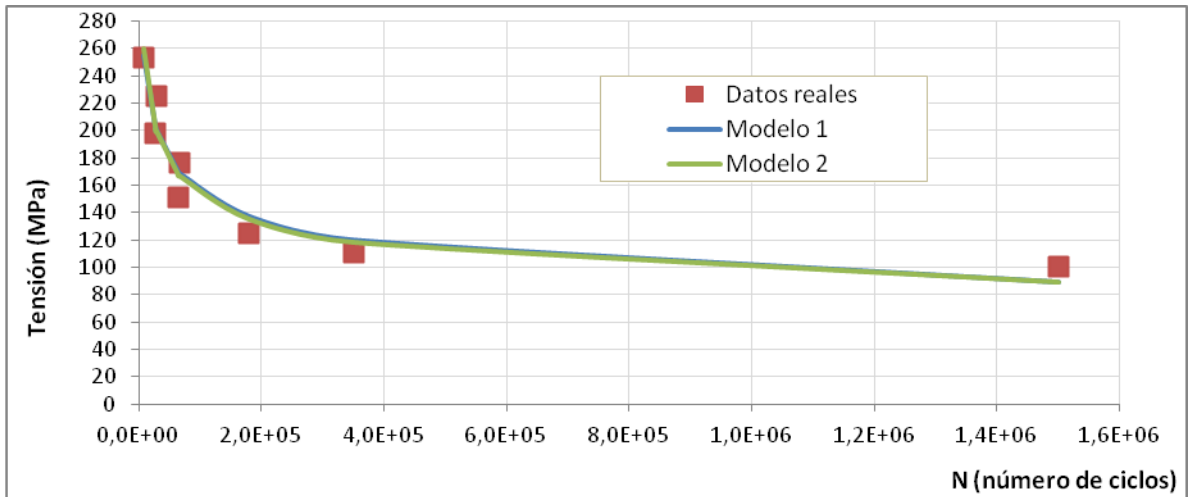


Diagrama S-N modelizado para las probetas AA7020 T6.

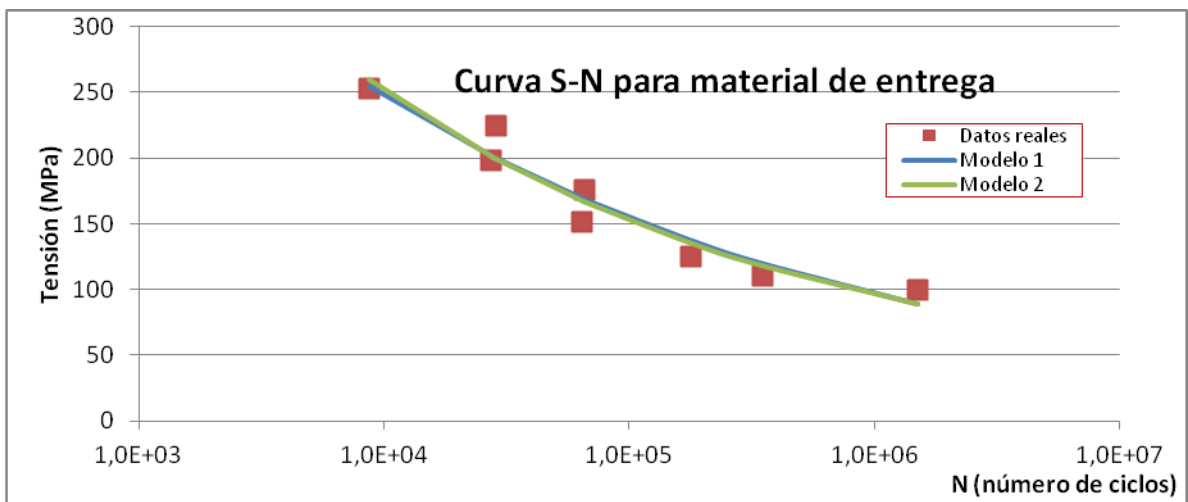


Diagrama S-N modelizado con escala semilogarítmica para las probetas AA7020 T6.

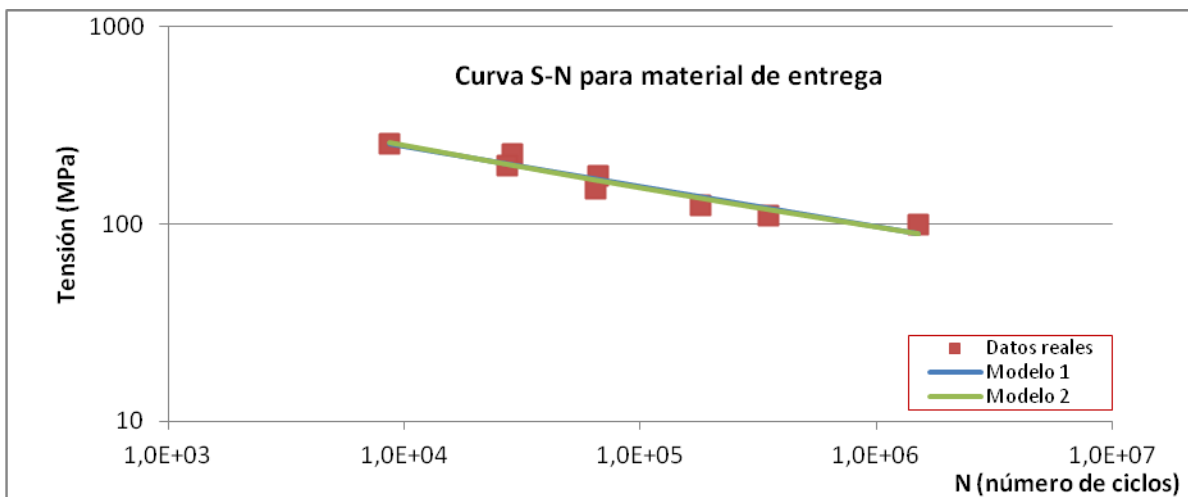


Diagrama S-N modelizado con escalas logarítmicas para las probetas AA7020 T6.

4. DIMENSIONAMIENTO DE LA VIDA A FATIGA.

Una vez obtenidos los resultados de un ensayo de fatiga y representados en los gráficos correspondientes pasamos a utilizarlos en nuestros cálculos para dimensionar una determinada pieza.

Dimensionamiento clásico a fatiga

El cálculo clásico a fatiga se reduce al cálculo de Elasticidad, limitando las tensiones aplicadas inferiores a σ_1 , de esta forma el material se sitúa en la zona de vida infinita. Este cálculo implica un mal aprovechamiento del material, especialmente si el número de ciclos requeridos es inferior a 10^7 . Para los gráficos anteriores el valor del límite de fatiga, que sería la asíntota horizontal a la que tiende la curva, tendría un valor aproximado de 80 MPa.

Dimensionamiento por el criterio de la no fisuración $N = N_g$

El cálculo en la hipótesis de deterioro nulo usa el concepto del límite de tensión para la iniciación de la grieta. Es la condición equiparable en el cálculo de Elasticidad, del límite elástico de tensiones. Este criterio con los gráficos anteriores no puede ser determinado, deberíamos trazar las curvas de dañado.

Dimensionamiento por el criterio de la fractura total $N = N_g + N_c$

Este criterio incluye además del número de ciclos de inicio de grieta N_g , el número de ciclos del crecimiento de la grieta N_c hasta la fractura. En los gráficos anteriores podemos ver como para una tensión de 110 MPa tenemos una vida de 350000 ciclos.

Bibliografía consultada.

1. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Willian F. Smilh.
2. Ensayo de fatiga de los materiales metálicos. Definiciones y símbolos. Norma UNE 7117.
3. Clases y ejecución de los ensayos de fatiga de los materiales metálicos. Norma UNE 7118.
4. Tecnología de Materiales. Carlos Ferrer Giménez, Vicente Amigó Borrás. UPV
5. Teorías de falla dinámica, Análisis de falla por fatiga. UTN-FRBB Cátedra: Elementos de Máquinas. Profesor: Dr. Ing. Marcelo Tulio Piovan

SOCIEDAD DE LA INFORMACION

www.sociedadelainformacion.com

Edita:



Director: José Ángel Ruiz Felipe

Jefe de publicaciones: Antero Soria Luján

D.L.: AB 293-2001

ISSN: 1578-326x