

eman ta zabal zazu



Universidad del
País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

OCW
OpenCourseWare

2018

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y SUS PROPIEDADES (I)

Ane Miren García Romero
Nuria Monasterio Guisasola

TEMA 7: ROTURA Y FALLO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

OBJETIVOS

- Ser capaz de identificar las fracturas frágiles y las fracturas dúctiles
- Comprender el significado de la tenacidad de la fractura
- Diferenciar entre materiales frágiles y materiales tenaces
- Distinguir los mecanismos que imparten tenacidad en distintos tipos de materiales
- Ser capaz de identificar y determinar la transición dúctil-frágil de los materiales
- Conocer los principios de la mecánica de la fractura
- Identificar los procesos de fatiga a que se someten los materiales, así como el modo de determinar y predecir su comportamiento en condiciones de fatiga
- Identificar las condiciones que conducen a la fluencia de los materiales, los mecanismos que operan y las recomendaciones para asegurar la vida en fluencia de los componentes

ÍNDICE

- 7.1- Materiales reales versus materiales ideales
- 7.2- Fracturas dúctiles y fracturas frágiles
 - 7.2.1- Fracturas dúctiles
 - 7.2.2- Fracturas frágiles
- 7.3- Concentradores de tensión
- 7.4- Mecánica de la fractura lineal elástica
- 7.5- Tenacidad a la fractura
- 7.6- Mecanismos que proporcionan tenacidad a la fractura
- 7.7- La transición dúctil-frágil
- 7.8- Fatiga
 - 7.8.1- Fractura por fatiga
 - 7.8.2- Etapas de la fatiga
 - 7.8.3 Fatiga de alto ciclo
 - 7.8.4- Fatiga oligocíclica
 - 7.8.5 Las curvas SN

(Continúa en la página siguiente)

TEMA 7: ROTURA Y FALLO MECÁNICO DE LOS MATERIALES

ÍNDICE

(Continúa de la página precedente)

7.8.6 Resistencia en fatiga y vida en fatiga

7.8.7- Diseño para no fallar en fatiga

7.8.8- Ensayos de crecimiento de grieta en fatiga

7.8.9- Factores que afectan a la vida en fatiga

7.9- Fluencia

7.9.1 Efecto de la temperatura y la carga en la fluencia

7.9.2 Mecanismos de fluencia

7.9.3 Componentes sometidos a fluencia

La autoría de las imágenes que contiene este documento, así como las referencias bibliográficas, se incluyen en la última página.

RECURSOS ADICIONALES RECOMENDADOS

<https://web-argitalpena.adm.ehu.es/listaproductos.asp?IdProducts=UCWEB024559&titulo=Mec%20nica%20de%20fractura>

<http://www.fatiguefracture.com/>

<http://www.matscieng.sunysb.edu/disaster/>

<http://academic.uprm.edu/~lgodoy/courses/INCI6017/inci6017-3.htm>

https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/brittle_fracture/index.php

<http://web.mit.edu/course/3/3.11/www/modules/frac.pdf>

<http://www.mate.tue.nl/~piet/edu/frm/pdf/frmsyl1213.pdf>

7.1 MATERIALES REALES VS MATERIALES IDEALES

El comportamiento a tracción a T ambiente de los materiales reales es muy inferior al que se prevé en los materiales perfectos. La teoría dice que las cerámicas deberían presentar una resistencia a tracción muy superior a los metales, y no es así.

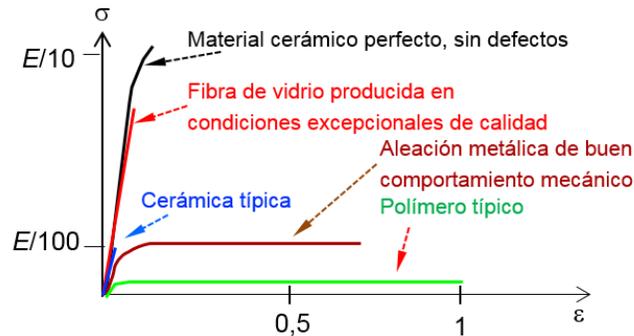


Figura 7.1: Comportamiento mecánico típico de los distintos tipos de materiales (Autoría, ver últimas páginas)

Leonardo DaVinci (hace 500 años) realizó un experimento con un cable del que colgaba un cesto en el que iba añadiendo arena (figura 7.2). Observó que:

→ cuanto más largo era el cable, menor era la carga bajo la cual se rompía.

¿Cuales eran las razones?:

→ Los defectos en el hilo causan su fractura

→ Cuando más largo era el hilo mayor era el número de defectos, y más probable tener grandes defectos!

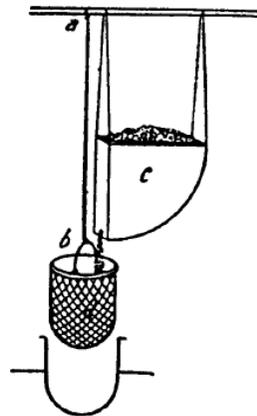


Figura 7.2: La cesta colgante de Leonardo (Autoría, ver últimas páginas)

¿Qué causas subyacen tras una rotura imprevista de una componente en servicio? Hay varias posibles causas. Las más habituales son:

- 1) No considerar puntos de concentración de tensiones en ángulos vivos cuando se diseña o fabrica el componente
- 2) No tener en cuenta condiciones de corrosión o desgaste.
- 3) Diseño inadecuado para el método de conformación elegido, por lo cual se han producido defectos en el componente durante el proceso de fabricación
- 4) Conformación mal realizada
- 5) Mala utilización en servicio

Podría añadirse una larga lista de posibles causas de fractura debidas a condiciones de servicio no esperadas. Los problemas que se generan cuando un componente falla antes de lo previsto son habitualmente causa de pleitos entre clientes y suministradores.

Por ello, es habitual dirimir las causas de la fractura mediante peritajes técnicos. Esta es una de las ramas de la ciencia de materiales, y se denomina **Análisis de fallos**. La mayor parte de la información para determinar a qué se debe el fallo de un componente las proporciona la superficie de la fractura, y la información sobre las condiciones de trabajo del componente.

7.2 FRACTURAS DÚCTILES Y FRACTURA FRÁGILES

Una fractura dúctil es aquella que implica deformación plástica, mientras que una fractura frágil no la muestra. Sin embargo, esto que parece sencillo no lo es tanto, ya que la deformación plástica puede estar teniendo lugar a escala micro, mientras que macroscópicamente no se observe deformación. Por ello, los términos frágil y dúctil en fractura no son absolutos.

En una fractura dúctil existe una gran absorción de energía para producir la deformación plástica, por lo cual en principio los materiales dúctiles al romperse absorben mayor energía que los frágiles.

A pesar de que es habitual hablar en esos términos, la mayoría de los materiales no son ni frágiles ni dúctiles, sino que su **comportamiento depende de la condiciones ambientales:** temperatura, velocidad de deformación, fenómenos de corrosión, etc. En ocasiones también depende del proceso de fabricación seguido. Así, las cerámicas óxidas suelen mostrar fracturas dúctiles a elevadas temperaturas, mientras que muchos metales se vuelven frágiles por debajo de un umbral de temperatura dado.

A Nivel Macroscópico: Cuando se somete una probeta a un ensayo de tracción, se denomina fractura dúctil a la que se caracteriza por una deformación plástica grande, llegando a una acusada estricción, tras la cual la rotura ocurre (figura 7.3 - A).

La fractura frágil, por el contrario, ocurre de modo repentino sin

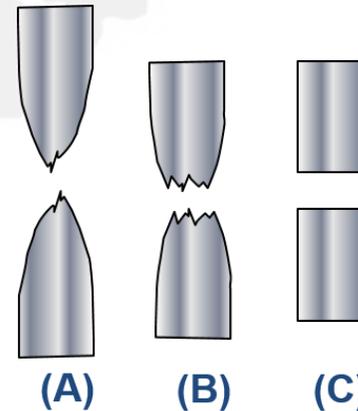


Figura 7.3: Fracturas macroscópicamente dúctiles (A y B) y frágil (C). (Autoría, ver últimas páginas)

haberse observado cambio macroscópico alguno en el material (figura 7.3 - C).

La mayoría de los metales se comportan como en el caso (figura 7.3 - B), con deformación plástica limitada, existiendo micromecanismos dúctiles.

A Nivel Microscópico: La diferencia entre un material dúctil y frágil se encuentra en el modo de propagación de las fracturas. Se verá a continuación.

7.2.1 FRACTURA DÚCTIL

La figura 7.4 ejemplifica las etapas que sigue una fractura dúctil:

En un material dúctil las dislocaciones se mueven dentro de los granos y el material se deforma macroscópicamente produciéndose la estricción (figura 7.4 -a).

Una vez producida la estricción, localmente se alcanza el nivel de tensión de rotura en zonas de algunos granos donde la deformación plástica ha llegado a su límite → se producen fracturas localizadas (figura 7.4 -b). Se denominan microcavidades.

7.2 FRACTURAS DÚCTILES Y FRACTURA FRÁGIL

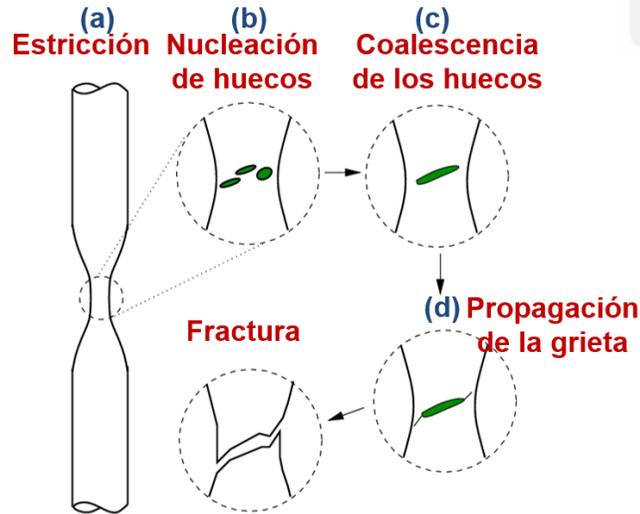


Figura 7.4: Micromecanismo de fractura dúctil. (Autoría, ver últimas páginas)

La estricción continúa a la vez que se generan las microcavidades y el área se reduce.

Las microcavidades “coalescen” debido a las pequeñas áreas disponibles entre ellas, formándose una grieta perpendicular a la carga aplicada (figura 7.4 -c).

El área remanente sometido a carga es ahora muy pequeño y la grieta se propaga rápidamente hasta fractura total (figura 7.4 -d). Ello ocurre habitualmente a 45° frente al esfuerzo aplicado, ya que el máximo esfuerzo de cizalladura ocurre en ese ángulo. La fractura que se obtiene se denomina copa-cono (figura 7.5-arriba.).

Cuando se observa una fractura dúctil al microscopio, se ven “agujeritos” mas o menos redondeados. Corresponden a la mitad de las microcavidades que se habían formado en la primeras etapas. Las microcavidades coalescieron cuando la tensión sobrepasó los límites y finalmente se partieron \rightarrow quedó una parte a cada lado de la probeta rota.

La figura 7.5, inferior izda., muestra la zona central de una fractura dúctil y la inferior derecha la zona de fractura a 45° , donde claramente se aprecia que las microcavidades se han “partido” en diagonal. Ambas imágenes son micrografías tomadas en un SEM (microscopio electrónico de barrido).

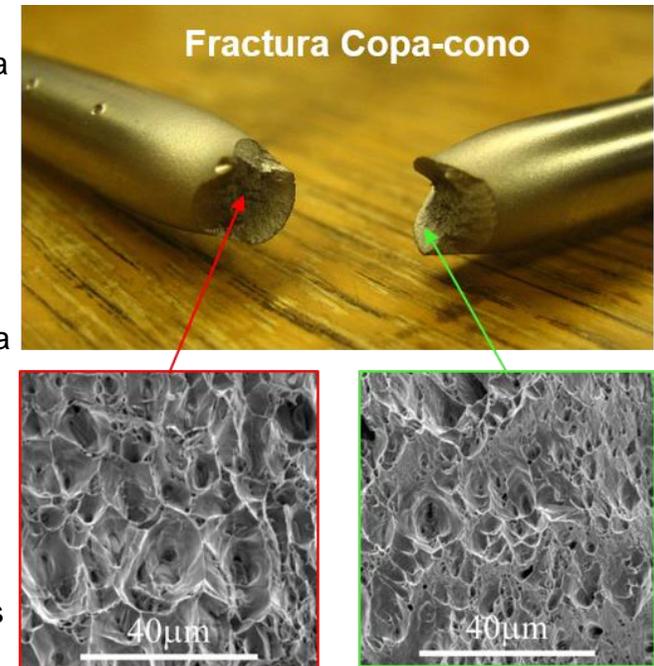


Figura 7.5: Probeta mostrando una fractura dúctil típica. Micrografías de dos zonas de una fractura dúctil. (Autoría, ver últimas páginas)

7.2 FRACTURAS DÚCTILES Y FRACTURA FRÁGILES

7.2.2 FRACTURA FRÁGIL

Cuando sometemos una probeta a una tensión de tracción y no se observa deformación macroscópica, no existe estricción, y la curva tensión/deformación no muestra deformación plástica, la rotura ocurre de modo totalmente repentino e imprevisto. Se les denomina fracturas frágiles.

Dado que no existe deformación observable a simple vista, la rotura ocurre de manera muy rápida y repentina. Dado que no existe un adelgazamiento de la superficie útil sobre la cual la tensión es aplicada, la fractura ocurre en un solo plano, a 90° frente a la tensión aplicada.

Las fracturas frágiles en muchos casos muestran el sitio por donde la fractura se ha iniciado → generalmente se inicia en lugares donde existe un defecto: un poro, una inclusión, otros. La fractura se produce por rotura de enlaces, y la grieta progresa por el camino “mas fácil”.

Muchos materiales metálicos que habitualmente son dúctiles se comportan de manera frágil si la tensión se aplica a gran velocidad, es decir, si se les somete a condiciones de impacto. Por ejemplo, la figura 7.6 muestra la fractura de probetas de aluminio ensayadas en condiciones de impacto.

Se distinguen dos tipos principales de fracturas frágiles: fractura transgranular y fractura intergranular. La figura 7.7 muestra ambas.

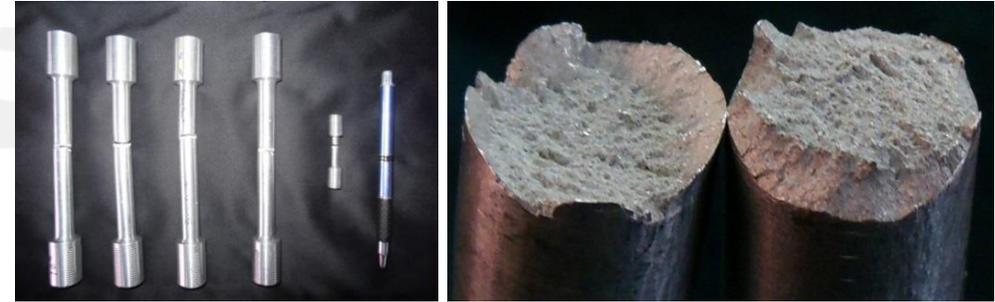


Figura 7.6: Probetas de Aleación de Aluminio AA2014 ensayadas en condiciones de impacto, mostrando la fractura frágil. (Autoría, ver últimas páginas)

Fractura transgranular:

La grieta progresa a través de la rotura de los granos, rompiendo enlaces a través de los planos cristalográficos. En esta fracturas se observan saltos bruscos, escalones, etc, correspondientes a planos cristalográficos diferentes. En inglés se denomina “Cleavage”. Es una fractura “sana”. Simplemente, el material no es dúctil

Fractura intergranular:

La grieta progresa a través de los límites de grano. Este tipo de fractura evidencia un material débil, con problemas en el proceso de fabricación (por ejemplo, atrape de “pieles óxidas” en componentes producidos por procesos de fundición) o de corrosión en servicio.

La fractura transgranular indica que el material es frágil. La fractura intergranular indica que el material ha tenido algún problema en el proceso de fabricación, o bien corrosión en el uso.

7.2 FRACTURAS DÚCTILES Y FRACTURA FRÁGILES

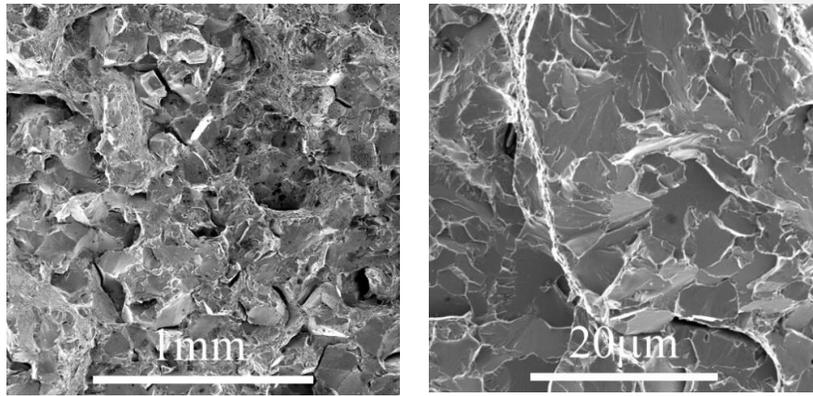


Figura 7.7: Fractura frágil intergranular (izda.) y fractura frágil transgranular (dcha.) tipo "clivaje". (Autoría, ver últimas páginas)



Figura 7.8: Retrato de Leonardo Da Vinci (1510) situado en Royal Library (Windsor Castle, UK). (Autoría, ver últimas páginas)

7.3 LOS CONCENTRADORES DE TENSIÓN

Los materiales contienen defectos en su interior, tienen huecos, grietas, inclusiones, etc. Es imposible en la práctica producir materiales sin defectos. Los defectos que un material frágil contiene en su interior o en su superficie actúan como "concentradores de tensión". Es decir, la tensión que aplicamos sobre el material, se concentra en la punta de la grieta, o en el borde del defecto y localmente alcanza un nivel de tensión diferente del nivel de la tensión nominal aplicada (tensión media), muy superior a la misma.

Leonardo Da Vinci fue el primer investigador que relacionó la resistencia del material con los defectos de su interior, pero hasta el inicio del siglo XX no se abordó un análisis de sus causas. Primero Inglis, al inicio del siglo, desarrolló el estudio de los concentradores de tensión, el cual es muy útil para el diseño seguro de elementos sometidos a tensión.

A inicios del siglo XX, el ingeniero británico **Charles E. Inglis** demostró que los defectos que contienen los materiales actúan como concentradores de tensión. Es decir, la tensión nominalmente aplicada en el material aumenta localmente en los bordes de los defectos.

El efecto de los defectos en la concentración de tensiones se estudió experimentalmente, introduciendo defectos calibrados de diferente tamaño y "puntiagudez" en placas de vidrio.

7.3 LOS CONCENTRADORES DE TENSIÓN

Inglis determinó que la tensión local que el material soporta en el defecto depende del tamaño, orientación y forma del mismo. Si los defectos son “puntiagudos” la tensión es muy grande, si son “romos” la tensión es menor. Inglis se basó en la teoría de la elasticidad, determinando que la tensión local que el material soporta en el defecto depende **del tamaño, orientación y forma** del mismo, y concluyó que la tensión que el material experimenta en el borde de los defectos aumenta de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma = \sigma_0 * K \quad \text{donde } K = 1 + 2(a / \rho)^{1/2}$$

Es decir, cuanto mayor sea el defecto (**a**), mayor es la tensión local. Cuanto más puntiagudo sea (**ρ**) mayor es a tensión local. Al factor K, en que aumenta la tensión, lo denominó concentrador de tensión, K. La Figura 7. 9, izda., muestra un componente que contiene un defecto de sección circular sometido a una tensión de tracción pura. La tensión que se alcanza en la punta del defecto (punto indicado en la figura) alcanza localmente un valor tres veces superior a la tensión nominal aplicada sobre el componente (σ_0) dado que $a=\rho$.

Esta situación se debe al estado tensional triaxial que se presenta en las superficies libres → El defecto es una superficie libre.

Una superficie libre situada a 90° con la fuerza no está sometida a tensión. Las superficies libres que forman un ángulo con la fuerza $\neq 90^\circ$ están sometidas a componentes triaxiales del tensión, no a tracción pura.

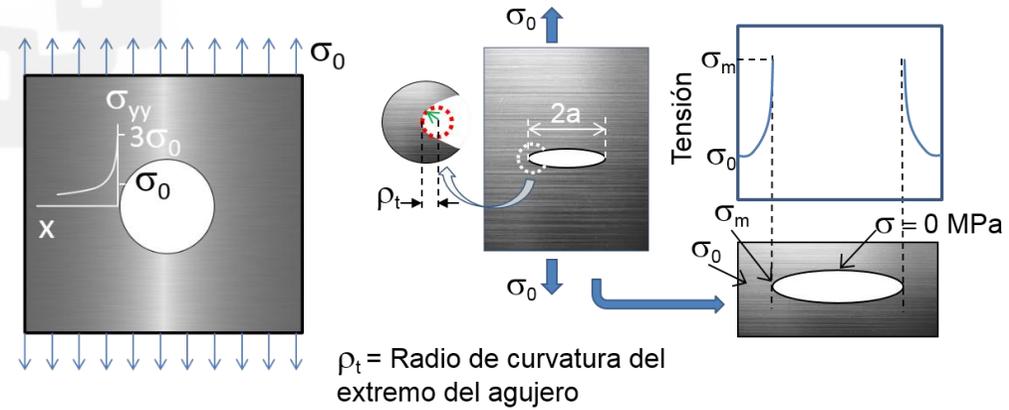


Figura 7.9: Defecto interno circular (izda.). Defecto interno elíptico (dcha.). (Autoría, ver últimas páginas)

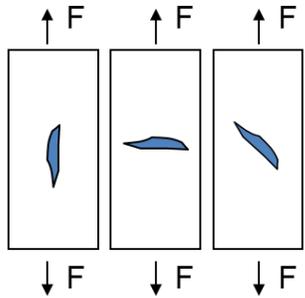
En el caso genérico de un defecto elíptico (figura 7.9 dcha.)

- en la superficie del defecto perpendicular a la fuerza, la tensión es nula (→ superficie libre).
- La tensión va aumentando según se varía el ángulo que la superficie del defecto forma con la fuerza aplicada. El máximo se alcanza en el borde de la elipse. El valor de la tensión en ese punto dependerá del radio del borde de la elipse. Cuanto menor sea ese ángulo (→ más puntiaguada es la elipse), mayor será el nivel de tensión máximo.

Generalizando la expresión de Inglis, el factor de concentración de tensiones corresponde a:

$$K = \sigma_m / \sigma_0 = 2(a / \rho)^{1/2}.$$

7.3 LOS CONCENTRADORES DE TENSION



$A = \text{Área de la probeta transversal a la Fuerza}$

$$\sigma_0 = F / A$$

Figura 7.10: El mismo defecto interno en tres orientaciones diferentes (Autoría, ver últimas páginas)

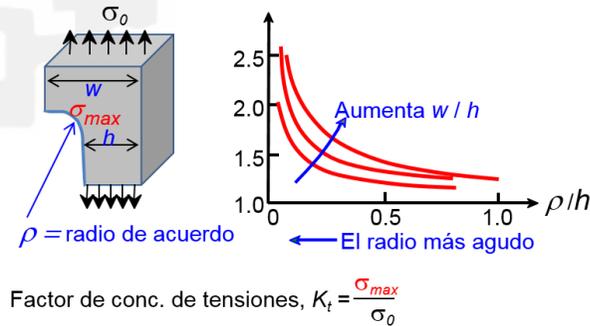
La concentración de tensiones no es exclusiva de defectos internos del material → Un inadecuado diseño de los componentes puede actuar como concentrador de tensiones:

Las esquinas y ángulos vivos son concentradores de tensiones, así como los cambios bruscos de sección, etc.

La Figura 7.11 muestra el factor de concentración de tensiones debido a un cambio de sección en un componente sometido a tensiones, y su relación con el cambio de anchura y el radio de curvatura empleado en dicho cambio.

El acabado superficial es extremadamente importante: La rugosidad, los valles y crestas que concentran la tensión en sus extremos.

Un defecto de igual forma y tamaño presentará diferente peligrosidad dependiendo de la orientación en que se encuentre frente a la fuerza aplicada. Así, en la figura 7.10 se muestra le mismo defecto en tres orientaciones diferentes. ¿Cuál de ellas conducirá a mayor concentración de tensión en unta del defecto?



Factor de conc. de tensiones, $K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$

Figura 7.11: Concentradores de tensión en cambios de sección (Autoría, ver últimas páginas)

<https://www.efatigue.com/constantamplitude/stressconcentration/>

DUCTILIDAD / FRAGILIDAD Y LOS FACTORES DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

La resistencia teórica de un material es la fuerza del enlace entre sus átomos → las cerámicas (enlaces iónicos o covalentes) deberían ser mucho más fuertes que los metales (enlace metálico).

La realidad indica que no es así. Ello se debe a que cualquier defecto presente en las cerámicas actúa como concentrador de tensión, elevando localmente la tensión en la punta del defecto para alcanzar localmente la resistencia a fractura del material aunque la tensión media que estemos aplicando sea muy baja. Así, el componente se rompe.

Hay “Handbooks” que reúnen los factores de concentración de tensiones de distintos diseños estructurales (esquinas, ángulos de acuerdo, “rendijas, aberturas, etc,..). Algunos de estos datos se pueden consultar libremente en la siguiente página web:

7.3 LOS CONCENTRADORES DE TENSIÓN

MATERIALES DÚCTILES

Cuando el nivel local de tensión en la punta del defecto alcanza el límite elástico del material dúctil, este se deforma plásticamente.

Cuando se deforma plásticamente, la punta del defecto se redondea, aumenta el radio de curvatura, y con ello **se reduce el nivel local de tensión, la concentración de tensión disminuye grandemente.**

En los dúctiles metales, los defectos se redondean y reducen de esta manera su peligrosidad, concentrando muy poco la tensión. Así, aunque la fuerza entre sus enlaces sea muy inferior a la de las cerámicas, a nivel ingenieril presentan resistencias mecánicas superiores porque los defectos se redondean y tienen menor criticidad en la resistencia del material.

La resistencia que se mide en ensayos de tracción de metales dependerá del enlace entre los átomos, del tamaño de grano, y de otras características microestructurales, mientras que los defectos tendrán poca influencia en la misma.

Si los procesos de fabricación son correctos, la heterogeneidad y pequeños defectos inevitables afectarán muy poco a los metales.

Si se ensaya un gran número de probetas dado extraídas de un mismo componente, el resultado de todas ellas será muy similar (figura 7.12).

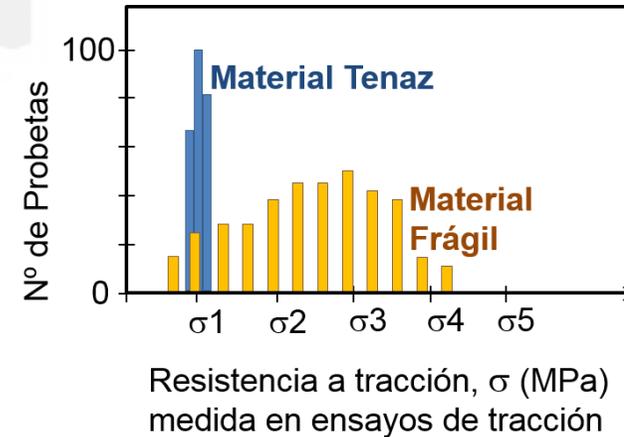


Figura 7.12: Dispersión habitual en los resultados de ensayos de tracción de probetas metálicas y cerámicas (Autoría, ver últimas páginas)

MATERIALES FRÁGILES

Si se ensaya un número igual de probetas de un material dúctil y de una frágil cerámica, la dispersión de los resultados obtenidos en la cerámica será muy superior (figura 7.12).

De hecho, en el caso de la cerámica, cada probeta romperá por el peor defecto que contenga → el mayor o más tortuoso poro, una inclusión, una heterogeneidad, otro, En ese defecto se amplificará localmente la tensión en diferente grado dependiendo de su tamaño y redondez. Por ello, la resistencia mecánica de una probeta de un material frágil es función del tamaño y gravedad de los defectos que haya en ella. Cada probeta romperá por su defecto más crítico.

7.3 LOS CONCENTRADORES DE TENSIÓN

FIABILIDAD DE LOS MATERIALES → Cuando el material es **FRÁGIL**:

- ✓ Si la tensión máxima alcanzada localmente en la punta de un defecto σ_m es superior a la de fractura, la probeta se rompe.
- ✓ No se observa ningún fenómeno hasta que el material se rompe repentina y rápidamente. Se denomina **FRACTURA CATASTRÓFICA**.
- ✓ A las grietas que conducen a la fractura catastrófica se les llama **GRIETAS INESTABLES**.
- ✓ Un material frágil emplea la energía mecánica suministrada por la tensión aplicada en producir superficie libres → Se fractura



- ❖ Los materiales frágiles presentan baja fiabilidad
- ❖ No pueden ser empleados en esfuerzos de tracción (o esfuerzos que presenten alguna componente tractora (cizalla, torsión, flexión)).
- ❖ *Los materiales frágiles presentan excelente comportamiento mecánico a compresión → Los defectos se cierran bajo el esfuerzo a compresión y los materiales frágiles alcanzan resistencias cercanas a las teóricas.*

FIABILIDAD DE LOS MATERIALES → Cuando el material es **DÚCTIL**

- ✓ Si la tensión máxima alcanzada localmente en la punta de un defecto σ_m es superior al límite elástico la zona de alrededor a la punta de la grieta se deforma, deja de ser “puntiaguda” y con ello disminuye el nivel máximo de tensión local en la punta del defecto.
- ✓ La tensión se redistribuye entre toda la zona deformada.
- ✓ Las grietas pueden crecer debido a concentración de tensión, pero lo hacen lentamente, tras la deformación plástica de la zona. Se llaman **GRIETAS ESTABLES**.
- ✓ La energía que le suministra la tensión se emplea en deformar plásticamente la zona alrededor de la grieta.



Cuando el material se comporta de manera dúctil **es posible tener componentes con grietas en pleno funcionamiento**, ya que **si el esfuerzo al que sometemos el componente es menor que el necesario para deformar toda la zona alrededor de la grieta**, ésta se mantiene estable y no crece.

7.4 MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA

En resumen, atendiendo al concepto de concentración de tensiones se puede dar una definición simplificada y certera de la diferencia entre un material dúctil y uno frágil:

Los materiales dúctiles consumen la energía (que les suministra la tensión aplicada) en deformarse plásticamente.

Los materiales frágiles consumen la energía (que les suministra la tensión aplicada) en producir nuevas superficies libres.

El empleo de los factores de concentración de tensiones para calcular la tensión en la punta de defectos puntiagudos conducía a una situación imposible: Si la punta del defecto es tremendamente aguda, la tensión en la punta de grieta debería ser infinita.

Griffith, en la década de los 20 (1920), abordó el problema desde una óptica diferente, la termodinámica. A su desarrollo se le denominó *Mecánica De La Fractura Lineal Elástica*.

Griffith planteó la hipótesis de que en todos los materiales existe una población de fisuras y defectos pequeños que tienen una variedad de tamaños, geometrías y orientaciones.

Al aplicar una tensión de tracción, la rotura ocurrirá cuando la resistencia cohesiva teórica del material sea superada en la punta de uno de los defectos →

Esto conduce a la formación de una grieta que se propagará rápidamente.

Si no existieran defectos → la resistencia a la fractura sería igual a la resistencia cohesiva del material (*actualmente existen monocristales metálicos y cerámicos muy pequeños, llamados “whiskers”, producidos prácticamente libres de defectos y que presentan resistencias a la fractura muy próximas a sus valores teóricos*).

Para demostrar su idea, **Griffith** introdujo cortes elípticos artificiales en las probetas experimentales. Dichos cortes eran **mucho mayores que los defectos y grietas presentes previamente en la probeta**.

Los experimentos demostraron que el producto de la raíz de la semilongitud de la grieta (a)^{1/2} y la tensión aplicada, σ , era aproximadamente constante, es decir: **$\sigma * (a)^{1/2} \approx \text{Cte.}$**

Griffith abordó el análisis mediante una aproximación termodinámica para explicar la relación que observó:

- ➡ Para que un proceso ocurra espontáneamente la energía libre del sistema debe disminuir:
- ➡ Una grieta preexistente en el material se propaga y crece solamente si el proceso origina una disminución de la energía total del material.

7.4 MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA

Griffith aplicó esta idea a la propagación de una grieta elíptica introducida dentro del material (material frágil) cuando se le aplica una tensión:

Cuando se aplica una tensión mecánica a un material → aumenta su energía debido al almacenamiento de energía elástica

Cuando la tensión desaparece → el material devuelve el exceso de energía elástica al sistema.

Al aplicar una tensión al material con una grieta interna, parte de la tensión aportada se acumula como energía elástica y otra parte puede gastarse en agrandar la grieta.

Para que la grieta del sólido cargado elásticamente, aumente de tamaño, se requiere suministrar energía por encima de esa energía elástica, que además debe ser suficiente para romper los enlaces entre los átomos donde se producirán las nuevas superficies libres. Esta energía se llama **ENERGÍA SUPERFICIAL**.

→ Para que la grieta en el interior del material avance una distancia dada, la energía disponible (después del almacenamiento elástico) debe ser suficiente para superar la energía superficial del material.

→ Además, cuando la grieta progresa hay un intercambio adicional de energía: la zona involucrada en la nueva fractura se

descarga de la energía elástica que había almacenado, puesto que ya no se encuentra sometida a carga.

El análisis de la energía elástica almacenada en el material, denominada **U**, cuando es sometido a una tensión de tracción:

El componente se alarga de manera elástica, almacenando la correspondiente energía elástica → Esta energía es la integral de la fuerza frente al alargamiento producido:

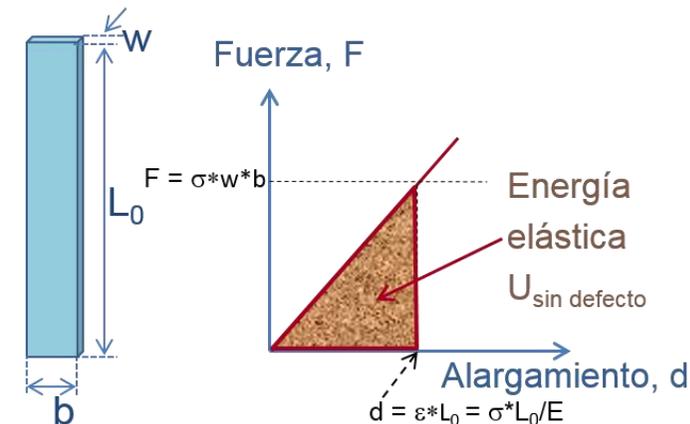


Figura 7.13: Energía elástica almacenada a tracción (dcha.) en el elemento mostrado a la izda. (Autoría, ver últimas páginas)

$$U = \left(\frac{1}{2}\right) * F * d$$

U es el área bajo la recta mostrada en la figura 7.13.

Para un componente en reposo de unas dimensiones dadas:

w = anchura, b =espesor y L_0 = longitud, y sin grietas internas →

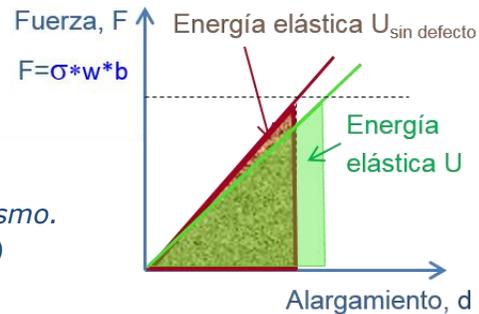
$F = \sigma * w * b$, y el alargamiento neto, $d = \epsilon * L_0 = \sigma * L_0 / E$ →

$$U_{\text{sin defecto}} = \left(\frac{1}{2}\right) \sigma * w * b * \epsilon * L_0 = \left(\frac{\sigma^2}{2 E}\right) * w * b * L_0$$

7.4 MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA

Si dentro del material hay una grieta interna → el alargamiento que se obtiene bajo la misma carga es mayor, y por tanto la deformación unitaria también lo es. Esto conduce a que el área bajo la recta F/d sea diferente, es decir la energía elástica almacenada será distinta.

Figura 7.14: Energía elástica almacenada a tracción en un elemento antes y después de introducir una grieta en el mismo. (Autoría, ver últimas páginas)



La diferencia de alargamiento es función del tamaño y forma de la grieta. Su cálculo no es sencillo (puede verse en *Fundamentals of Fracture Mechanics* de J.F. KNOTT, Editorial Butterworths, London 1973).

Si se considera una grieta interna de longitud $2a$, el efecto que tendrá en alargamiento elástico será

$$d = \varepsilon * [L_0 + (2 \pi a^2 / w)]$$

lo cual conduce a que la energía elástica almacenada sea:

$$U = U_{\text{sin defecto}} + (\pi * \sigma^2 * a^2 / E) * b$$

Es decir, cuanto mayor es el tamaño del defecto, mayor es la energía elástica almacenada. De hecho, **la diferencia de energía elástica almacenada aumenta con el cuadrado del tamaño de la grieta, de modo parabólico.**

La energía superficial que se consume en el progreso de la grieta → La energía que se consume en propagar una grieta será invertida en producir dos nuevas superficies.

La energía superficial unitaria, denominada γ , es una característica intrínseca de cada material dado que se trata de la energía de enlace entre los átomos que compongan el material.

Si la longitud que se extiende la grieta es $2a$ → la superficie que avanza la grieta será $= 2 * a * b$. →

Dado que cuando la grieta avanza se forman dos nuevas superficies de área $= 2 * a * b$ →

La energía consumida en el avance de la grieta, denominada **S**, será: $S = 2 (2 * a * b) * \gamma$ →

$$S = 4 * \gamma * a * b$$

Es decir, **la energía que se consume en el avance de grieta es directamente proporcional al tamaño del avance.**

Cuando la grieta avanza, se libera la energía elástica de la zona que se fractura, dado que esa zona ya no estará sometida a tensión. Si la grieta avanza una longitud $2a$, la energía elástica liberada →

$$U_{\text{liberada}} = U_{\text{inicial}} - U_{\text{tras avance de grieta}} = - (\pi * \sigma^2 * a^2 / E) * b$$

7.4 MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA

→ La energía empleada en formar las dos superficies de avance de grieta, **S**, aumenta linealmente con la longitud de la grieta.

→ La energía elástica liberada en el avance, **U**, aumenta parabólicamente con la longitud de la grieta.

La figura 7.15 muestra la evolución de **S** y **U** en función de la longitud de grieta: La variación de energía total del material, **E**, será la resultante de dos procesos: la energía almacenada por formación de nuevas superficies menos la energía elástica liberada → $E = S - \Delta U$

$$E = S - (U_{\text{inicial}} - U_{\text{tras avance de grieta}})$$

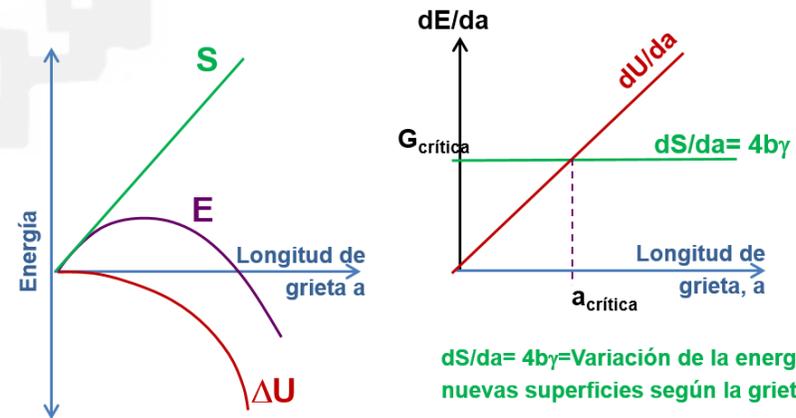
$$E = 4 * a * b * \gamma - (\pi * \sigma^2 * a^2 / E) * b$$

La gráfica muestra que **E** aumenta hasta llegar a un máximo a partir del cual disminuye. Cuando la energía elástica liberada en la formación de dos nuevas superficies, **U**, es superior a la energía requerida para formarlas, **S**, la variación de energía es negativa. De acuerdo al primer principio de la termodinámica, cuando se dan estas circunstancias el material se fracturará de manera espontánea: $E \leq 0$. Esto ocurre a partir del máximo de la curva.

Si la grieta avanza una distancia $2a$ →

$$E = 4 * a * b * \gamma - (\pi * \sigma^2 * a^2 / E) * b$$

E alcanza un máximo cuando su derivada $dE / da = 0$ →



$dS/da = 4b\gamma$ = Variación de la energía para formar nuevas superficies según la grieta avanza

dU/da = Variación de la energía elástica liberada según la grieta avanza

S, Energía de formación de nuevas superficies

E, Variación de Energía total

ΔU , Energía elástica liberada

Figura 7.15: Intercambio de energía debido a la rotura de un componente lineal elástico (Autoría, ver últimas páginas)

$$dE / da = 4 * b * \gamma - 2b * (\pi * \sigma^2 / E) * a = 0.$$

Esto se alcanza cuando → $4 * b * \gamma = 2b * (\pi * \sigma^2 / E) * a$

La figura de la derecha muestra la representación de las

derivadas: $dS/da = 4 * b * \gamma$ y $d(\Delta U)/da = 2b * (\pi * \sigma^2 / E) * a$

Donde ambas derivadas se igualan corresponde al máximo de la curva **E**. La energía crítica de avance de grieta, $G_{\text{crítica}}$, es aquella en que la energía elástica que se libera es equivalente a la necesaria para que se formen nuevas superficies.

7.4 MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA

Recomponiendo la ecuación anterior, se tiene que:

$$\sigma = \frac{2 E * \gamma}{(\pi * a)^{1/2}}$$

Es decir, la tensión en que alcanza el tamaño crítico de grieta a partir del cual se propagará de manera catastrófica es función de características intrínsecas del material, tales como el módulo de elasticidad y la energía superficial de fractura.

Esta teoría primera desarrollada por Griffith era muy básica y requirió ser refinada a lo largo de varias décadas hasta ser implementada de manera extensa a nivel industrial en la década de los 80 (1980).

Actualmente existen derivaciones de la mecánica de la fractura lineal elástica para incorporar la deformación plástica en el cálculo de la energía.

Si se requiere mayor información o conocimientos acerca de la mecánica de la fractura se recomienda el libro Mecánica de Fractura de Jose Luís Arana y Javier Jesús González, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. ISBN: 84-8373-455-9, el cual puede descargarse gratuitamente desde la página web:

<https://web-argitalpena.adm.ehu.es/listaproductos.asp?ldProducts=UCWEB024559&titulo=Mec%20E1nica%20de%20fractura>

El desarrollo mostrado en las páginas precedentes parte de la asunción de que los materiales son idealmente frágiles, es decir, no presentan mecanismos de almacenamiento de energía por deformación plástica.

De esta presunción y de la teoría expuesta se deriva un importante parámetro mecánico: **la tenacidad a la fractura, también conocido como factor de intensidad de tensiones.**

Partiendo de que la tensión en que alcanza el tamaño crítico de grieta, a partir del cual se propagará de manera catastrófica, es función de varias características intrínsecas del material E y γ , de acuerdo a la ecuación:

$$\sigma = \frac{2 E * \gamma}{(\pi * a)^{1/2}}$$

Reordenándola y englobando las características intrínsecas del material en un único parámetro, se define una nueva propiedad intrínseca del material:

El factor de intensidad de tensiones en modo I, o tenacidad a la fractura (en deformación plana), denominado K_{IC} :

$$K_{IC} = Y * \sigma * (\pi * a)^{1/2}$$

La tenacidad a la fractura de un material es su capacidad de aguantar sin romperse a pesar de sus defectos.

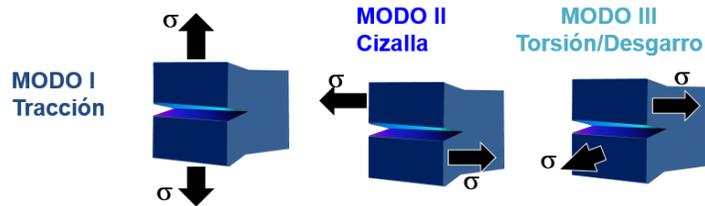
7.5 TENACIDAD A LA FRACTURA

El factor de intensidad de tensiones en modo I, o tenacidad a la fractura en deformación plana, denominado K_{IC} :

$$K_{IC} = Y * \sigma * (\pi * a)^{1/2}$$

La tenacidad a la fractura indica cual es la máxima tensión que soportará el material con un defecto dado.

Y = factor de forma del defecto → depende de la forma del defecto, la puntiagudez y localización. Estos factores se encuentran calculados y tabulados para diferentes geometrías. Es adimensional.



La tenacidad no es igual para todo tipo de tensión. Generalmente se mide en tracción (modo I), pero se puede determinar también en cizalla (modo II) y en torsión (modo III). Los materiales se comportan diferente frente a distintos tipos de tensiones.

El componente está sometido a un estado tensional “de deformación plana”. Los materiales se comportan distinto frente a situación de deformación plana o de tensión plana. Generalmente, su comportamiento es más frágil y crítico en condiciones de deformación plana.

La tenacidad se determina mediante ensayos específicos en unas probetas con forma, tamaño y defectos determinados. **Se mide en unidades de $MPa \cdot m^{1/2}$.**

Hay diversas probetas distintas, cuyas dimensiones se encuentran recogidas en la correspondiente normativa de ensayo. En la figura 7.16 se muestran dos de estas probetas, denominadas CT (compact tensión) y SENB (single edge notched bending). En todas ellas se reproduce:

→ **Defecto puntiagudo monoatómico** producido en condiciones concretas

→ Estado tensional de “**deformación plana**” →
Se garantiza cuando $B > 2.5 (K_{IC} / \sigma_y)^2$
(B = espesor de la pieza y σ_y = límite elástico)

Espesor B grande: deformación en plano pequeña (despreciable).

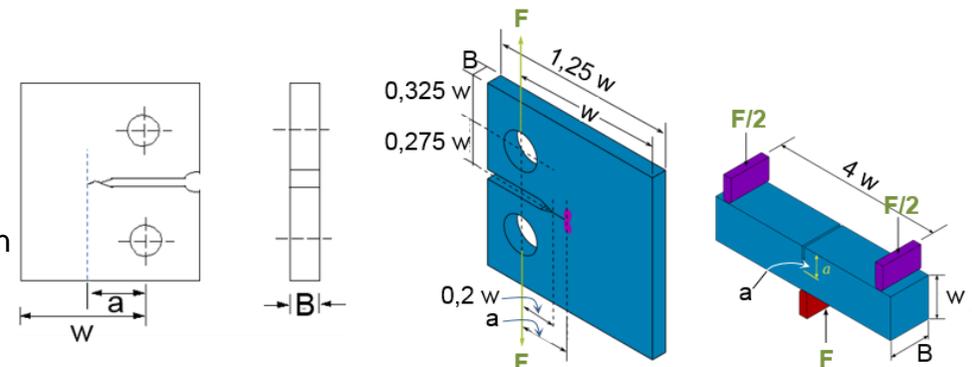


Figura 7.16: Probetas CT (izda. Y centro) y SENB (dcha.) para determinar la tenacidad a la fractura (Autoría, ver últimas páginas)

7.5 TENACIDAD A LA FRACTURA

❖ La tenacidad es la capacidad de absorber energía sin romperse que tienen los materiales reales, que son los que contienen defectos.

❖ Cuanta mas energía absorba el material antes de la fractura mas tenaz será.

❖ La deformación plástica es el mecanismo que proporciona mas tenacidad.

❖ La tenacidad del material es una característica muy “delicada”, es decir, depende de muchos factores, tales como la temperatura y la velocidad de deformación:



- 🏰 Generalmente aumenta con la temperatura
- 🏰 Generalmente disminuye con la velocidad de deformación
- 🏰 Para un mismo material aumenta con la disminución del tamaño de grano
- 🏰 Para un mismo material disminuye cuando aumenta el endurecimiento por deformación
- 🏰 Para una misma “familia” de aleación, disminuye cuando aumentamos el endurecimiento por precipitación de una segunda fase o de incremento de solución sólida.

Tabla 7.1: Algunos valores de la tenacidad de diversos materiales tipo (Datos extraídos de: https://en.wikipedia.org/wiki/Fracture_toughness) (Consulta: 23/03/2018)

Tipo de Material	Material	K_{Ic} (MPa * m ^{1/2})
Metal	Aleación de aluminio (7075)	24
	Acero (4340)	50
	Aleación de Titanio	44–66
	Aluminio	14–28
Cerámica	Óxido de Aluminio	3–5
	Carburo de Silicio	3–5
	Vidrio (Soda-calcita)	0.7–0.8
	Hormigón	0.2–1.4
Polímero	Polimetil metacrilato	0.7–1.6
	Poliestireno	0.7–1.1
Composite	Composite con fibras de Mullita	1.8–3.3
	Aerogel de Sílice	0.0008–0.0048

7.5 TENACIDAD A LA FRACTURA

LOS METALES son materiales muy tenaces, y entre ellos sobresalen los aceros, tal como se puede ver en la figura 7.17 izda. En una aleación dada, hay un compromiso entre resistencia y tenacidad → los procesos que aumentan una disminuyen la otra.

- ❑ Si el material se endurece por deformación → la resistencia aumenta y la tenacidad disminuye.
- ❑ Si se emplea un tratamiento térmico que endurece el material → la tenacidad se reduce.
- ❑ Si se aumenta el porcentaje de algún aleante para producir mayor cantidad de fases secundarias que endurezcan el material → la resistencia aumenta y la tenacidad disminuye.

LOS POLÍMEROS y los materiales de construcción son poco tenaces.

LOS COMPOSITES presentan una gran diversidad de propiedades, algunos son **extremadamente tenaces**, tal como se puede ver en la figura 7.17 dcha. Estos materiales son composites de matriz polimérica reforzados con tejidos o con fibras unidireccionales de Carbono. Los composites de este tipo no tienen ductilidad, pero son tenaces. Su tenacidad se debe a mecanismos de absorción de energía diferentes de la deformación plástica.

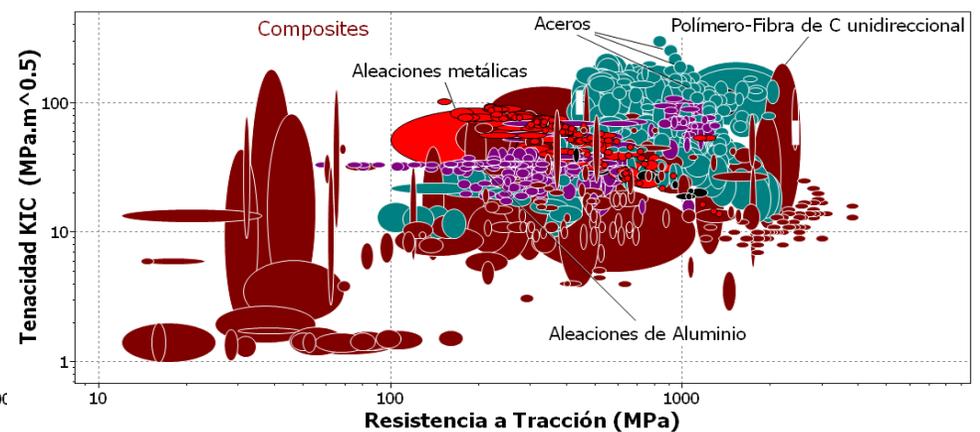
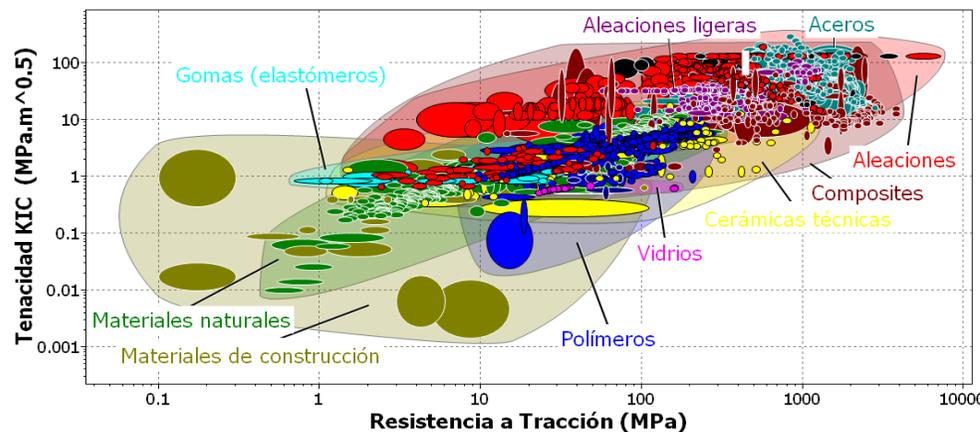


Figura 7.17: Relación entre Tenacidad y Resistencia para distintos tipos de materiales. (Autoría, ver últimas páginas)

7.6 MECANISMOS QUE PROPORCIONAN TENACIDAD A LA FRACTURA

La ductilidad es el mecanismo que mayor tenacidad imparte a los materiales → Bajo tensiones mecánicas la punta de los defectos se redondea, disminuyendo de este modo la concentración de tensión en la punta del defecto → Los materiales más tenaces son los metales y aleaciones metálicas.

Hay otros mecanismos que imparten tenacidad y conducen a que los materiales no se comporten de manera frágil, a pesar de no tener ductilidad → materiales composites.

Las cerámicas son materiales muy frágiles. Las cerámicas que presentan gran resistencia a tracción → tremendamente frágiles: Una vez que la grieta se inicia, nada la para, rompe rápidamente sin mostrar deformación alguna, tal como muestra la figura 7.18 izda. correspondiente a un Carburo de Silicio de altas prestaciones. Su tenacidad a la fractura es de tan solo:

$$K_{IC} = 2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$$

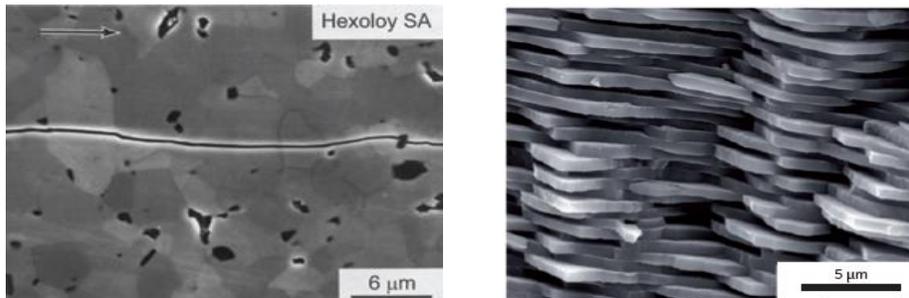


Figura 7.18: A la izda., grieta en una cerámica de alta Resistencia mecánica (SiC). A la dcha. microestructura de una cascara de mejillón en microscopio electrónico de barrido. (Autoría, ver últimas páginas)

Un modo de mejorar la tenacidad de estos materiales es fabricando con ellos composites. Es muy habitual que la naturaleza "construya" fabricando composites:

Un ejemplo de la naturaleza: La cáscara de mejillón

Composite cerámico compuesto por láminas muy planas de Calcita, "pegadas" mediante otro carbonato, la Aragonita. La figura 7.18 dcha. muestra una imagen de su microestructura.

La tenacidad de las cáscaras de mejillón es muy superior a la de las cerámicas que la componen: $K_{IC} = 7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Se debe a que la grieta encuentra muchos obstáculos que debe sortear para proseguir su camino. Es una fractura tipo "Clivaje" o "cleavage".

Composites cerámicos de partículas

Una opción industrial para incrementar la tenacidad de los materiales frágiles es fabricar composites en una configuración del tipo "ladrillo-mortero". Como ejemplo, el composite que se muestra en la figura 7.19. La tenacidad de este composite, fabricado por partículas de una cerámica unidas por otra cerámica, es cercana a la de muchas aleaciones de aluminio:

$$K_{IC} = 30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$$

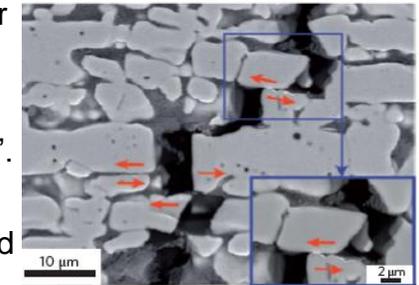


Figura 7.19: Composite de partículas prismáticas cerámicas unidas por una matriz cerámica. (Autoría, ver últimas páginas)

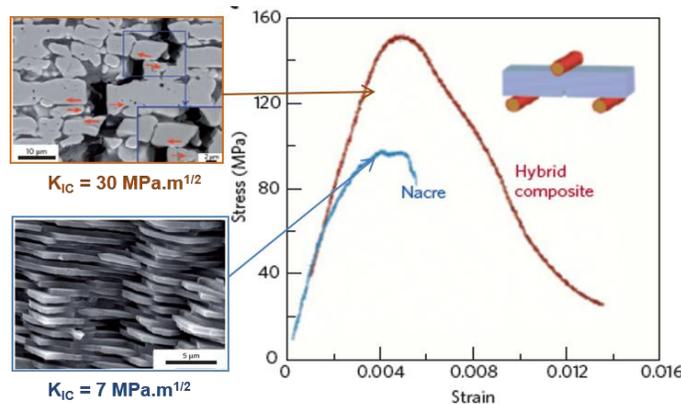
7.6 MECANISMOS QUE PROPORCIONAN TENACIDAD A LA FRACTURA

La Figura 7.20 muestra la curva tensión-desplazamiento en dos ensayos realizados con probetas de tenacidad tipo SENB en los composites cerámicos citados en la página anterior.

El área bajo la curva de cada ensayo es una medida indirecta de la energía absorbida en la fractura, es decir de la tenacidad.

La tenacidad del composite fabricado por partículas prismáticas de una cerámica unidas por otra cerámica es muy grande. Se debe a la dificultad que tienen las grietas para progresar cuando se somete al material a una carga mecánica. Igual que ocurre con una pared de ladrillos, la grieta progresa buscando el camino donde el material es más débil. Ello hace que deba cambiar de dirección, y en ocasiones el camino progresa en ángulos nada favorables. La grieta, en ocasiones, se bifurca en varias direcciones. Todo ello exige un consumo de energía muy elevado y conduce a que el material no rompa de manera frágil, repentina e imprevisible

Figura 7.20:
Ensayo SENB de dos materiales composites de matriz y refuerzo cerámicos. (Autoría, ver últimas páginas)



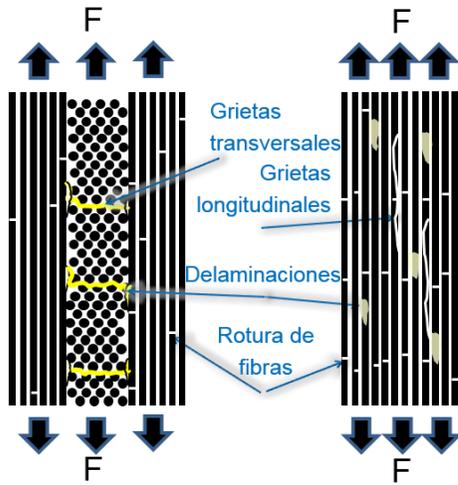
COMPOSITES POLIMÉRICOS DE FIBRAS LARGAS

La tenacidad de este tipo de composites se debe a la energía que se consume en el siguiente proceso:

- 1) Una grieta llega hasta un “bloque” de fibras perpendicular a la dirección de la grieta
- 2) Muchas Fibras se “despegan” (delaminan) de la matriz en un “trozo largo” longitudinal
- 3) En la zona de la delaminación la matriz se deforma (elástica + plástica)
- 4) La matriz se fractura y la grieta sigue por la matriz un “pequeño tramo”
- 5) Algunas de las Fibras delaminadas comienzan a romperse, cada una por un sitio diferente (cada una en su defecto crítico, ya que son relativamente frágiles)
- 6) Hay microgrietas que se forman en la matriz en toda la zona donde las fibras comienzan a fallar.
- 7) Las fibras que aún no se han roto (¡un buen porcentaje!) retienen y aguantan parte de la tensión, por lo cual la punta de la grieta soporta un nivel de tensión inferior al nominal.

La figura 7.21 muestra un esquema de la situación aquí descrita. Materiales que exhiben este modo de tenacidad: composites de fibra de vidrio-poliéster (carrocerías de autocares, embarcaciones), fibra de carbono-epoxy (aeronáutica, equipamiento deportivo).

7.6 MECANISMOS QUE PROPORCIONAN TENACIDAD A LA FRACTURA



En resumen, los mecanismos de fractura en composites de fibras largas alineadas incluyen las delaminaciones y las fracturas de fibras a distinta altura, lo que conduce a que el frente de grieta se bifurque y se formen varias microgrietas que avanzan en direcciones diferentes. Esto ralentiza y dificulta el avance de la grieta.

Los materiales de los que están hechos los huesos no son de elevada resistencia, y son de muy pobre tenacidad. Sin embargo, al producirlos en el complejo entramado que forman, la tenacidad aumenta grandemente, resistiendo complejas tensiones sin que se fracturen.

Figura 7.21: Mecanismos de fractura en materiales compuestos de fibras largas alineadas en direcciones diferentes. (Autoría, ver últimas páginas)

COMPOSITES ESTRUCTURALES

Hay otro tipo de composites que se basan en formar estructuras complejas. Un ejemplo paradigmático son **LOS HUESOS**: Son composites muy complejos con

- fibras largas poliméricas (**COLÁGENO**) que atraviesan
- un tortuoso entramado cerámico (**HIDROXIAPATITA** = un tipo de fosfato de calcio).

Ello conduce a que los huesos sean materiales anisótropos: La resistencia y el modo de fractura será diferente longitudinal y transversalmente (Figura 7.22).

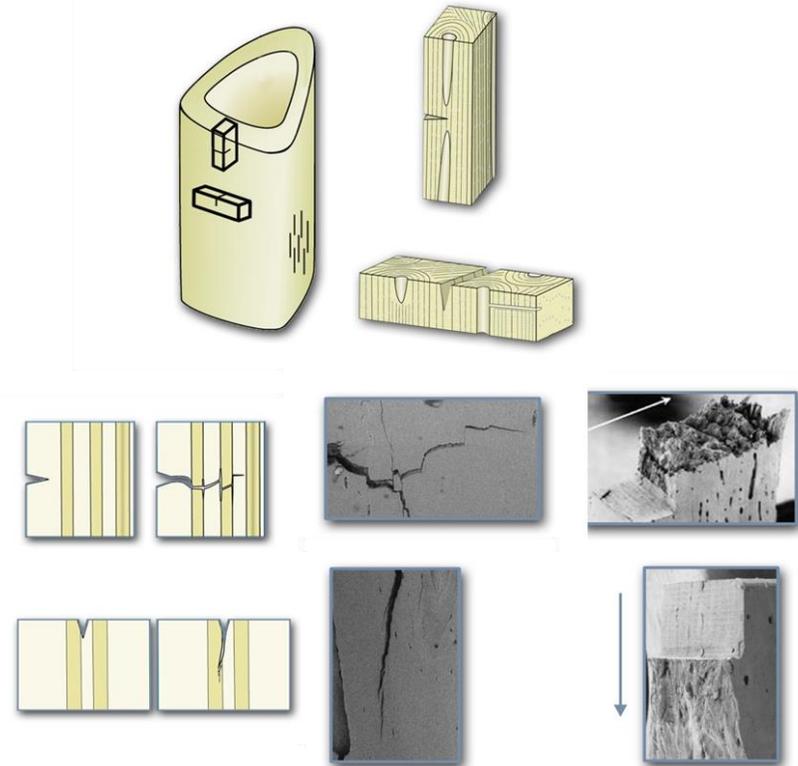


Figura 7.22: Fracturas producidas en ensayos SENB de probetas extraídas de hueso humano en dirección transversal y en dirección longitudinal. (Autoría, ver últimas páginas)

7.6 MECANISMOS QUE PROPORCIONAN TENACIDAD A LA FRACTURA

Los mecanismos de microagrietamiento, desvío de grieta y cierre en punta, mostrados en la figura 7.23., son los que proveen a los huesos de su elevada resistencia a la fractura.

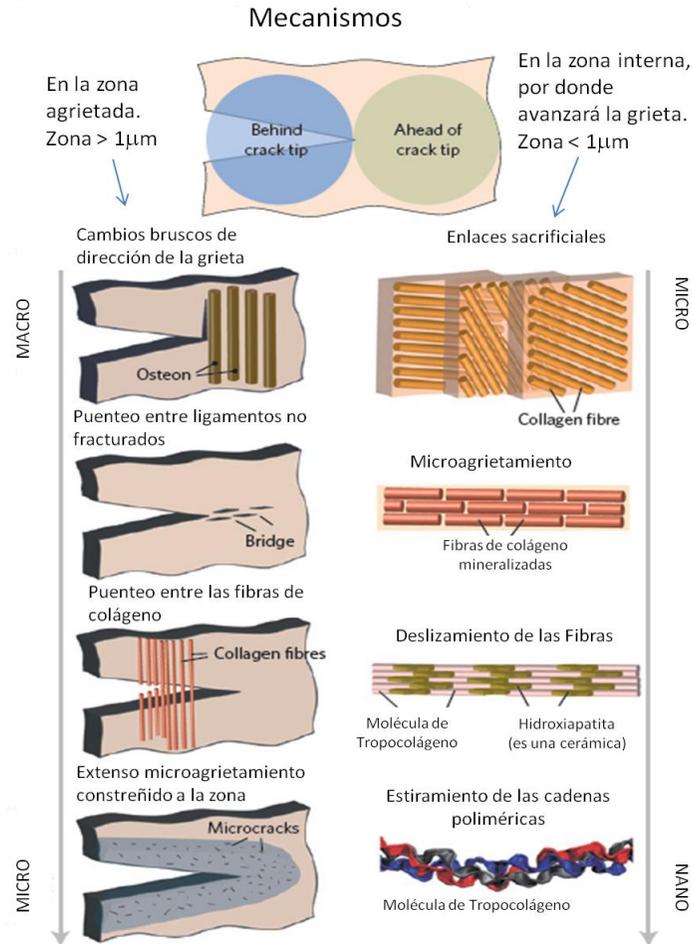


Figura 7.23: Micromecanismos que imparten tenacidad a la fractura a los huesos. (Autoría, ver últimas páginas)

La figura 7.24 muestra reunidos los principales micromecanismos que imparten tenacidad a los distintos tipos de materiales existentes, los cuales incluyen:

Micromecanismo	Materiales
Deformación Plástica	Metales
Coalescencia y fractura de cavidades	Metales
Fractura Cleavage	Materiales frágiles
Atrape de óxidos y partículas en punta de grieta	Todo tipo de materiales
Puenteo de grano	Cerámicas y Composites
Puenteo de fibras y delaminaciones	Composites de fibras largas

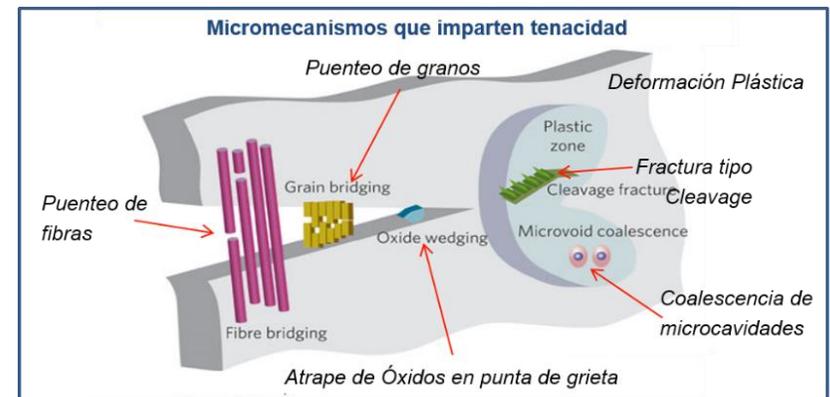


Figura 7.24: Principales micromecanismos que imparten tenacidad a la fractura. (Autoría, ver últimas páginas)

7.7 LA TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL

Durante la segunda guerra mundial se produjeron hundimientos de barcos de manera inesperada, y en aquellos momentos inexplicables.

Los barcos Liberty eran barcos de suministro de provisiones, por lo cual se encontraban varados en el mar, cerca de los polos terrestres, por ser el modo más rápido de llegar a los barcos en guerra en el frente del Pacífico.

Construidos en EEUU, estaban fabricados de chapa de acero empleando soldadura como modo de unión de las chapas. Habían sido construidos con coeficientes de seguridad sobre los máximos esfuerzos previsibles, y no se habían acercado en ningún momento a dichos esfuerzos.

Cuando estaban fuera de zona de conflicto, en aguas a 4°C, se fracturaron de manera repentina y catastrófica, partiéndose el caso en dos.

La figura 7.25, izda. muestra una fotografía de uno de estos barcos tras su fractura. El estudio de lo ocurrido mostró que las soldaduras se habían fracturado de manera frágil.

Para resolver el problema recurrieron a la ingeniera **Constance Tipper**, de la Universidad de Cambridge (figura 7.25, dcha.).



Figura 7.25: Barco Liberty fracturado (izda.). Fotografía de Constance Tipper (dcha.) (Autoría, ver últimas páginas)

Tipper, trabajando desde el Departamento de Ingeniería en Cambridge demostró que las fracturas fueron causadas por el acero usado y no por el hecho de que las naves hubiesen sido soldadas, tal como presumían los técnicos.

Ella estableció que hay una temperatura crítica por debajo de la cual el modo en que el acero se fractura cambia de dúctil a frágil

Los buques varados en el Atlántico Norte estaban sometidos a temperaturas tan bajas pasaron dicha transición.

Tipper escribió un libro llamado "la historia frágil de la fractura" publicado en 1962 por Cambridge University Press.

7.7 LA TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL

- La tenacidad de los materiales aumenta con la temperatura.
- En algunos metales y plásticos, además, al disminuir la temperatura llega un momento en que la ductilidad desaparece.
- En esos casos, los defectos que a temperaturas superiores no suponen ningún riesgo, a temperaturas bajas se convierten en fuertes concentradores de tensiones.
- El resultado en estas condiciones: cuando los componentes se someten a esfuerzos muy inferiores a su límite elástico se rompen a partir de dichos defectos de manera imprevista y catastrófica, propagándose la grieta rápidamente hasta la fractura total.
- A este fenómeno se le conoce como **TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL**. Se suele indicar con las siglas DTB (Ductile-to-brittle)

TEMPERATURA DE TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL

Se determina mediante ensayos de impacto, también denominados de **RESILIENCIA**.

Se mide la energía consumida por el material al romperse. Cuando el material es dúctil consume mucha energía para fracturarse. Cuando es frágil consume menos. La figura 7.26 muestra el esquema de uno de estos ensayos.

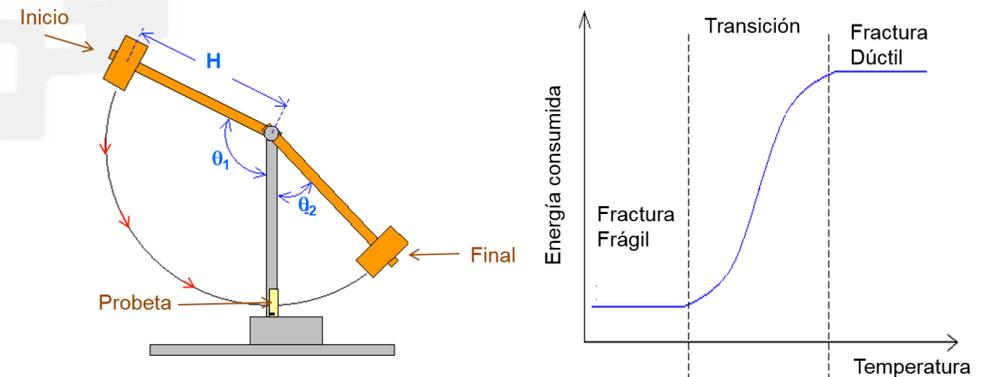


Figura 7.26: Ensayo de impacto para determinar la transición dúctil-frágil (izda.). Gráfico típico para determinar la transición dúctil-frágil de los materiales. (Autoría, ver últimas páginas)

Hay dos ensayos habituales en metales y en plástico: **El ensayo Izod** y **el ensayo Charpy**. Son similares y simples. La mayor diferencia entre ellos es la geometría de las probetas.

Consisten en un péndulo con un peso que se deja caer desde una altura prefijada, golpeando a una probeta rectangular con una entalla de forma y tamaño normalizados.

El péndulo golpea a la probeta, la cual se fractura por la entalla absorbiendo gran parte de la energía transmitida por el péndulo.

Tras romper la probeta el péndulo continúa su camino hasta agotar su energía.

La máxima altura que alcanza el péndulo tras la rotura se mide.

7.7 LA TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL

La diferencia entre las alturas inicial y final del péndulo es la energía absorbida por la probeta en romperse.

Estos ensayos se realizan a distintas temperaturas y se representa la energía absorbida frente a la temperatura para determinar la temperatura de transición dúctil frágil.

Son muy simples pero la realización fiable y reproducible de estos ensayos no es nada simple (temperaturas bajo cero, colocación de probetas heladas en contacto con útiles a T ambiente, etc). Deben ser realizados por personal altamente cualificado.

La transición dúctil-frágil se presenta en metales, plásticos e incluso en cerámicas. El problema está en que las cerámicas la experimentan por encima de 1000°C, por lo cual a las temperaturas habituales de la mayoría de procesos son materiales frágiles.

La figura 7.27 muestra los resultados de los ensayos de resiliencia realizados en distintos materiales.

Cuando se diseña con aceros se debe siempre tener en cuenta la transición dúctil-frágil y se debe elegir una composición que presente una transición muy por debajo del rango de temperaturas a las que deba operar el componente. Las grietas que no representan ningún riesgo para el material en estado dúctil, conducirán a fractura catastrófica si la temperatura desciende por debajo de la DTB.

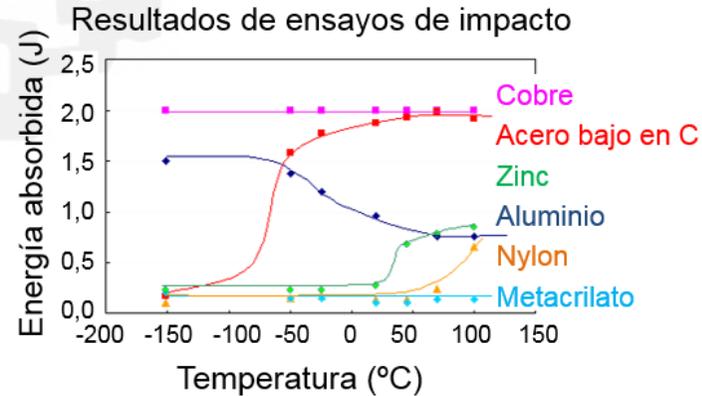


Figura 7.27: Resultados de los ensayos de impacto en distintos materiales habituales. (Autoría, ver últimas páginas)

- Los metales y **ALEACIONES FCC** (Aluminio, Cobre, Níquel, Aceros inoxidables austeníticos) **NO** presentan transición dúctil-frágil debido al elevado número de planos de deformación de que disponen.
- Las **ALEACIONES BCC y HCP** presentan transición dúctil-frágil, es decir **LOS ACEROS** más habituales presentan esta transición.
- La temperatura de transición dúctil-frágil depende de la composición, del tamaño de grano (menor cuanto menor es el tamaño de grano), y del contenido en carbono en el caso de los aceros.
- Los plásticos presentan siempre un fenómeno similar a la transición dúctil-frágil de los metales, denominado transición vítrea.

7.8 FATIGA

Se llama Fatiga a una situación en la que un componente o material se encuentra sometido a esfuerzos cambiantes y fluctuantes:

*Alas de los aviones,
Puentes,
componentes de maquinaria y de motores.*

La fatiga puede producirse por cualquier tipo de tensión (axial, flexión, torsional, etc.)

- ❖ Los esfuerzos pueden ser **simétricos** o **asimétricos**,
- ❖ Los esfuerzos pueden tener un nivel medio de **carga cero**.
- ❖ Los esfuerzos pueden tener un nivel medio de **carga diferente de cero**.

LA FATIGA puede ocurrir en procesos continuos donde las condiciones de esfuerzo son conocidas y están controladas (casos a y b de la figura 7.28), que podrían corresponder a las condiciones de trabajo de una máquina.

LA FATIGA puede ocurrir en procesos de naturaleza, nivel y duración variables, que podrían corresponder a las situaciones en un puente o en un avión.

Los componentes sometidos a fatiga pueden fallar, romperse. El 90% de los fallos y roturas de componentes se debe a Fatiga.

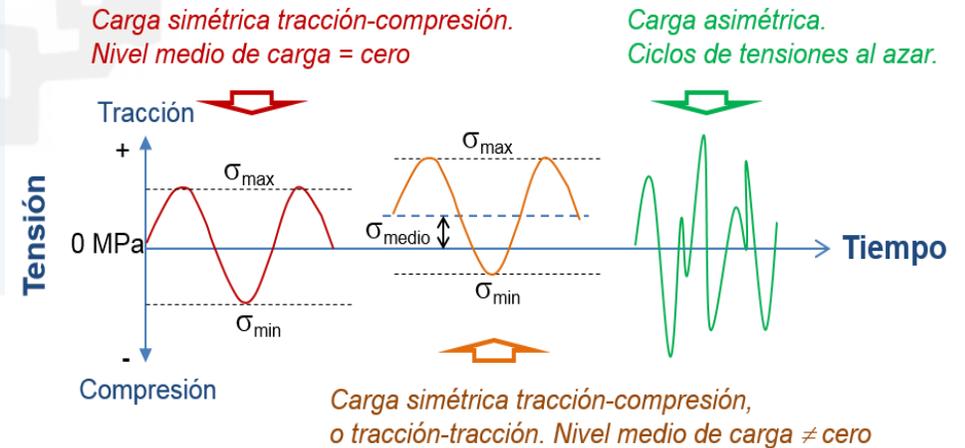


Figura 7.28: Fatiga en ciclos simétricos y asimétricos. (Autoría, ver últimas páginas)

Cuando un componente se rompe por fatiga “no avisa”, presenta una **fractura repentina frágil, incluso en materiales extremadamente dúctiles**.

ALGUNAS CONVENCIONES Y NOMENCLATURA

Las tensiones de tracción llevan signo POSITIVO, mientras que las de compresión llevan signo NEGATIVO. La fatiga debida a tensiones simétricas se caracteriza por los siguiente parámetros:

Tensión máxima	σ_{\max}
Tensión mínima	σ_{\min}
Tensión media	σ_m
Intervalo de tensiones	$\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
Amplitud de tensiones	$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$
Cociente de tensiones	$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$

7.8 FATIGA

7.8.1 FRACTURA POR FATIGA

El proceso de fatiga básicamente consiste en tres etapas:

- 1) **Iniciación de una grieta:** A partir de un defecto que contenga el material, debido a la concentración de tensiones que se crea en dicho defecto, se genera una grieta → **Etapas I**
- 2) **Propagación estable de la grieta:** Bajo la cíclica aplicación de tensión, la grieta va lentamente creciendo, y el factor de concentración de tensión también va creciendo lentamente con el tamaño de la grieta → **Etapas II**
- 3) **Rotura catastrófica:** Cuando la grieta ha alcanzado un tamaño crítico, el nivel de concentración de tensión supera al crítico (K_{IC}) y se propaga catastróficamente → **Etapas III**

Cuando un componente ha fallado por fatiga, el aspecto que generalmente muestra la superficie fracturada es similar al que se aprecia en la figura 7.29:

- ✕ Zona circular o elíptica con ondulaciones como en la arena de la playa tras pasar las olas
 - ✕ Las ondulaciones comienzan normalmente en un punto de la superficie, por lo cual se forma una zona semielíptica o semicircular a partir de un punto dado.
 - ✕ Este punto es el defecto originario

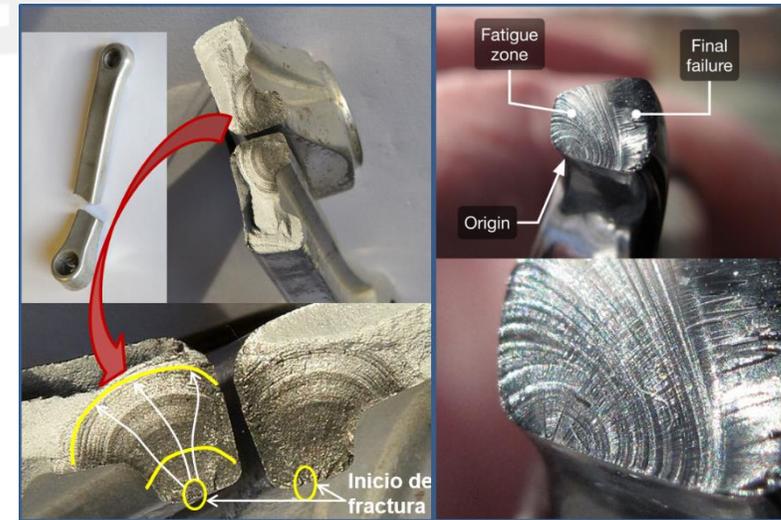


Figura 7.29: Superficie de fractura de dos componentes rotos por fatiga. (Autoría, ver últimas páginas)

El aspecto que se obtiene en las superficies de los componentes fracturados en fatiga se conoce como “playas de arena. **Son una clara indicación de que un proceso de fatiga ha tenido lugar.** Son visibles a simple vista. Cuando éstas ondas se observan en el microscopio muestran un interior “similar”, con mas ondas de tamaño microscópico, denominadas estrías.

Se cree que cada estría se forma en un ciclo de carga.

Es posible también que la propagación de una fractura por fatiga no muestre marcas de playa o estrías, aunque lo mas habitual es que sea así.

7.8 FATIGA

7.8.2 ETAPAS DE LA FATIGA

Etapa I :

La nucleación de la grieta requiere mucho tiempo, la grieta va creciendo lenta y establemente. Al inicio, la propagación de la fractura es muy pequeña en cada ciclo, únicamente afecta a unos pocos granos que se parten siguiendo los planos cristalinos mas favorecidos. El resultado es una superficie muy plana, sin ninguna estructura o textura superficiales.

Etapa II:

Una vez aumentado el tamaño de la grieta lo suficiente, la propagación se vuelve mas rápida. La fractura progresa en el plano perpendicular al esfuerzo aplicado. Esta etapa dura **hasta que la grieta alcanza el tamaño crítico**. En esta etapa es donde se producen las ondas en la superficie de fractura y el avance de los ciclos de la fatiga se observan claramente.

En esta etapa, **las condiciones ambientales y la microestructura** del material son determinantes para la velocidad de crecimiento de grieta.

Etapa III:

La grieta ha alcanzado un tamaño grande y a partir de aquí crece muy rápidamente con cada ciclo. Finalmente, alcanza el tamaño crítico para fractura frágil de acuerdo al factor de intensidad de tensiones del material (K_{Ic}), y se fractura de manera frágil, sin deformación plástica.

PUNTOS DE INICIO DE FATIGA: *Las grietas casi siempre se inician en la superficie de los componentes, en algún punto de concentración de tensiones, tales como:*

Rayas superficiales, ranuras, roscas, cambios abruptos de sección en el componentes, etc.

*Incluso si la superficie del componente se encuentra muy bien pulida y cuidada, **el ciclado mecánico conduce a deslizamiento de dislocaciones en la superficie**, lo cual acaba actuando como concentrador de tensiones.*

7.8 FATIGA

7.8.3 FATIGA DE ALTO CICLO

Este tipo de fatiga podría denominarse también “fatiga sana”. Los componentes siempre deben ser diseñados para trabajar sometidos a tensiones por debajo de su límite elástico, no sólo en el caso de componentes en condiciones de fatiga, todo componente se diseña para trabajar sometido a tensiones por debajo de su límite elástico.

Dado que las tensiones a las que los componentes están sometidos son pequeñas, el proceso de fatiga que se acaba de describir es muy lento. La grieta crece muy lentamente. En estas condiciones, los materiales son capaces de soportar un largo número de ciclos de tensiones sin romperse →

Habitualmente $>10^7$

A este tipo de fatiga se le denomina **FATIGA DE ALTO NÚMERO DE CICLOS**.

Es la situación habitual de fatiga del funcionamiento de máquinas, motores, etc., debida a tensiones cíclicas. Por tanto, las condiciones de fatiga son conocidas y los **componentes se deben diseñar para trabajar en dichas condiciones sin fallar durante su vida útil**.

Hay componentes en los cuales los ciclos de tensiones tendrán lugar al azar, no siendo previsible conocer ni la intensidad ni la frecuencia de las tensiones. Es el caso de puentes, aviones, edificios altos, mástiles de molinos eólicos, etc. Incluso aunque no se pueda conocer de modo certero la frecuencia ni la intensidad de las tensiones, en estos casos se realizan estimaciones considerando las situaciones más críticas y empleando factores de seguridad elevados. Los componentes se diseñarán para trabajar en el rango elástico bajo los máximos esfuerzos previstos en el funcionamiento.

7.8.4 FATIGA OLIGOCÍCLICA

Cuando la fatiga tiene lugar por encima de la zona elástica, el material se deteriora rápidamente y generalmente rompe a un número “bajo” de ciclos:

Habitualmente $<10^5$

Se le conoce como **FATIGA OLIGOCÍCLICA**.

Dado que los componentes deben diseñarse para funcionar siempre en su rango elástico, esta situación de fatiga es siempre **fruto de un mal diseño**: Cuando se diseñan los componentes siempre se seleccionan materiales cuyo límite elástico sea superior a los esfuerzos previstos, y en esas condiciones los materiales industriales no se fatigan en un número tan pequeño de ciclos.

7.8 FATIGA

Un caso habitual de mal diseño es no considerar los cambios térmicos en el funcionamiento del componente. Cuando en el funcionamiento existen ciclos de calentamiento-enfriamiento, si el diseño del componente no ha tenido en cuenta la expansión y contracción del material debido al cambio de temperatura, y no ha permitido suficiente “holgura” para que esta deformación pueda tener lugar sin imponer esfuerzos en el mismo, se puede llegar a la situación de que durante la expansión (o la contracción) los esfuerzos superen el límite elástico, deformándose plásticamente el material en cada ciclo de calentamiento y conduciendo a una rápida fractura.

Ejemplo de fatiga oligocíclica (Datos extraídos de CES Edupack):

Un eje de aluminio (aleación 2048) de 1m long. por 2000 mm² de área transversal (barra cilíndrica de aprox. 50,5 mm de diámetro) está encajado entre dos componentes anclados fijamente. Si la T aumenta desde ambiente (22°C) hasta 350°C, la extensión que sufrirá el eje es proporcional al gradiente de T y a su C.T.E. (coeficiente de expansión térmica, ver el tema dedicado a las propiedades térmicas de los materiales).

*Para esta aleación de aluminio el CTE= 23,6 x 10⁻⁶ (K⁻¹) = (mm/mm.K). Por tanto, la extensión de este eje por el calentamiento debería ser: 1 * 23,6 * 10⁻⁶ * (300-22)= 6,56 * 10⁻³ m = 6,56 mm.*

La deformación elástica máxima que puede soportar este eje se calcula de acuerdo a su límite elástico y al módulo de Young. El límite elástico de este material a T ambiente es 416 MPa, y su módulo de elasticidad es 70,3 GPa.

$$\sigma_y = 416 \text{ MPa} = E * \varepsilon = 70,3 * 10^3 * \varepsilon \rightarrow \varepsilon = 5.92 * 10^{-3}$$

Dado que el eje mide 1m, la máxima deformación que el material puede aguantar en el rango elástico es 5,92 mm.

Así, una expansión de 6,56 mm se traducirá en un esfuerzo mecánico superior al límite elástico del material → El material se deformará plásticamente. Posiblemente no se romperá en un ciclo, pero se deformará plásticamente y conducirá al fallo en un número de ciclos relativamente bajo.

Nota: Para la resolución anterior hemos asumido que el límite elástico y el módulo de Young a 350°C son los mismos que a Ambiente. Esto no es verdad. Ha sido una simplificación para ejemplificar el caso.

7.8 FATIGA

7.8.5 LAS CURVAS S-N

El conocimiento del comportamiento en fatiga es necesario en un gran número de componentes. Hay dos métodos diferentes del estudio de la fatiga. El primero, y más simple, son las llamadas **curvas S-N, y la determinación de la existencia o no de un límite de fatiga**. Son un método simple, válido para diseño de maquinaria. Mediante las curvas S-N se determina la vida útil previsible en componentes de maquinaria. Se determina, además, la existencia o no de un límite de fatiga.

El segundo método se emplea cuando se requiere la seguridad de que el componente no fallará por fatiga (aviones, puentes, estructuras) y se basa en la “Mecánica de la Fractura”.

Las curvas S-N se determinan mediante los ensayos denominados “**Ensayo de Flexión Rotativa**” (mal traducido del inglés: rotating bending fatigue).

Consisten en medir el nº de ciclos que aguanta un material bajo diferentes niveles de tensión máxima tracción-compresión y graficar los resultados. La probeta se flexiona respecto de su eje central de manera que, alternamente, en la superficie superior e inferior se alcanzan los máximos esfuerzos de tracción y compresión, mientras que el nivel de esfuerzos en el eje central de la probeta es cero.

Con este ensayo se pueden determinar únicamente los ciclos que la probeta aguanta hasta rotura con diferentes niveles de esfuerzo máximo. Es barato y simple!

La figura 7.30 muestra un esquema de este ensayo. La máquina más simple posible se puede ver en el siguiente video:

<https://www.youtube.com/watch?v=0hiyMsKENxY>

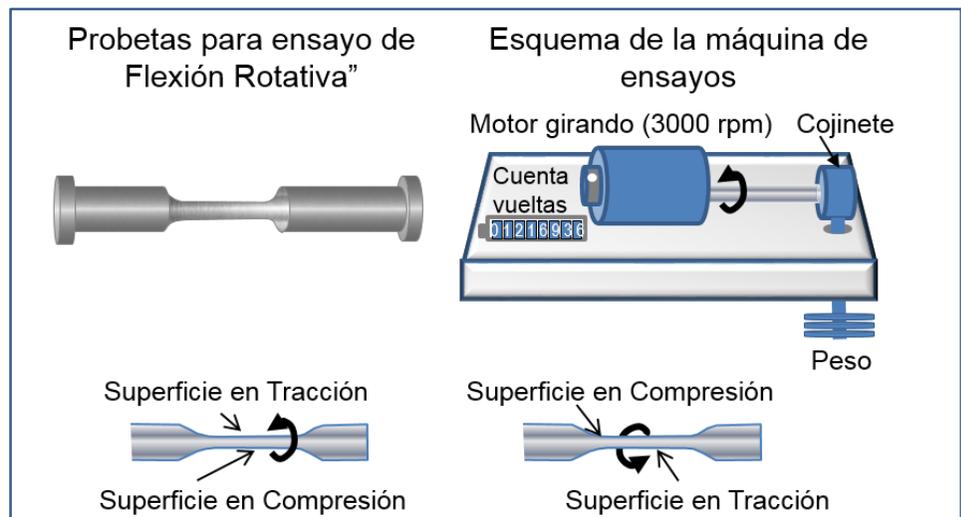


Figura 7.30: Esquema del dispositivo y de las probetas del ensayo de flexión rotativa. (Autoría, ver últimas páginas)

La probeta se encuentra unida por un extremo a un motor que la hace girar sobre su eje a 3000 rpm, mientras que del otro extremo cuelga un peso. De este modo cada punto de la superficie se encuentra sometido alternativamente a tracción y compresión 3000 veces en un minuto.

7.8 FATIGA

La batería de ensayos normalmente se empieza realizando un ensayo a un nivel alto de esfuerzo, $\sigma_{\max} = 2/3 \sigma_{\text{uts}}$ (resistencia a tracción) hasta que la probeta se rompe. Se mide el número de ciclos que ha aguantado. Después se ensayan probetas a menores cargas máximas sucesivamente, todas ellas hasta rotura.

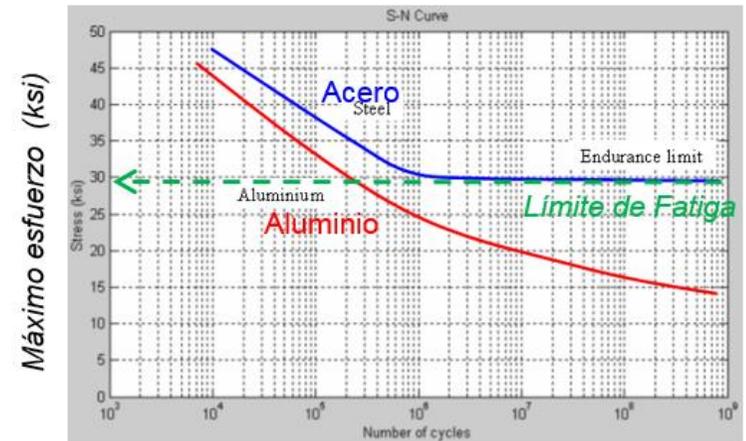
Los datos que se obtienen se representan como se muestra en la figura 7.31: *Máxima tensión versus Número de ciclos hasta fractura*. Curvas S-N.

En algunos materiales existe un nivel de tensión bajo el cual el componente prácticamente no “sufrir” la fatiga. A este nivel de tensión se le conoce como **LÍMITE DE FATIGA**. Si se emplean esos materiales sometidos a tensiones inferiores al límite de fatiga se garantiza que el material no fallará debido a la misma. En la figura 7.31, arriba, se ha incluido un acero que presenta límite de fatiga, mientras que el aluminio no lo presenta.

Los aceros suelen presentar límite de fatiga en tensiones máximas alrededor del 35-60% de su resistencia a tracción.

Las aleaciones de titanio también tienen un límite de fatiga.

Las aleaciones de aluminio o las de cobre no tienen límite de fatiga. En una situación de fatiga debemos tener siempre en cuenta que el componente va a tener una vida útil limitada.



Nº de ciclos hasta fractura (escala logarítmica)

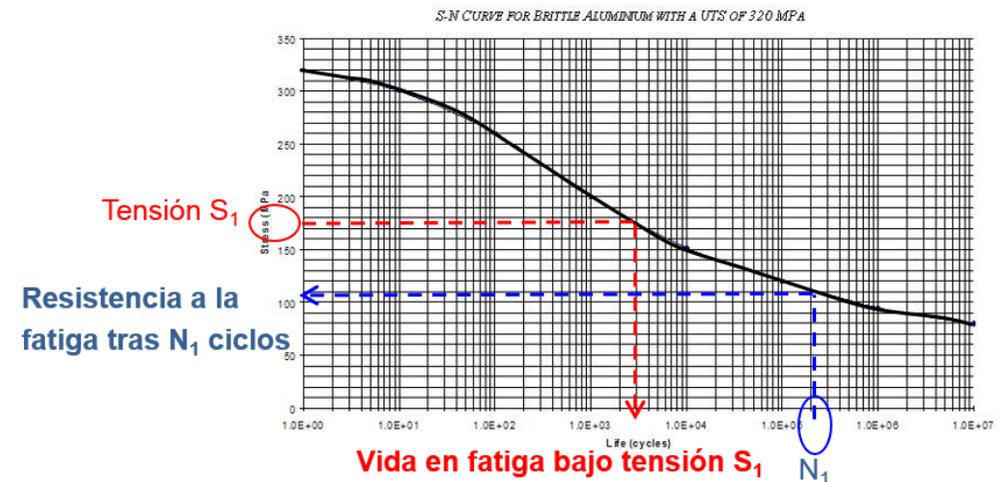


Figura 7.31: Curvas S-N de un acero y una aleación de aluminio (arriba). Vida en fatiga y resistencia a fatiga (abajo) (Autoría, ver últimas páginas)

7.8 FATIGA

7.8.6 RESISTENCIA A LA FATIGA / VIDA EN FATIGA

Resistencia a la fatiga es el nivel de tensión máximo que un componente puede soportar para sobrevivir un determinado número de ciclos (figura 7.31-inferior). Por ejemplo, el nivel máximo de tensión que deberá soportar un componente de una máquina que deba trabajar durante un determinado número de ciclos.

Vida a fatiga es el número de ciclos que es capaz de soportar un componente en un determinado nivel máximo de tensión.

DISPERSIÓN DE LOS RESULTADOS

Cuando se realizan ensayos de fatiga se obtiene una gran dispersión en los resultados: En iguales condiciones de ensayo unas probetas aguantan mas ciclos que otras: las grietas se inician en diferentes tipos de defectos.

El resultado final es la necesidad de tratar la vida en fatiga de manera probabilística. Se deben tener en consideración no sólo la vida media, sino los márgenes de probabilidad de fallo.

Por ejemplo, en la imagen adjunta bajo un esfuerzo en fatiga de 210 MPa, podemos esperar que un 1% de los componentes tenga una vida inferior a 10^6 ciclos, el 50% inferior a 3×10^6 ciclos, y el 99% ligeramente superior a 10^7 ciclos.

Esto sirve para diseñar componentes en maquinaria, donde su fallo no cause pérdidas relevantes, ni genere peligro. Basado en este tipo de estudios se diseñan componentes no críticos de maquinaria diversa (por ejemplo, componentes de electrodomésticos).

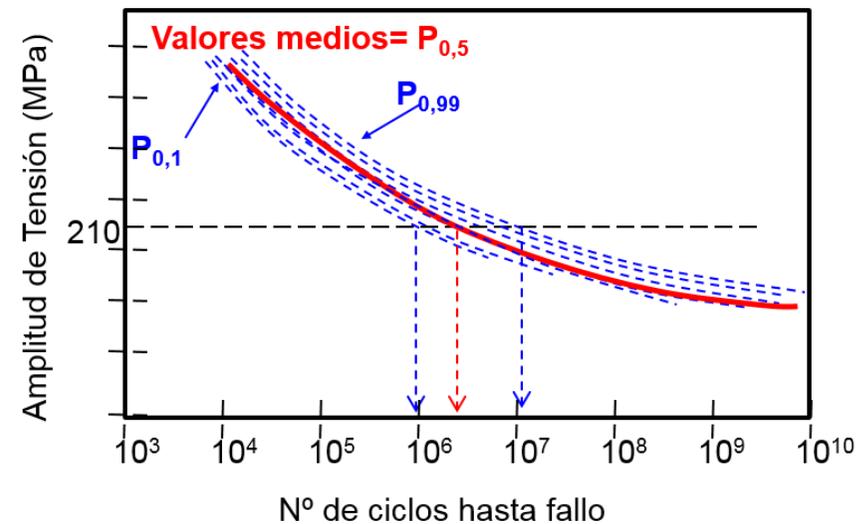


Figura 7.32: Tratamiento probabilístico de la resistencia a fatiga y la vida en fatiga (Autoría, ver últimas páginas)

7.8 FATIGA

7.8.7 DISEÑO PARA NO FALLAR EN FATIGA

Hay componentes en los cuales se debe asegurar que no van a fallar en servicio, tales como partes de aviones, barcos, estructuras de presas hidráulicas, etc. Esos componentes no deben fallar de manera imprevista. Es necesario conocer y prever en todo momento cual va a ser el comportamiento a fatiga del componente, para prevenir su fallo.

Para ello, se realiza un análisis de la nucleación y crecimiento de las grietas bajo los esfuerzos cíclicos, y se emplea la mecánica de la FRACTURA:

- *Las grietas primero se nuclean e inician,*
- *Después se propagan durante largo número de ciclos, y*
- *Cuando alcanzan un nivel crítico de intensidad de esfuerzos es cuando ocurre la propagación catastrófica y fractura frágil del componente.*

Lo que se hace es:

- ✘ emplear métodos de medida de las grietas,
- ✘ monitorizar la velocidad de crecimiento, y
- ✘ retirar/reparar el componente antes de que la grieta alcance el tamaño crítico.

El método se basa en la **mecánica de la fractura**.

Se realiza un plan de **mantenimiento preventivo** en el cual se miden las grietas existentes en los componentes y su crecimiento en servicio es monitorizado mediante inspecciones periódicas programadas.

Las técnicas de inspección que se emplean se denominan **ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS** (ultrasonidos, corrientes inducidas, etc).

Dado que se monitoriza el tamaño de las grietas y su crecimiento, los componentes son retirados y reparados o sustituidos antes de alcanzar el tamaño crítico de grieta para fractura frágil. ¿Que aporta la mecánica de la fractura? Permite diseñar componentes para una **VIDA SEGURA**:

- ✔ Acepta la existencia de grietas y/o defectos
- ✔ Garantiza que los componentes no se romperán en servicio
- ✔ Permite programar un plan de control y mantenimiento para evitar fallos
- ✔ Permite emplear materiales menos “seguros” pero mas interesantes comercial o técnicamente
- ✔ Permite desarrollar componentes para trabajo en condiciones extremas (toberas,...)

7.8 FATIGA

7.8.8 ENSAYOS DE CRECIMIENTO DE GRIETA EN FATIGA

Aceptando que cuando un componente está sometido a fatiga, los defectos que contiene podrán acabar formando grietas, las cuales van a crecer por fatiga, se puede estudiar cómo tiene lugar el proceso del crecimiento de la grieta con el fin de desarrollar herramienta predictivas y de control.

Para determinar el crecimiento de grieta en fatiga se realizan ensayos de laboratorio con probetas y en condiciones controladas de fatiga: Existen diversos tipos de probetas, pero todas ellas tienen en común que se les practica una grieta aguda en la superficie, de tamaño conocido y controlado. Para ello, la probeta se somete a fatiga de baja carga para provocar una grieta aguda de un tamaño claramente observable. Es a partir de ese momento cuando la probeta está preparada para realizar el ensayo de fatiga. Las probetas son sometidas a ciclos de tensión y se mide el crecimiento de la grieta cada x ciclos. La figura 7.33, arriba, muestra el esquema de uno de los tipos de probeta para este fin, con la entalla practicada en uno de sus laterales:

Arriba- Esquema de probeta de fatiga tipo SENT, con entalla en V.

En el centro- Probeta con galga extensométrica tipo CTOD para medir el crecimiento de la grieta. A su izda. Gráfico de la medida directa registrada en la máquina: tamaño de la grieta versus número de ciclos de fatiga.

Abajo- La probeta tras la fractura. Sólo se muestra la zona de la probeta en que la grieta creció por fatiga, hasta alcanzar el tamaño crítico.

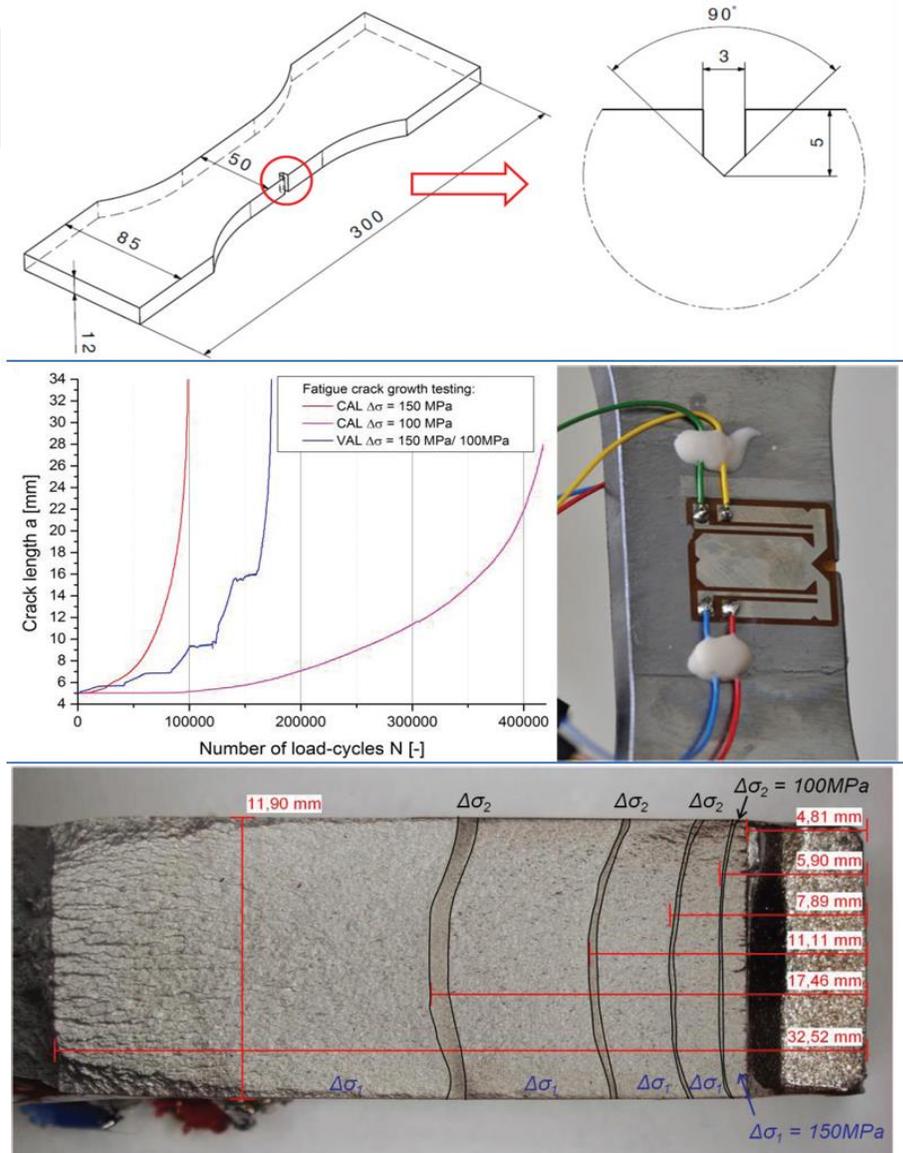


Figura 7.33: Ensayo de fatiga. (Autoría, ver últimas páginas)

7.8 FATIGA

Actualmente se mide el crecimiento de grieta de manera continua mediante un extensómetro **CTOD**, específico para transformar la apertura de la entalla en cada ciclo en la longitud de la grieta producida.

Los resultados muestran un crecimiento exponencial del tamaño de la grieta según el número de ciclos aumenta.

Se tratan para calcular la velocidad de crecimiento de grieta por cada ciclo, **da/dN**

Se representa **da/dN** versus el **factor de concentración de tensiones** en la punta de grieta bajo el máximo nivel de tensión en cada ciclo de fatiga

La gráfica que se obtiene (ambos ejes son escalas logarítmicas) tiene el aspecto de la figura 7.34.

Según la grieta crece, el factor de concentración de tensiones en la punta de la misma también crece (sin haber modificado las condiciones de fatiga). ΔK es el incremento del factor de intensidad de tensiones entre las cargas máxima y mínima (K_{\min} y/o σ_{\min} son = 0 ó son despreciables)

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = Y \Delta \sigma * (\pi * a)^{1/2} = Y [\sigma_{\max} - \sigma_{\min}] * (\pi * a)^{1/2}$$

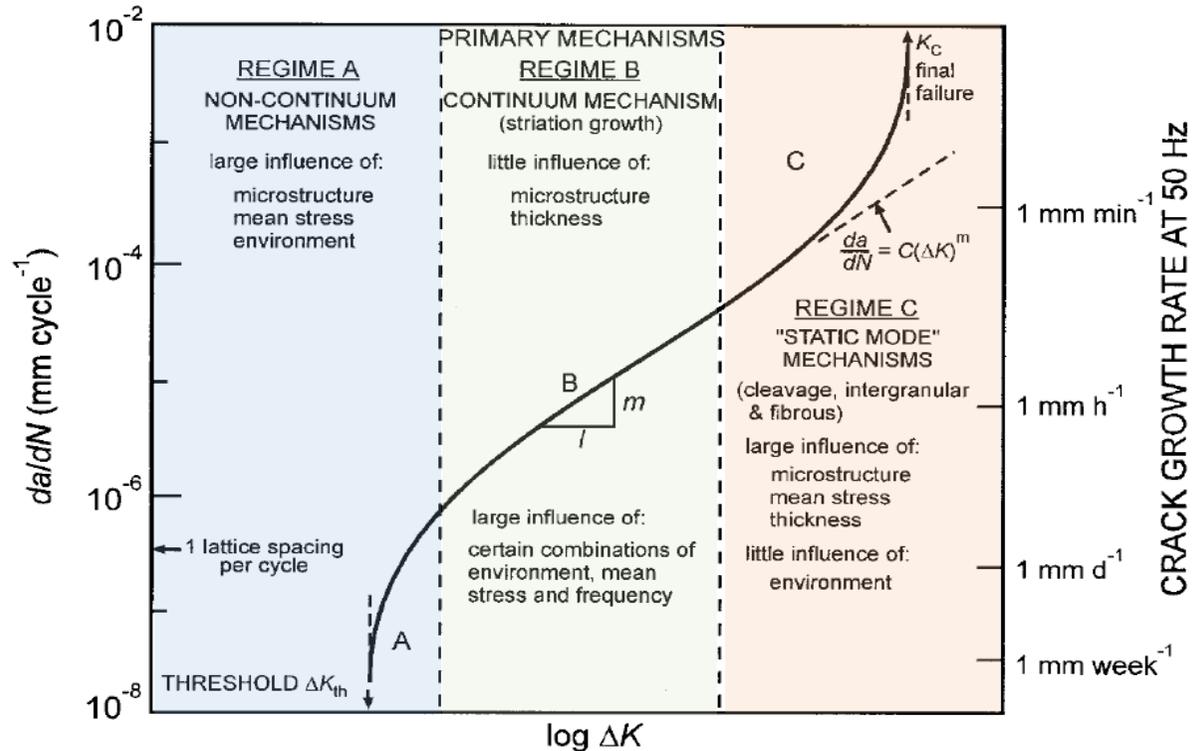


Figura 7.34: Crecimiento de grieta por fatiga. Gráfico que se obtiene de los ensayos de fatiga. (Autoría, ver últimas páginas)

La velocidad de crecimiento de grieta (**da/dN**) se mide en **mm/ciclo**.

Representando **log da/dN** versus **log ΔK** se distinguen tres zonas bien diferenciadas en este tipo de gráficas:

Etapa I (Reg. A) / Etapa II (Regimen B) / Etapa III (Regimen C)

7.8 FATIGA

▪ Nucleación / Etapa I ó región umbral (Regimen A):

Las grietas se inician. Una vez nucleada, la grieta va creciendo lenta y establemente. Como es muy pequeña el factor de concentración prácticamente no crece al inicio, y luego lo hace muy lentamente.

$$\log (da/dN) = m * \log (\Delta K) + \log A$$

$$\rightarrow da/dN = A * (\Delta K)^m$$

A y *m* son ctes. de cada material en cada condición ambiental y de fatiga.

▪ Etapa II (Regimen B):

Una vez aumentado el tamaño de la grieta lo suficiente, la propagación se vuelve mas rápida. Esta zona es cuasi lineal.

▪ Etapa III (Regimen C):

Rápida propagación de la grieta hasta alcanzar el tamaño crítico, en el cual el nivel de concentración de tensiones alcanza el valor del K_{Ic} (factor de intensidad de esfuerzos crítico), tras lo cual la grieta se propaga y se produce la fractura de manera catastrófica.

Tabla 7.2: Constante *A* y pendiente *m* de la ley de Paris para diversos materiales industriales.

Material	Cte. A de fatiga	Pendiente m
Aluminio y aleaciones de aluminio	(de 30 a 500)*10 ⁻⁹	2,5 - 3,7
Cobre puro	3*10 ⁻⁹	3,9
Aceros medios y bajos en C	(de 3 a 15)*10 ⁻⁹	3 - 3,1
Titanio y sus aleaciones	(de 7 a 30)*10 ⁻⁹	3,5 - 4,4
Polímeros en general	(de 1 a 1000)*10 ⁻⁴	2 - 6

LEY DE PARIS

Como se ve en la figura citada, la Etapa II se caracteriza por representar una línea recta:

log da/dN versus **log ΔK** es una línea recta de pendiente **m**

Se conoce como ley de Paris:

La figura 7.35 muestra el crecimiento de grieta en fatiga para diversos materiales. Como puede apreciarse, mientras que algunos presentan una amplia zona de crecimiento estable (etapa II), en otros materiales dicha etapa prácticamente no existe. Estos últimos son materiales frágiles, tales como cerámicas o aleaciones intermetálicas de gran fragilidad.

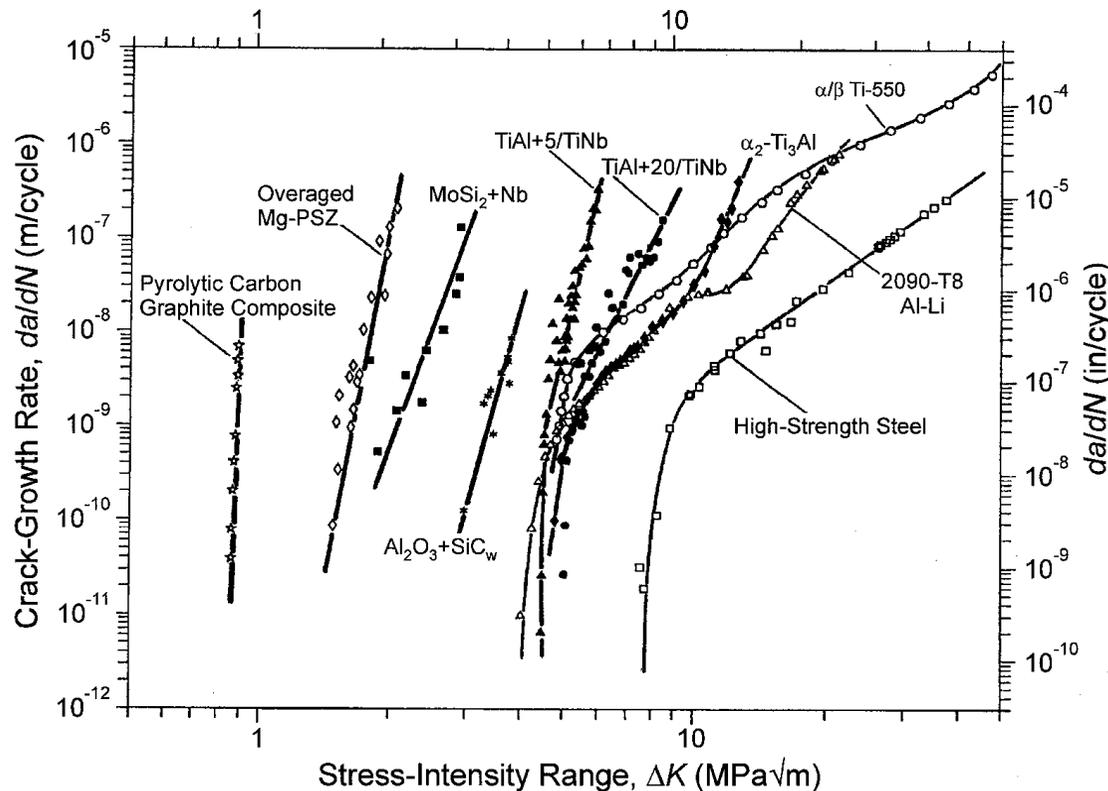
7.8 FATIGA

Los materiales que se usan para fabricar componentes sometidos a fatiga deben presentar una amplia zona de crecimiento estable de grieta.

Los materiales dúctiles usualmente presentan mas del 90% de su vida en fatiga en la etapa estable de crecimiento, Etapa II.

Para un componente fabricado de un material dado, que vaya a estar sometido a condiciones de fatiga:

► Conociendo el factor de intensidad de tensiones crítico del material, K_{IC} , y el máximo nivel de tensión en la fatiga del componente, podemos calcular cual será el tamaño de grieta crítico de ese componente, a . $K_{IC} = Y * \sigma * (\pi * a)^{1/2}$



► El exponente m de la ley de Paris (crecimiento estable de las grietas en la etapa II) es una característica intrínseca del material, por lo cual ha sido determinado en probetas de laboratorio para las principales aleaciones ingenieriles. Es decir, una vez conocidas las condiciones de fatiga y el material del componente podemos predecir su vida en fatiga dependiendo de las grietas que contenga.

► Por ello, los componentes sometidos a fatiga que no deban nunca fallar en servicio (puentes, aviones, u otro tipo de estructuras o componentes) son inspeccionados previamente a su uso para determinar la existencia de grietas o defectos en el componente, así como los puntos críticos donde puedan iniciarse grietas debido a su configuración (concentradores de tensión, otros).

Figura 7.35: Crecimiento de grieta por fatiga de diversos materiales. (Autoría, ver últimas páginas)

7.8 FATIGA

- ▶ Se planifica el mantenimiento e inspección periódico de manera que cada cierto tiempo en servicio (planificado desde el inicio) se monitoriza el crecimiento de las grietas que previamente existían y se determina la posible aparición de nuevas grietas.
- ▶ Se monitoriza de esta manera el crecimiento de las grietas y se comprueba que se ajusta a lo previsto.
- ▶ Si los datos se encuentran de acuerdo a lo previsto, se puede emplear el componente con grietas y defectos, retirándolo del servicio antes de que se alcance el tamaño crítico de grieta.
- ▶ Este es el modo en que se mantienen en funcionamiento los aviones, las plataformas petrolíferas, los puentes y otros tipos de estructuras e instalaciones donde se dan condiciones de fatiga

En los componentes, las grietas se miden visualmente o mediante diversas técnicas de inspección no destructivas (líquidos penetrantes, ultrasonidos, corrientes inducidas, otras), las cuales no se abordan en este curso.

La velocidad de crecimiento de grieta se puede medir en mm/hora, ó mm/mes, ó mm/año, dependiendo de cada componente y situación.

7.8.9 FACTORES QUE AFECTAN A LA VIDA EN FATIGA

🕒 **EL NIVEL MÁXIMO DE ESFUERZO**

🕒 **EL NIVEL MEDIO DE ESFUERZO**

Si el componente se encuentra continuamente sometido a una tensión de tracción, y no existe cierre ni compresión sobre la punta de grieta, la fatiga es mucho mas rápida

🕒 **La atmósfera**

Fatiga –corrosión: La punta de la grieta se abre antes y mas fácil si existe un medio que pueda interactuar con los átomos: H₂O, otros

🕒 **La temperatura**

🕒 **La microestructura del material**

Dado que la temperatura y la microestructura afectan a la resistencia a tracción, al límite elástico y a la tenacidad, igualmente afectan a la vida en fatiga

🕒 **El diseño del componente**

Un diseño no cuidado, donde existan configuraciones que actúen como concentradores de tensión, conducirá a la rápida nucleación y formación de grietas

🕒 **EL ACABADO SUPERFICIAL**

El acabado superficial es uno de los aspectos mas importantes para mejorar la vida en fatiga de los componentes. Se explica en la página siguiente.

7.8 FATIGA

PUNTOS DE NUCLEACIÓN DE GRIETAS

Las grietas generalmente se inician:

- Entorno a **defectos de manipulación o acabado**: *muestras de mecanizado, cambios de sección, "mellas" por golpes o manipulación, rayas, entallas, etc)*
- **Contornos de diseño que actúan como concentradores de tensión**: *Ángulos vivos, cambios bruscos de sección, cantos vivos, ranuras, roscas, etc.*
- **En la superficie**, ya que es en ella donde se encuentran los mayores "defectos" y concentradores de tensión. Incluso los "escalones" debidos al movimiento de dislocaciones se encuentran en las superficies.

¿COMO MEJORAR LA VIDA EN FATIGA?

El acabado superficial es uno de los aspectos mas importantes para mejorar la vida en fatiga de los componentes. Son beneficiosos:

- **Un cuidadoso mecanizado y pulido**
- **Imponer tensiones residuales compresivas** en la superficie de los componentes (dificulta el crecimiento de grietas desde la superficie). Hay dos métodos muy habituales (figura 7.36): Shot-peening y carburación/cementación.



Shot-peening: Consiste en un granallado de la superficie con partículas pequeñas no abrasivas. De esta manera se somete a la superficie a un estado de compresión que dificulta en gran medida la nucleación de grietas.



Carburación, nitruración o carbonitruración: Mediante endurecimiento superficial introduciendo pequeños átomos intersticiales en la red. Se hace habitualmente en aceros)

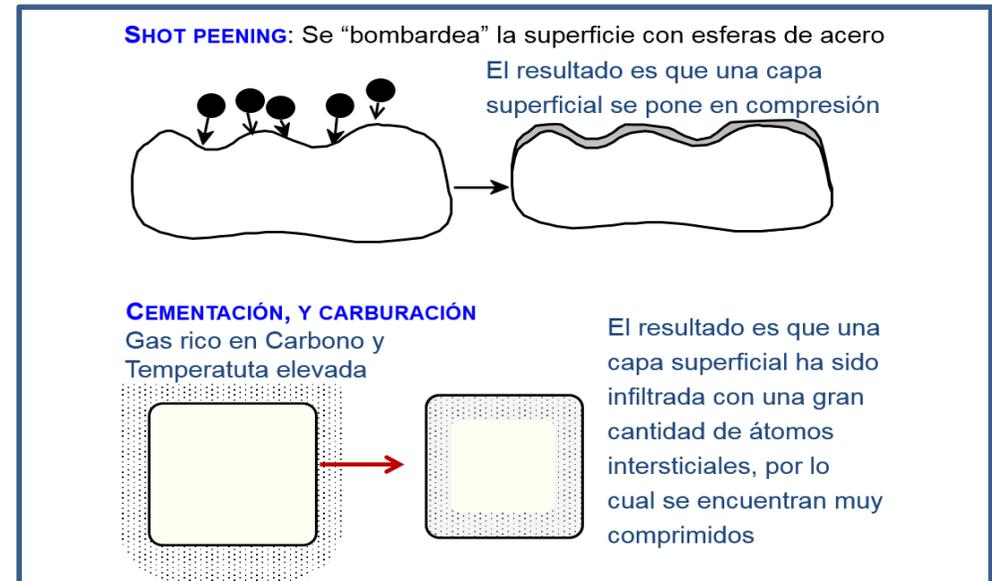
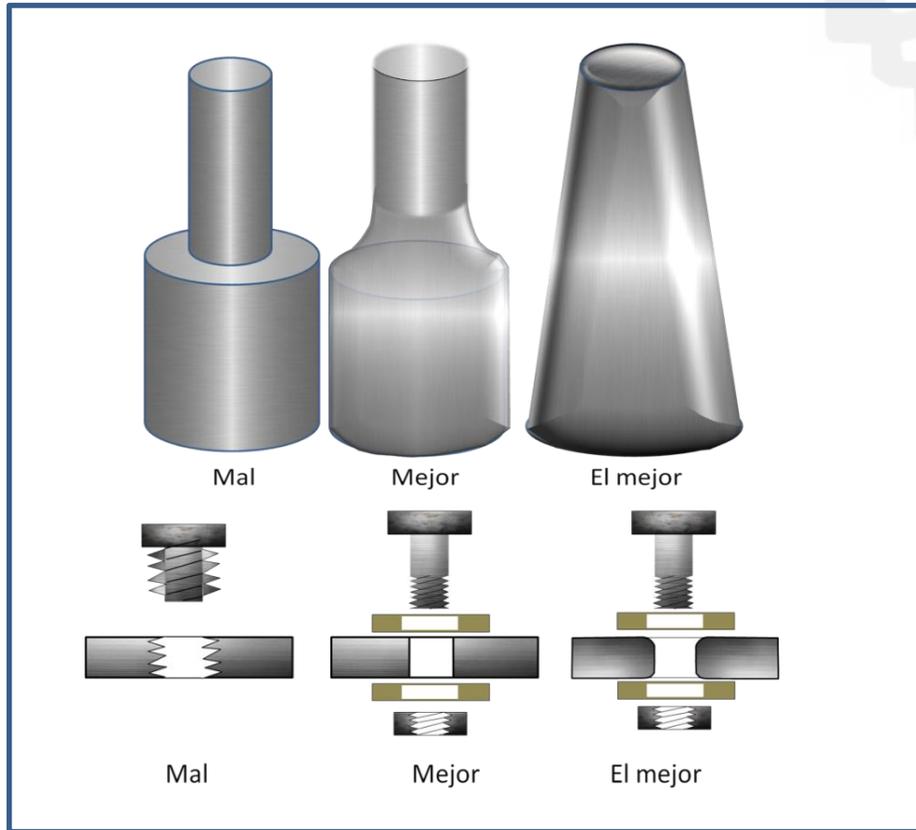


Figura 7.36: Métodos de endurecimiento superficial para mejora de la vida en fatiga de materiales metálicos. (Autoría, ver últimas páginas)

- **Eliminar factores de concentración de tensiones:** Eliminar cambios bruscos de sección. Eliminar todos los aspectos del diseño que puedan servir de puntos de nucleación de grietas.

7.8 FATIGA



- **Cuidar la superficie de los componentes:** Las mayores tensiones normalmente se dan en la superficie de los componentes ya que cualquier pequeña flexión o desviación de la alineación de cargas se traduce en una componente máxima de tracción en la superficie. Así mismo, dado que la superficie interactúa con el exterior, es en ella donde se dan los mayores riesgos de daño.

Figura 7.37: Diseños correctos e incorrectos de cambios de sección (arriba) y de agujeros y roscas, para mejorar la vida en fatiga de los componentes. (Autoría, ver últimas páginas)

Eliminar: chavetas o ranuras, ángulos vivos, roscas para tornillos, etc. Si se requiere realizar agujeros, deben ser circulares y con acabados suaves, redondeados.

7.9 FLUENCIA

Se conoce como fluencia al proceso de deformación permanente que experimentan los materiales cuando se les somete durante un tiempo largo a cargas estacionarias en la zona elástica, a elevada temperatura. **Es un fenómeno dependiente del tiempo bajo carga.** En estas condiciones los materiales se pueden deformar bajo cargas inferiores al límite elástico a la temperatura de trabajo. Es un fenómeno indeseado que debe ser evitado o controlado, igual que ocurre con la fatiga.

La fluencia se da en todo tipo de materiales, siendo los polímeros amorfos especialmente sensibles a la misma.

En metales únicamente debe considerarse cuando la temperatura de uso se encuentra por encima de $0,4 T_{\text{fusión}}$.

Hay muchas situaciones industriales en las que se encuentran conjuntamente condiciones de carga estacionaria mecánica y elevadas temperaturas. El ejemplo más claro son los álabes de las turbinas y compresores, los cuales se encuentran sometidos a fuerzas centrífugas y temperaturas desde 200°C hasta más de 1200°C , dependiendo del tipo de álabes y de turbina. Los filamentos de wolframio de las antiguas bombillas incandescentes son otro ejemplo (la carga estática es su propio peso).

Se recomienda realizar las simulaciones incluidas en la siguiente página web: <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/creep/mechanisms.php>

Para evaluar el comportamiento a fluencia se realizan ensayos de fluencia. Son muy simples...y muy caros, ya que consisten en “colgar” probetas con un peso dado dentro de un horno a la temperatura de estudio, midiendo la deformación que experimenta con el tiempo.

Los ensayos requieren desde horas hasta meses, o incluso años.

Por ejemplo, la industria nuclear estudia la resistencia a fluencia de los materiales con los que se fabrican los componentes de reactores y de las “piscinas” de residuos, ya que éstos se mantienen a gran temperatura durante décadas.

Los resultados de los ensayos producen una gráfica que tiene el aspecto de la figura 7.38. Como puede verse, presenta muchas similitudes con las gráficas de fatiga.

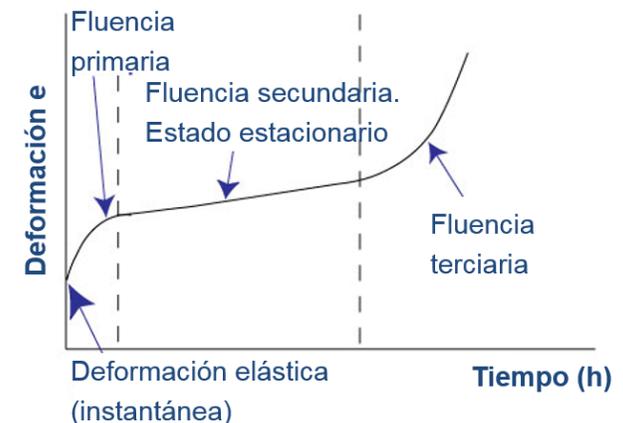


Figura 7.38: Gráfica típica de un proceso de fluencia. (Autoría, ver últimas páginas)

7.9 FLUENCIA

Deformación Elástica: Cuando el componente es sometido a un esfuerzo en la zona elástica, instantáneamente sufre la correspondiente deformación elástica.

Fluencia Primaria: El componente sometido a este esfuerzo, nominalmente en la zona elástica, se deformará lentamente de manera definitiva. Ello es debido a que a altas T se activan los procesos de difusión. Los átomos en las dislocaciones y en los límites de grano se mueven. Como hay muchas dislocaciones moviéndose, el material se endurece, por lo cual en esta etapa la velocidad de deformación decrece con el tiempo.

Fluencia Secundaria: A la vez que el material se endurece por apilamiento de las dislocaciones que se deslizan, como la T es alta, tiene lugar una recristalización de los granos simultáneamente al proceso de la deformación. La velocidad de deformación y la de recristalización se equilibran, y la fluencia muestra una velocidad cte. Se le llama etapa **Estacionaria**, y suele ser el estadio de mayor duración en el proceso de fluencia.

Fluencia Terciaria: Cuando la deformación es ya muy grande llegamos a la estricción. En esta etapa se produce la fractura, que es muy similar a la que ocurre en un comportamiento a tracción: Se nuclean huecos y se originan fracturas entorno a las inclusiones. También llegamos a la nucleación de huecos en los límites de grano, preferentemente en los puntos triples. El resultado es una fractura dúctil.

7.9.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y LA CARGA EN LA FLUENCIA

Cuanto mayor es la temperatura y/o la carga:

- 1) Mayor es la deformación instantánea (elástica)
- 2) Mayor es la velocidad de fluencia (deformación estacionaria)
- 3) Menor es el tiempo hasta la rotura

Al igual que en caso de la fatiga, en la fluencia debe conocerse y controlarse el estado estacionario con el fin de poder diseñar procesos seguros a pesar de que exista el fenómeno de fluencia. Este estado estacionario se define mediante una ecuación en la cual toman parte la energía de activación para fluencia (es un proceso controlado por difusión!), y ctes. del material.

Ensayos realizados a la misma temperatura pero bajo distintos niveles de carga $\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$

Ensayos realizados bajo la misma carga, pero a diferente temperatura $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$

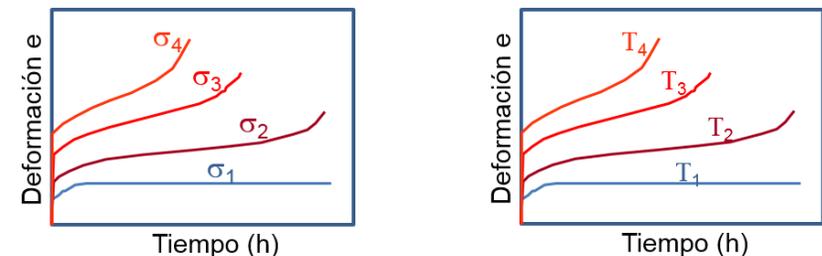


Figura 7.39: Proceso de fluencia bajo distinto nivel de tensión (izda.) y bajo distinta T (dcha.). (Autoría, ver últimas páginas)

7.9 FLUENCIA

7.9.2 MECANISMOS DE FLUENCIA

Al igual que en caso de la fatiga, en la fluencia debe conocerse y controlarse el estado estacionario con el fin de poder diseñar procesos seguros a pesar de que exista el fenómeno de fluencia. Se deberá siempre prevenir que el material sobrepase la etapa estacionaria.

El estado estacionario se define mediante la siguiente ecuación, donde Q_c es la energía de activación para fluencia, y K y n son ctes. del material.

Velocidad de fluencia estacionaria

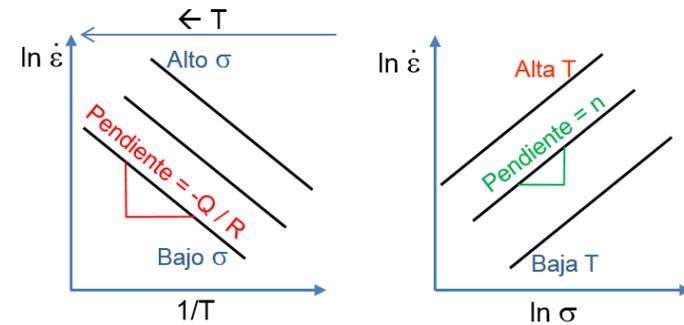
$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

Arrhenius: es un proceso controlado por difusión

Dependiendo del mecanismo que opere, los valores de la energía de activación, Q_c y del exponente n son diferentes. La resistencia a fluencia de los materiales se puede comparar mediante estos dos parámetros. Estos parámetros se determinan experimentalmente realizando ensayos a diferentes temperaturas y bajo diferentes niveles de carga

→ Representando la velocidad de deformación versus $1/T$ se calcula la energía de activación (figura 7.40 izda.).

→ Representando la velocidad de deformación versus la carga, se calcula el exponente n (figura 7.39 dcha.):



Nota: $\ln \dot{\epsilon} = \ln$ velocidad de deformación

Figura 7.40: Representación de la velocidad de deformación en el estado estacionario de fluencia en función de la temperatura a la que tiene lugar (izda.) y en función del nivel de carga mecánica a la que se encuentra sometido (dcha.). (Autoría, ver últimas páginas)

EL MECANISMO DE “NABARRO-HERRING”

A elevadas temperaturas la fluencia suele tener lugar siguiendo un mecanismo denominado “Nabarro-Herring”. Consiste en lo siguiente:

- Los granos se deforman bajo la carga mediante movimiento de las dislocaciones → Esto conduce a que el material se endurezca: **endurecimiento por deformación**.
- Sin embargo, debido a las altas temperaturas, al endurecimiento por deformación le sigue un proceso de **recristalización** y recuperación.

7.9 FLUENCIA

- El resultado final en el **mecanismo de “Nabarro-Herring”** da una imagen de que los granos “se deslizan” ya que recristalizan bajo la carga aplicada, en la dirección de aplicación de la tensión → **Existe un equilibrio** entre el endurecimiento por deformación y la recristalización de los granos.

EL MECANISMO DE “COBLE”

Cuando la temperatura no es muy elevada la deformación se da por difusión de los átomos **a través de los límites de grano**.

Los límites de grano son zonas energéticamente activadas del material, ya que en ellos se encuentran átomos sin enlazar e impurezas, y consisten en una imperfección de la red. Por ello, la difusión en límite de grano se activa con la temperatura.

En ambos casos, tanto si la fluencia se da por uno o por otro mecanismo, **el punto más débil son los límites de grano**, y concretamente los puntos triples, donde se juntan tres granos. Es habitual que con el proceso de fluencia se nucleen agujeros en dichos puntos, los cuales acaban conduciendo a la fractura.

La fractura por fluencia siempre es dúctil, al contrario que la fractura por fatiga, la cual es frágil.

A nivel microestructural los siguientes factores son positivos:

Elevado Punto de Fusión
Elevado Módulo de Young
Gran tamaño de grano

7.9.3 COMPONENTES SOMETIDOS A FLUENCIA

Al diseñar componentes para una larga vida en condiciones de fluencia (reactores nucleares, otros) se emplean factores de seguridad muy grandes de acuerdo a ensayos de fluencia realizados a muy alta T, superior a la que se empleará en servicio.

Para diseñar componentes sometidos a fluencia en periodos relativamente cortos (álabes de turbina en aviones militares, componentes de cohetes o misiles, etc) se emplean criterios de vida estimada bajo las condiciones de trabajo.

Ejemplo:

Los álabes de turbina son componentes que trabajan en condiciones de fluencia: giran a gran velocidad a la vez que están sometidos a las altas temperaturas procedentes de la cámara de combustión. El resultado es que deben trabajar bajo una gran fuerza centrífuga a alta temperatura. Dado que la tensión a la que están sometidos es unidireccional, a lo largo del álabe, el proceso de fluencia conducirá al alargamiento del álabe en esa dirección. Si ello tiene lugar, tocarán la zona estacionaria de la turbina y producirían el estallido del motor.

La figura 7.40 muestra una zona de una turbina (izda.) y tres álabes de turbina de primera etapa (dcha.).

7.9 FLUENCIA

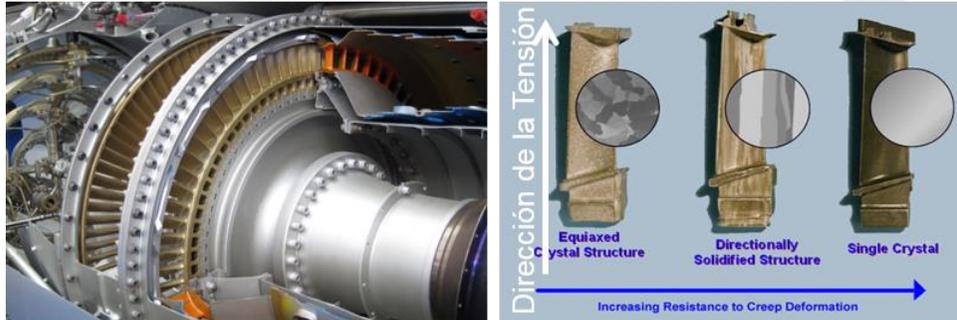


Figura 7.41: Sección de una turbina Rolls Royce-Turbomeca-Adour (izda.) y tres álabes de turbina de primera etapa. (Autoría, ver últimas páginas)

Izda.: Parte de la sección trasera de un turbohélice Rolls-Royce-Turboméca-Adour, exhibido en el Musée de l'Air en París, Francia. El flujo de aire va de derecha a izquierda de la imagen. La turbina de dos etapas se puede ver en el centro, con los álabes (pintados en tono dorado) unidos al disco mediante las uniones tipo "abeto". Tras las dos etapas de turbina se puede apreciar el sistema de postcombustión.

Dcha.: Tres álabes de turbina de primera etapa. De izda. a dcha., álabes policristalino tradicional, álabes solidificados direccionalmente y álabes monocristalinos.

Tal como se ha indicado, los puntos críticos para los procesos de fluencia son los límites de grano y, sobre todo, los vértices donde confluyen tres granos.



Para componentes sometidos a fluencia es importante tener granos grandes: menor superficie de límite de grano y menor número de juntas triples.

En el caso de los álabes de las turbinas de avión, actualmente se fabrican álabes solidificados direccionalmente, e incluso álabes monocristalinos, tal como muestra la figura 7.41, dcha.: El álabes de la izda. es policristalino, el álabes del centro presenta granos solidificados direccionalmente, de manera que cada grano va desde la raíz hasta el final superior, alineado con la tensión centrífuga a que están sometidos. El álabes de la derecha es un monocristal. Estos últimos álabes presentan una resistencia a la fluencia muy superior.

El uso de álabes direccionalmente solidificados, y sobre todo de álabes monocristalinos permite subir la temperatura de funcionamiento del motor en varios cientos de grados, incrementando su eficiencia.

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

REFERENCIAS

- [1] Sharmaa, Prince et al. Quasi-Brittle Fracture of Aluminium Alloy 2014 under Ballistic Impact (en 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics, Implast 2016). *Procedia Engineering*, 2017, vol. 173, p. 206 – 213. Open access article under the CC BY-NC-ND license
- [2] Ritchie, Robert O. The conflicts between strength and toughness. *Nature Materials*, 2011, vol. 10, p. 817–822. doi:10.1038/nmat3115. Published online 24 October 2011.
- [3] Simunek, David; Leitner, Martin; Maierhofer, Jürgen y Gänser, Hans-Peter. Fatigue crack growth under constant and variable amplitude loading at semi-elliptical and V-notched steel specimen. (en 6th Fatigue Design conference, Fatigue Design 2015). *Procedia Engineering*, 2015, vol. 133, p. 348 – 361.
- [4] Ritchie, R.O. Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids. *International Journal of Fracture*, 1999, Vol 100 p. 55–83.

AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 7.1: Comportamiento mecánico típico de los distintos tipos de materiales

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.2: La cesta colgante de Leonardo

Lund, Jay R. y Byrne, Joseph P. Leonardo Da Vinci's tensile strength tests: implications for the discovery of engineering mechanics. *Civil. Eng. and Env. Syst.*, 2000, Vol. 00, p. 1 – 8.

Figura 7.3: Fracturas macroscópicamente dúctiles (A y B) y frágiles (C).

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.4: Micromecanismo de fractura dúctil.

Imagen derivada de Bbanerje at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7486677>

Figura 7.5: Probeta mostrando una fractura dúctil típica. Micrografías de dos zonas de una fractura dúctil.

Imagen superior de BradleyGrillo at the English language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7486633>. Las imágenes inferiores de [K Clark](#) corresponden a las micrografías nº 138 (izda.) https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/full_record.php?id=138 y nº 141 (dcha.) https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/full_record.php?id=141. Attribution-Non-Commercial-Share Alike 2.0 UK: England & Wales

Figura 7.6: Probetas de Aleación de Aluminio AA2014 ensayadas en condiciones de impacto, mostrando la fractura frágil.

Imagen extraída de la referencia bibliográfica [1]. Sharmaa et al. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 173, p. 206 – 213. Open access article CC BY-NC-ND

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 7.7: Fractura frágil intergranular (izda.) y fractura frágil transgranular (dcha.) tipo "clivaje".

Imagen de la dcha. de [K Clark](#), micrografía nº 143 (Cleaveage fracture of a low Carbon ferritic Steel) https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/full_record.php?id=143.

Imagen de la dcha. de [S Munday](#), micrografía nº 147. (Intergranular failure of a HY100 forging Steel) https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/full_record.php?id=147.

[Attribution-Non-Commercial-Share Alike 2.0 UK: England & Wales](#)

Figura 7.8: Retrato de Leonardo Da Vinci (1510) situado en Royal Library (Windsor Castle, UK).

Imagen de Francesco Melzi - Web Gallery of Art: Image Info about artwork, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15498000>

Figura 7.9: Defecto interno circular (izda.). Defecto interno elíptico (dcha.).

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.10: El mismo defecto interno en tres orientaciones diferentes

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.11: Concentradores de tension en cambios de sección

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.12: Dispersión habitual en los resultados de ensayos de tracción de probetas metálicas y cerámicas

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.13: Energía elástica almacenada a tracción (dcha.) en el elemento mostrado a la izda.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.14: Energía elástica almacenada a tracción en un elemento antes y después de introducir una grieta en el mismo.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.15: Intercambio de energía debido a la rotura de un componente lineal elástico

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.16: Probeta CT para determinación de la tenacidad a la fractura

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.16: : Probetas CT (izda. Y centro) y SENB (dcha.) para determinar la tenacidad a la fractura

Imagen de la izda. de Ane Miren García Romero. Imagen del centro derivada de la imagen de Bbanerje (Own work) [CC BY-SA 3.0]

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ACompactTensionSpecimen.svg> .

Imagen de la dcha. derivada de la imagen de Bbanerje (Own work) [CC BY-SA 3.0] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ASingleEdgeNotchBending.svg>

Figura 7.17: Relación entre Tenacidad y Resistencia para distintos tipos de materiales

Imagen de Ane Miren García Romero. Realizada con CES Edupack- licencia UPV/EHU 2016.

Figura 7.18: Grieta en una cerámica de alta Resistencia mecánica (SiC).

Imagen extraída de la referencia bibliográfica [2]. Ritchie, Robert O. *Nature Materials*, 2011, vol. 10,p. 817–822. Published online 24 October 2011

Figura 7.19: Composite de partículas prismáticas cerámicas unidas por una matriz cerámica.

Imagen extraída de la referencia bibliográfica [2]. Ritchie, Robert O. *Nature*

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Materials, 2011, vol. 10,p. 817–822. Published online 24 October 2011

Figura 7.20: Ensayo SENB de dos materiales composites de matriz y refuerzo cerámicos.

Imagen extraída de la referencia bibliográfica [2]. Ritchie, Robert O. *Nature Materials*, 2011, vol. 10,p. 817–822. Published online 24 October 2011

Figura 7.21: Mecanismos de fractura en materiales composites que tienen fibras largas alineadas en direcciones diferentes.

Imagen de Ane Miren García

Figura 7.22: Fracturas producidas en ensayos SENB de probetas extraídas de hueso humano en dirección transversal y en dirección longitudinal.

Imagen de Kurt Koester, extraída de <http://newscenter.lbl.gov/2008/08/06/the-toughness-of-bone/> (23/03/2018))

Figura 7.23: Micromecanismos que imparten tenacidad a la fractura a los huesos.

Imagen extraída de la referencia bibliográfica [2]. Ritchie, Robert O. *Nature Materials*, 2011, vol. 10,p. 817–822. Published online 24 October 2011

Figura 7.24: Principales micromecanismos que imparten tenacidad a la fractura.

Imagen extraída de la referencia bibliográfica [2]. Ritchie, Robert O. *Nature Materials*, 2011, vol. 10,p. 817–822. Published online 24 October 2011

Figura 7.25: Barco Liberty fracturado (izda.). Fotografía de Constance Tipper (dcha.)

Imágenes de de: <http://www-g.eng.cam.ac.uk/125/1925-1950/tipper.html>

Figura 7.26: Ensayo de impacto para determinar la transición dúctil-frágil (izda.). Gráfico típico para determinar la transición dúctil-frágil de los materiales.

Imágenes adaptadas de (izda.) <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/BD6/notched.php> y (dcha.) <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/BD6/ductile-to-brittle.php>. Content is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/)

Figura 7.27: Resultados de los ensayos de impacto en distintos materiales habituales.

Imagen derivada de <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/BD6/results.php> content is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/)

Figura 7.28: Fatiga en ciclos simétricos y asimétricos.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.29: Superficie de fractura de dos componentes rotos por fatiga.

Imagen de la izda. de Imagen adaptada de: By Oxensepp - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30471892>. Imagen de la derecha, sin atribución de autoría, de <http://leancrew.com/all-this/2014/01/bridge-failure/>. This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/)

Figura 7.30: Esquema del dispositivo y de las probetas del ensayo de flexión rotativa

Imagen de Ane Miren García Romero.

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 7.31: Curvas S-N de un acero y una aleación de aluminio (arriba). Vida en fatiga y resistencia a fatiga (abajo).

Imagen superior derivada de la imagen de Andrew Dressel [CC BY-SA 3.0].

https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AS-N_curves.PNG.. Imagen inferior

derivada de de: Public Domain, [CC BY-SA 3.0].

[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:S-](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:S-N_curves#/media/File:BrittleAluminium320MPA_S-N_Curve.jpg)

[N_curves#/media/File:BrittleAluminium320MPA_S-N_Curve.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:S-N_curves#/media/File:BrittleAluminium320MPA_S-N_Curve.jpg)

Figura 7.32: Tratamiento probabilístico de la resistencia a fatiga y la vida en fatiga

Imagen de Ane Miren García Romero

*Figura 7.33: **Arriba**- Esquema de probeta de fatiga tipo SENT, con entalla en V. **En el centro**- Probeta con galga extensométrica tipo CTOD para medir el crecimiento de la grieta. A su izda. Gráfico de la medida directa registrada en la máquina: tamaño de la grieta versus número de ciclos de fatiga. **Abajo**- La probeta tras la fractura. Sólo se muestra la zona de la probeta en que la grieta creció por fatiga, hasta alcanzar el tamaño crítico.*

Imagen adaptada de Simunek, David; Leitner, Martin; Maierhofer, Jürgen y Gänser, Hans-Peter. Fatigue crack growth under constant and variable amplitude loading at semi-elliptical and V-notched steel specimen. (en 6th Fatigue Design conference, Fatigue Design 2015). *Procedia Engineering*, 2015, vol. 133, p. 348 – 361.

Figura 7.34: Crecimiento de grieta por fatiga. Gráfico que se obtiene de los ensayos de fatiga.

Imagen adaptada de Ritchie, R.O. Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids. *International Journal of Fracture*, 1999, Vol 100 p. 55–83.

Figura 7.35: Crecimiento de grieta por fatiga de diversos materiales.

Imagen adaptada de Ritchie, R.O. Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids. *International Journal of Fracture*, 1999, Vol 100 p. 55–83.

Figura 7.36: Métodos de endurecimiento superficial para mejora de la vida en fatiga de materiales metálicos.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.37: Diseños correctos e incorrectos de cambios de sección (arriba) y de agujeros y roscas, para mejorar la vida en fatiga de los componentes.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.38: Gráfica típica de un proceso de fluencia.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.39: Proceso de fluencia bajo distinto nivel de tensión (izda.) y bajo distinta T (dcha.).

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.40: Representación de la velocidad de deformación en el estado estacionario de fluencia en función de la temperatura a la que tiene lugar (izda.) y en función del nivel de carga mecánica a la que se encuentra sometido (dcha.).

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 7.41: Sección de una turbina Rolls Royce-Turbomeca-Adour (izda.) y tres álabes de turbina de primera etapa.

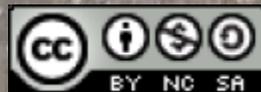
Imagen de la izda. de Olivier Cleynen - Own work, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25373920>. Imagen de la dcha.

<https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/creep/images/img014.jpg> © 2004-2015 University of Cambridge. [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 UK: England & Wales License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

BILBOKO INGENIERITZA ESKOLA



Esta obra está bajo una licencia Reconocimiento-NonComercial-Compartir bajo la misma licencia 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES.

Imagen de la Portada y contraportada. Diseño de una fachada de composición de fibra de vidrio con resina poliéster degradada por exposición a la intemperie cercano al mar (Hondarribia, España, 2014). Propiedad de Ane Miren García Romero.