

Otras Propiedades Mecánicas en los Metales

1.- Dureza y Ensayo de Dureza

La dureza es la resistencia que presenta el material a ser rayado o penetrado. Es una medida de la resistencia de un metal a la deformación permanente (plástica).

La dureza de un metal se mide según sea la facilidad con que puede ser deformada plásticamente, es decir forzando la indentación (marca o huella) de un penetrador en la superficie del metal. El penetrador, que normalmente es una bola, pirámide o cono, está fabricado con un material mucho más duro que el material a ensayar. Por ejemplo, el material empleado en estos penetradores suele ser acero templado, carburo de tungsteno o diamante. En la mayoría de los ensayos de dureza normalizados se aplica lentamente una carga conocida, que presiona el penetrador contra la superficie del metal a ensayar y perpendicularmente a ésta.

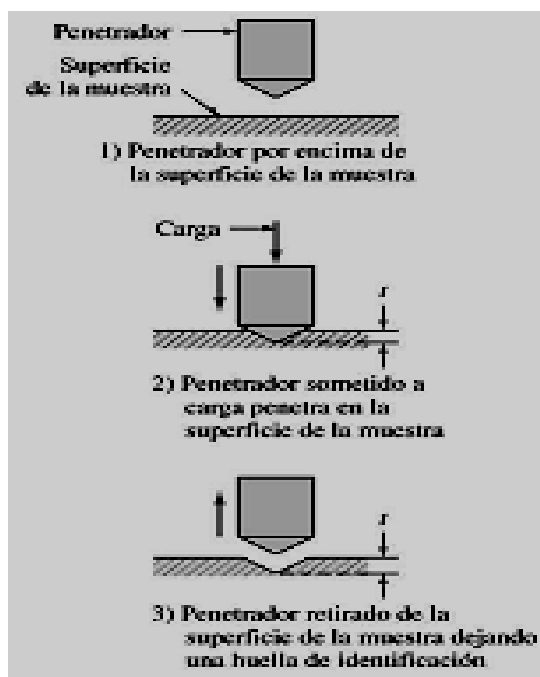


Figura N°1.- Etapas del ensayo de dureza

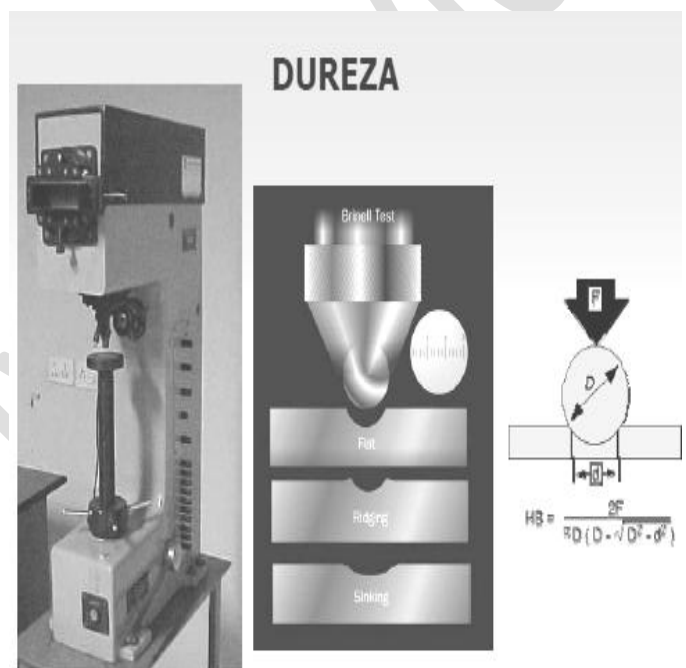


Foto N°1.- Durómetro y etapas del ensayo

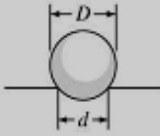
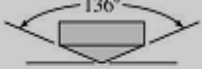
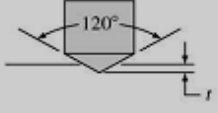
En la **Figura N°1**, se puede observar las etapas del ensayo de dureza con un penetrador cónico de diamante. La profundidad t determina la dureza del metal. A menor valor de t , mayor dureza del material.

Después de producir la indentación, se retira el penetrador. Se calcula o se lee en un dial un número empírico de dureza, como en un durómetro de la **Foto N°1**, basado en el área del corte transversal de la huella producida o en su profundidad.

En la siguiente **Tabla N°1**, se muestran algunas de las escalas más empleadas de acuerdo a los tipos de penetradores y tipos de huellas producidas asociados a los ensayos de dureza comunes:

- **HB** (*hardness Brinell*) más conocida como dureza o escala *Brinell* cuyo indentador es una esfera.

- **HV** (hardness Vickers) más conocida como dureza o escala Vickers cuyo indentador es una pirámide.
- **HR_A**, **HR_B** o **HR_C** (*hardness Rockwell series A, B o C* dependiendo de la carga) más conocida como dureza o escala *Rockwell* (A, B o C) cuyo indentador es un cono.

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula del número de dureza
		Vista lateral	Vista en planta		
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de wolframio			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$
Rockwell	Cono de diamante			60 kg $R_A =$ 150 kg $R_C =$ 100 kg $R_D =$	$100-500f$
A } C } D }					
B } F } G }	Esfera de acero de $\frac{1}{16}$ pulgadas			100 kg $R_B =$ 60 kg $R_F =$ 150 kg $R_G =$	$130-500f$
E	Esfera de acero de $\frac{1}{8}$ pulgadas			100 kg $R_E =$	

Fuente: Según H. W. Hayden, W. G. Moffatt y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. III, Wiley, 1965, p. 12.

Tabla N°1.- Escalas más empleadas de acuerdo a los tipos de penetradores y tipos de huellas producidas asociados a los ensayos de dureza comunes

El número de dureza para cada uno de estos ensayos depende del penetrador y de la carga aplicada. Por tanto, se puede determinar una relación experimental entre la dureza y la resistencia para cada metal en particular.

El ensayo de dureza es mucho más simple que el ensayo de tracción y puede ser no destructivo (es decir, la presencia de una pequeña huella no impide la utilización del objeto ensayado). Por estas razones, es común la utilización del ensayo de dureza en el control de calidad de procesos industriales, no puede utilizarse directamente en trabajos de diseño, el valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos.

La dureza no es una propiedad fundamental de un material, sino que está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas.

El procedimiento de prueba y la preparación de la muestra suelen ser sencillos y los resultados pueden utilizarse para estimar otras propiedades mecánicas.

La prueba de dureza se utiliza ampliamente para inspección y control.

2.- Fractura

Uno de los aspectos más importantes y prácticos de la selección de metales en el diseño, desarrollo y producción de nuevos componentes es la posibilidad de que el componente falle durante su funcionamiento habitual.

La falla se puede definir como la incapacidad de un material o componente de:

- 1) realizar la función prevista,
- 2) cumplir los criterios de desempeño aunque pueda seguir funcionando, o
- 3) tener un desempeño seguro y confiable incluso después de deteriorarse.

El rendimiento, desgaste, la torcedura (inestabilidad elástica), la corrosión y la fractura son ejemplos de situaciones en las que ha fallado un componente.

Es alta la posibilidad de fractura en los componentes que soportan cargas y sus posibles efectos dañinos en la productividad, seguridad otras cuestiones. Como resultado, todos los ingenieros de diseño, de manufacturas y de materiales aplican factores de seguridad en su análisis inicial para reducir la posibilidad de fractura o, esencialmente mediante el sobre diseño del componente o de la máquina.

En muchos campos, como el del diseño y fabricación de recipientes a presión, distintas dependencias han puesto en vigor códigos y normas que deben seguir todos los diseñadores y fabricantes. Sin importar el cuidado extremo que se tenga en el diseño, la fabricación y la selección de materiales para máquinas y componentes, las fallas son inevitables, y causan pérdidas de bienes y, por desgracia, a veces de vidas. Por esta razón se debe estar completamente familiarizado con el concepto de fractura o falla de los materiales y ser capaz de obtener información de un componente que falló para poder determinar las causas de la falla.

Desde una perspectiva puramente mecánica, a los ingenieros les interesa la falla por fractura de los componentes diseñados fabricados con metales, materiales cerámicos, materiales compuestos, polímeros e incluso materiales electrónicos.

De acuerdo a lo expuesto se puede definir a la *fractura como la separación de un sólido en dos o más piezas bajo la acción de una fuerza*. En general, la fractura de los metales puede clasificarse en dúctil y frágil, pero puede ser una mezcla de ambas.

Fractura dúctil

La fractura dúctil de un metal tiene lugar después de una deformación plástica intensa y se caracteriza por la lenta propagación de la fisura. La fractura frágil, en contraste, presenta una rápida propagación de la fisura.

En la siguiente **Foto N°2**, se muestra un ejemplo de fractura dúctil en una probeta de aleación de aluminio. Debido a su rapidez, las fracturas frágiles generalmente conducen a súbitas e inesperadas fallas catastróficas, mientras que la deformación plástica acompañada de fractura dúctil puede detectarse antes de que ocurra la fractura.

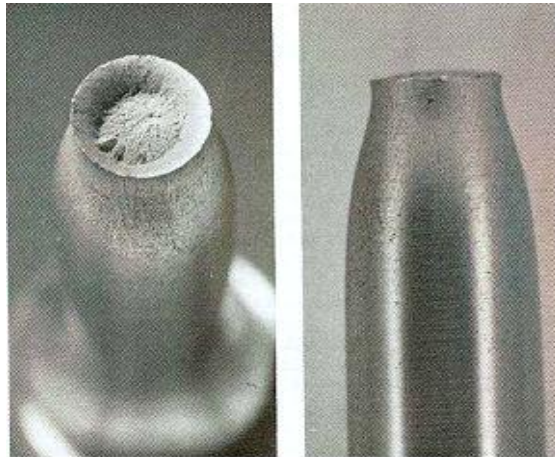


Foto N°2.- Fractura dúctil (copa y cono) de una aleación de aluminio.

Por simplicidad, considérese la fractura dúctil de una probeta redonda. Si se aplica un esfuerzo a la probeta tal que exceda su resistencia máxima a la tensión, y se mantiene suficiente tiempo, la probeta se fracturará. Pueden reconocerse tres etapas distintas en la fractura dúctil:

- 1) La muestra presenta una estricción y se forman cavidades en la zona de estricción (**Figura N°2 a y b**).
- 2) Las cavidades formadas se juntan generando una fisura en el centro de la probeta que se propaga hacia la superficie de la misma y en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado (**Figura N°2 c**).
- 3) Cuando la fisura se aproxima a la superficie, la dirección de la misma cambia a 45° respecto al eje de la tensión y se genera una fractura del tipo copa y cono (**Figura N°2 d y e**).

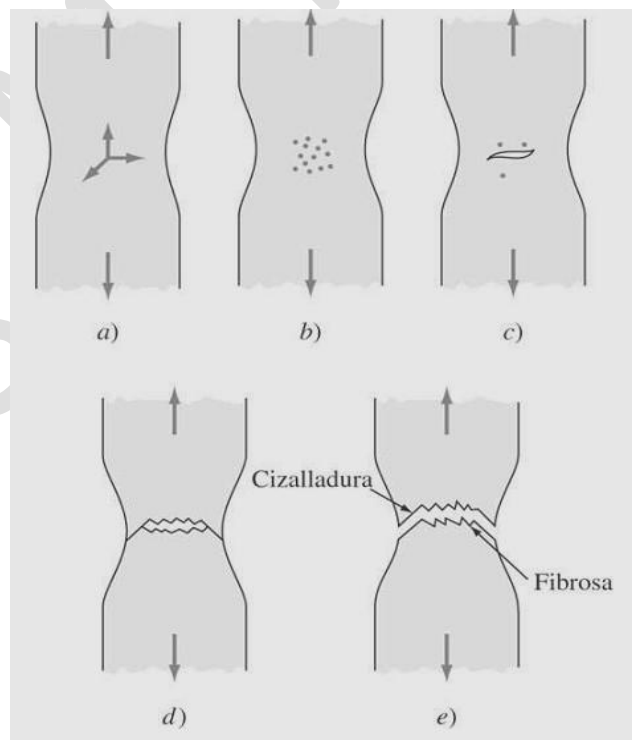


Figura N°2.- Etapas a; b; c; d y e) que se pueden presentar en la fractura dúctil

En la práctica, las fracturas dúctiles son menos frecuentes que las frágiles, y su principal causa es el exceso de carga aplicado al componente. La sobrecarga podría ocurrir como resultado de:

- 1) Un diseño inadecuado, lo que incluye a la selección de materiales (componente sub diseñado).
- 2) Fabricación inadecuada.
- 3) Abuso o sobrecarga (el componente se emplea a niveles de carga por encima del permitido por el diseñador).

Fractura frágil

Normalmente la superficie de fractura es lisa y perpendicular al esfuerzo aplicado en tensión, como se puede observar en la **Foto N°3**. Muchos metales y aleaciones se fracturan de forma frágil con muy poca deformación plástica.

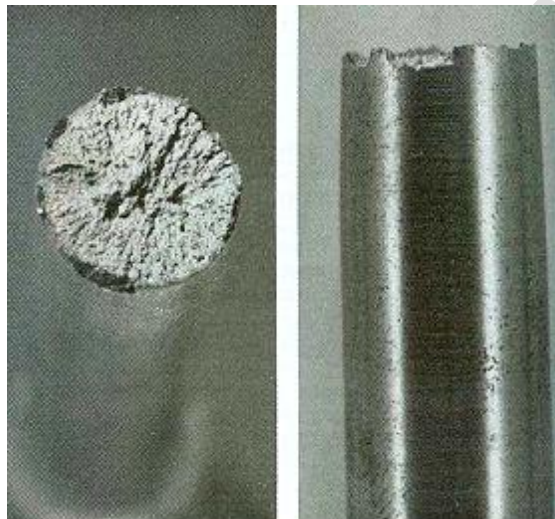


Foto N°3.- Fractura frágil en una probeta

Muchos metales con estructura cristalina HCP(hcp) muestran habitualmente fractura frágil debido al número limitado de planos de deslizamiento, también los metales con estructura cristalina BCC(bcc) como el hierro α , molibdeno y wolframio se fracturan de forma frágil a bajas temperaturas y a elevadas velocidades de deformación.

En muchos casos, las fracturas frágiles ocurren debido a la existencia de defectos en el metal. Estos defectos se forman durante la etapa de fabricación o aparecen durante el desempeño.

Pueden formarse defectos indeseables como pliegues, grandes inclusiones, microestructura defectuosa, porosidad, roturas y fisuras durante las operaciones de manufactura (como el forjado, laminado, extrusión y colado).

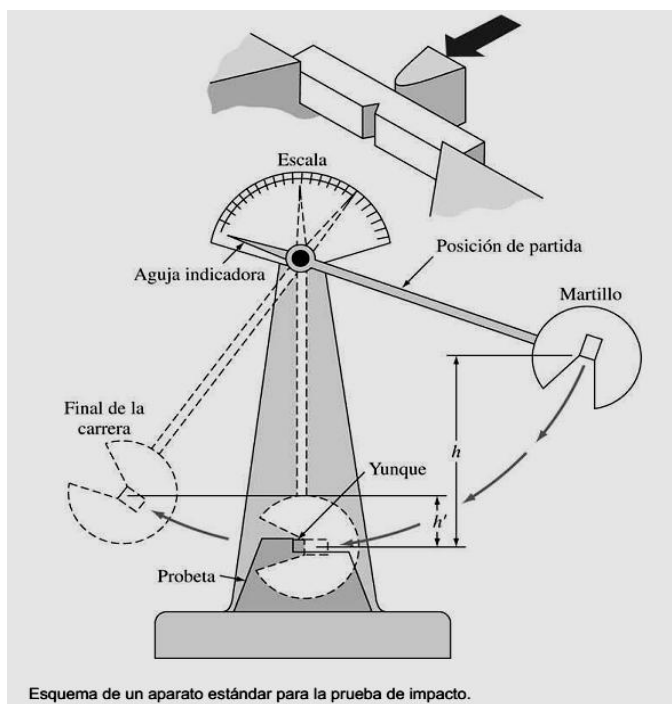
Cuando la fractura frágil ocurre, se inicia sistemáticamente en el lugar del defecto (muescas de tensión) sin importar la causa de la formación del defecto. Determinados defectos, bajas temperaturas de operación o velocidades altas de carga también pueden causar la fractura frágil de algunos materiales moderadamente dúctiles. La transición del comportamiento dúctil a frágil se denomina

transición de dúctil a frágil (TDF). Así, materiales que son usualmente dúctiles pueden, en determinadas circunstancias, fracturarse de manera frágil.

3.- Tenacidad y prueba de impacto

La tenacidad es una medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de fracturarse. Esta propiedad es de importancia en la ingeniería cuando se considera la capacidad que tiene un material para soportar un impacto sin que se produzca la fractura. Uno de los métodos más simples de medida de la tenacidad es la prueba de impacto. En la siguiente **Figura N°3**, se muestra el diagrama esquemático de un péndulo para la prueba de impacto.

Una de las formas de utilizar este péndulo de impacto consiste en colocar una probeta Charpy con muesca en V a lo largo junto a los brazos paralelos de la máquina (tal como se muestra en la parte superior de la **Figura N°3 a**). A continuación, se suelta el péndulo pesado desde una altura determinada, el cual golpea a la probeta en su trayectoria descendente fracturándola. Conocida la masa del péndulo y la diferencia entre las alturas inicial y final se determina la energía presente en el proceso de fractura.



a)

Probetas	
Tamaño • 10x 10x55mm	Entalladuras • V • U • Ojo de Cerradura

Probeta después del ensayo
Ensayo de resiliencia o de impacto



b)

Figura N°3.- a) Péndulo de impacto; **b)** Probetas Charpy: dimensiones, formas y estado después del ensayo

Temperatura de transición de dúctil a frágil (TDF)

Como se mencionó, en determinadas condiciones se observa un cambio marcado en la resistencia a la fractura de algunos metales que están en uso, esto es, la transición de dúctil a frágil.

Las bajas temperaturas, la aplicación de un gran esfuerzo y velocidades de carga rápida pueden causar que un material dúctil se comporte de manera frágil; sin embargo, usualmente, la temperatura

se selecciona como la variable que representa esta transición mientras que la velocidad de carga y la velocidad de aplicación del esfuerzo se mantienen constantes.

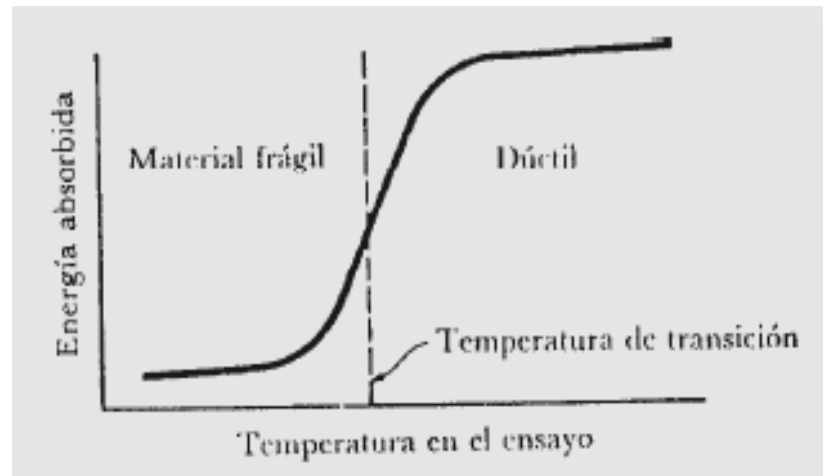


Figura N° 4.- Resultados típicos de una serie de pruebas de impacto, identificación grafica de la TDF

En la siguiente **Figura N° 5**, se puede observar el efecto relativo de la temperatura en la energía de impacto de diversos tipos de materiales.

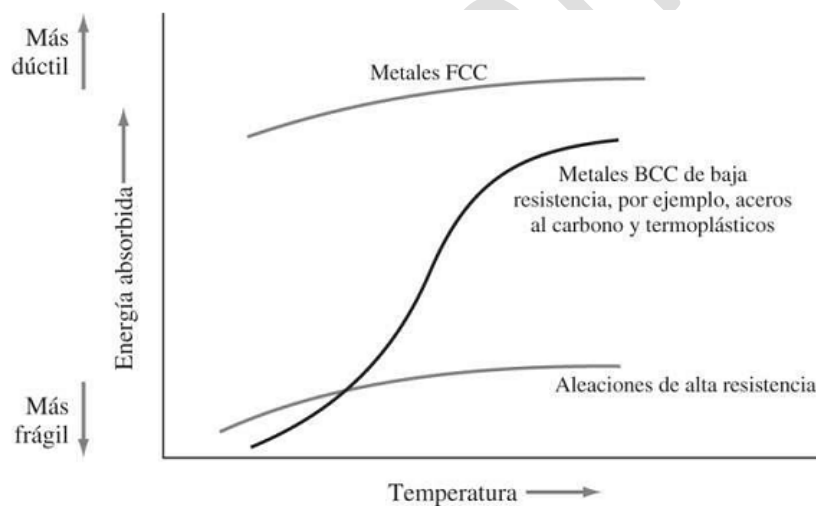


Figura N°5.- Efecto relativo de la temperatura en la energía de impacto de diversos tipos de materiales.

La transición de dúctil a frágil es un importante elemento a tomar en cuenta en la selección de materiales para componentes que funcionan en ambientes fríos. Por ejemplo, los barcos que navegan en aguas frías y las plataformas mar adentro que se localizan en los mares árticos, las cuales son en especial susceptibles a la TDF. Para tales aplicaciones, los materiales seleccionados deberían tener una temperatura de TDF que sea considerablemente menor que la temperatura de operación o de servicio.

En síntesis el péndulo de impacto puede emplearse para:

- La determinación de la temperatura de transición dúctil frágil de los materiales. Algunos metales muestran una temperatura TDF diferente, para muchos, esta transición ocurre a lo largo de un intervalo de temperaturas.
- Los materiales con elevada resistencia al impacto son los que tienen elevada ductilidad y resistencia.
- Sí la superficie de una pieza tiene muescas se reduce significativamente la tenacidad al impacto

4.- Resistencia a la fractura

La fractura de un metal (material) se inicia en el punto en que la concentración de esfuerzos es la más elevada, como puede ocurrir, por ejemplo, en el vértice de una fisura.

Considérese una placa sometida a esfuerzo uniaxial que contiene una fisura en el borde, ver **Figura N°6 a**, o en el interior, ver **Figura N°6 b**. El esfuerzo es más elevado en el vértice de la fisura, como se muestra en la figura **Figura N°6 c**. Se ha encontrado que la intensidad del esfuerzo en el vértice de la fisura depende del esfuerzo aplicado y de la amplitud de la fisura.

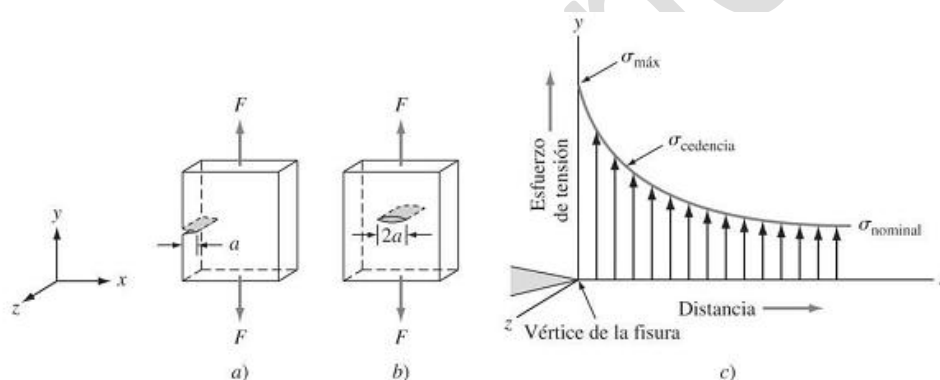


Figura N°6.- Placa de aleación metálica bajo tensión uniaxial: **a)** con una fisura en el borde a ; **b)** con una fisura en el centro $2a$; **c)** Distribución de esfuerzos respecto a la distancia del vértice de la fisura. El esfuerzo es máximo en el vértice de la fisura.

Los valores de resistencia a la fractura de los materiales son muy útiles en diseño mecánico, sobre todo cuando se trabaja con materiales de tenacidad o ductilidad limitada como son las aleaciones de aluminio de alta resistencia, el acero y las aleaciones de titanio.

Los valores de resistencia a la fractura pueden utilizarse en el diseño mecánico para predecir el tamaño de fisura permitido en aleaciones con ductilidad limitada cuando actúan sobre ellas esfuerzos específicos también se aplica (un factor de seguridad para mayor confianza).

5.- Fatiga

En muchos tipos de aplicaciones las piezas metálicas sometidas a esfuerzos cíclicos o repetitivos se rompen por la fatiga que sufren debido a un esfuerzo mucho menor de lo que la pieza puede soportar durante la aplicación de un esfuerzo estático sencillo. Estas fallas se denominan fallas por fatiga.

Las piezas móviles, como los ejes de transmisión de movimiento, bielas y engranajes, son ejemplos de piezas de las máquinas en las que es común la falla por fatiga. Algunas estimaciones de las fallas de las máquinas se atribuyen en un 80 % de la acción directa a las fallas por fatiga.

La falla por fatiga se origina en un punto de concentración de esfuerzos como lo es un extremo afilado o una muesca, o en una inclusión metalúrgica o fisura. Una vez nucleada, la fisura se propaga a través de la pieza sometida a esfuerzos cíclicos o repetidos. En esta etapa del proceso de fatiga se forman las denominadas marcas de “playa”, como puede observarse en la **Foto N°4**. Finalmente, la sección remanente se hace tan pequeña que no puede soportar la carga aplicada y tiene lugar la fractura del componente.

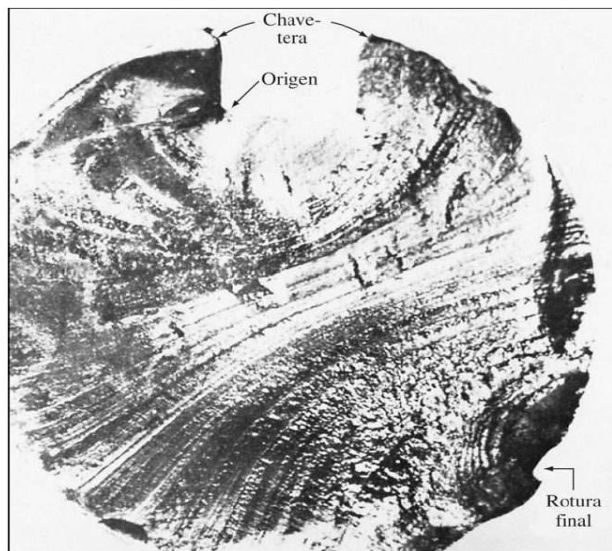


Foto N°4.- Superficie de fractura por fatiga de un eje fabricado con acero. La fisura por fatiga se originó en la esquina inferior izquierda de la chavetera y se extendió casi completamente por toda la sección transversal antes de que ocurriera la fractura.

Por ello, usualmente se pueden reconocer dos tipos distintos de superficie:

- 1) Una región lisa debida a la fricción entre las superficies abiertas durante la propagación de la fisura a través de la sección.
- 2) Una superficie rugosa generada durante la fractura cuando la carga es demasiado elevada para la sección transversal remanente.

Factores de importancia que afectan la resistencia a la fatiga de los metales

La resistencia a la fatiga de un metal o aleación es afectada por otros factores además de la composición química del metal. Algunos de los factores más importantes son:

1. Concentración de esfuerzos. La resistencia a la fatiga queda reducida de forma muy importante por la presencia de puntos con concentración de esfuerzos tales como muescas, orificios, hendiduras o cambios bruscos en la sección transversal. Las fallas por fatiga pueden minimizarse mediante un diseño cuidadoso que evite en lo posible los puntos de concentración de esfuerzos.

2. Aspereza superficial. En general, cuanto más liso sea el acabado superficial de la probeta metálica, mayor será su resistencia a la fatiga. Las superficies ásperas generan concentración de esfuerzos que facilitan la formación de fisuras por fatiga.

3. Estado de la superficie. Puesto que la mayoría de las fallas por fatiga se originan en la superficie del metal, cualquier cambio importante en las condiciones de la superficie afectará la resistencia a la fatiga del metal.

4. Medio ambiente. Si se encuentra presente un ambiente corrosivo durante la aplicación de ciclos de fatiga a un metal, el ataque químico acelera de manera muy importante la velocidad a la cual se propaga la fisura por fatiga. La combinación del ataque corrosivo y los esfuerzos cíclicos en un metal se conoce como corrosión-fatiga.

6.- Fluencia

Cuando un metal o aleación está bajo una carga o esfuerzo constante, puede sufrir una deformación plástica progresiva después de un tiempo. Esta deformación dependiente del tiempo se denomina fluencia.

La fluencia en los metales y aleaciones es muy importante en algunos diseños en ingeniería, particularmente en aquellos que operan a elevadas temperaturas. Por ejemplo, un ingeniero que seleccione una aleación para los álabes de una turbina de gas de un motor, debe elegir una aleación con muy baja velocidad de fluencia puesto que los álabes deben permanecer en servicio durante un largo periodo antes de ser reemplazados por estar próximos a alcanzar la deformación plástica permitida.

Para muchos diseños en ingeniería que operan a elevadas temperaturas, la fluencia de los materiales es el factor limitante con respecto a qué tan alta puede ser la temperatura de trabajo.

En la **Figura N°7**, se puede observar la curva típica de fluencia de un metal representa la deformación del metal o aleación en función del tiempo bajo carga y temperatura constantes. La segunda etapa de fluencia (comportamiento lineal) es la de mayor interés para el ingeniero de diseño debido a que en esas condiciones la fluencia es extensa.

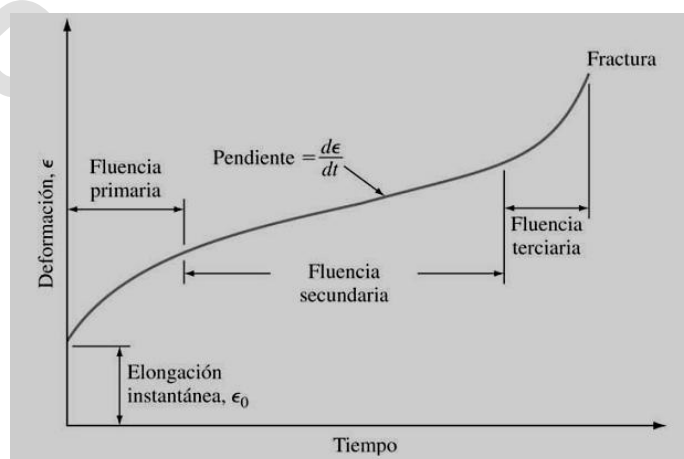


Figura N°7.- Curva típica de fluencia de un metal