

2.7.- PROPIEDADES MECANICAS. ROTURA

2.7.1.- INTRODUCCION .

Muchos materiales, cuando prestan servicio, están sometidos a fuerzas o cargas, ejemplos de ello son las aleaciones de aluminio con las cuales se construyen las alas de los aviones, el acero de los ejes de los automóviles o las vigas y pilares de los edificios. En tales situaciones es necesario conocer las características del material y diseñar la pieza de tal manera que cualquier deformación resultante no sea excesiva y no se produzca la rotura. El comportamiento mecánico o las propiedades mecánicas de un material reflejan la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material (o sea, su deformación). Algunas de las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, la dureza, la ductilidad y la rigidez.

La respuesta de los materiales a las fuerzas aplicadas depende de

- 1.- Tipo de enlace.
- 2.- Disposición estructural de los átomos o moléculas.
- 3.-Tipo y número de imperfecciones, que están siempre presentes en los sólidos, excepto en raras circunstancias.

Así, fijada la sollicitación exterior es evidente que la deformación que se origina y, en consecuencia, la tensión creada en el sólido elástico dependen de las fuerzas de atracción molecular, es decir, de la estructura cristalina del material.

A pesar de la considerable complejidad de los materiales ingenieriles todos los materiales sometidos a cargas se pueden clasificar en tres grupos principales de acuerdo con el mecanismo que ocurre durante su deformación bajo las fuerzas aplicadas

(I).- MATERIALES ELASTICOS (P. e. los cristales iónicos y covalentes).

(II).- MATERIALES ELASTOPLASTICOS (P. e. los metales estructurales).

(III).- MATERIALES VISCOELASTICOS (P. e. los plásticos, los vidrios).

A su vez los tipos básicos de deformación de los materiales como respuesta a las fuerzas aplicadas son tres

- 1.- ELASTICO.
- 2.- PLASTICO.
- 3.- VISCOSO

Para los materiales elásticos, cuando las tensiones no superan el límite de fluencia, la deformación resulta independiente del tiempo, pero si lo sobrepasan, a la deformación elástica se añade una fluencia plástica («yielding») creciente con el tiempo, según se representa en el diagrama deformación - tiempo de la figura 2.7.1.1.a. Además, si no se sobrepasa el límite elástico al dejar de aplicar el esfuerzo la deformación se recupera totalmente: la probeta adquiere las dimensiones originales. Este comportamiento puede verse en la figura 2.7.1.2.b en la que se representa la deformación frente al tiempo correspondiente a la curva carga instantánea tiempo, mostrada en la figura 2.7.1.2.a.

Por el contrario, para el comportamiento totalmente viscoso, la deformación no es instantánea. Es decir, la deformación, como respuesta a un esfuerzo aplicado, depende del tiempo. Además, esta deformación no es reversible y no se recupera nada después de eliminar el esfuerzo. Este fenómeno se ilustra en la figura 2.7.1.2.d.

En un comportamiento viscoelástico intermedio, la aplicación de un esfuerzo (Figura 2.7.1.2.a) origina una deformación instantánea seguida de una deformación viscosa dependiente del tiempo y una deformación elástica retardada en el tiempo (anelasticidad). Este comportamiento se muestra en la figura 2.7.1.2.c. Los materiales viscoelásticos fluyen ya a tensiones muy reducidas, según se representa en el diagrama deformación-tiempo de la figura 2.7.1.1.b, superponiéndose desde el principio las deformaciones elásticas con las viscosas («creep»).

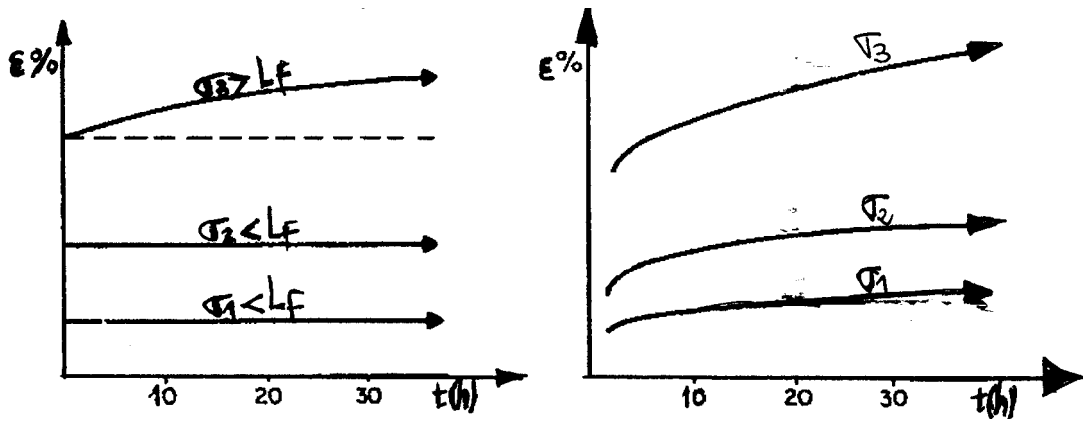


Figura 2.7.1.1.-Diagrama deformación – tiempo : (a).- Material elástico , (b).- Material viscoelástico.

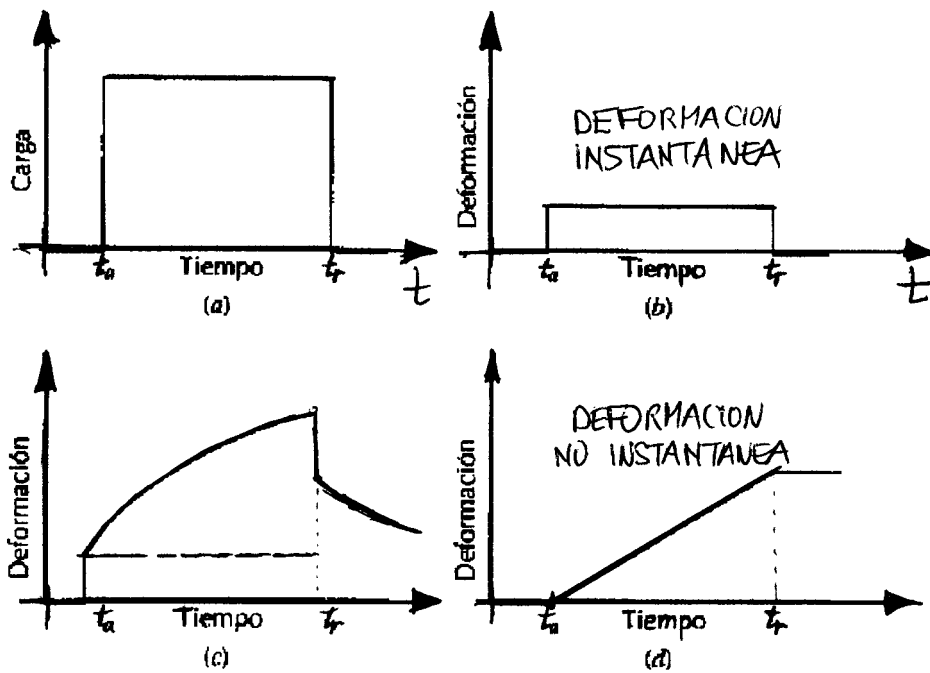


Figura 2.7.1.2.- Fluencia y recuperación de la fluencia.

- (a).-Carga frente al tiempo, donde la carga se aplica instantáneamente en el instante t_a y se elimina en el t_r
 Comportamiento del ciclo carga – tiempo.
 (b) Respuesta deformación – tiempo totalmente elástica (c).- Respuesta viscoelástica (d).- Respuesta viscosa.

Los elementos de un cuerpo tienden a dilatarse o contraerse cuando se calientan o se enfrían respectivamente, y las deformaciones que se presentan se denominan deformaciones unitarias térmicas. Si los elementos se pueden deformar libremente, las deformaciones unitarias térmicas no vienen acompañadas de tensiones, pero si se restringe la deformación aparecen tensiones térmicas.

Las deformaciones unitarias térmicas vienen dadas por:

$$\epsilon_0 = \frac{L - L_0}{L_0} = \alpha \Delta T \quad (2.7.1.1)$$

donde:

- α = Coeficiente de dilatación lineal del material.
- ΔT = Cambio de temperatura.
- L = Dimensión final.
- L_0 = Dimensión inicial.

Asumiendo que la mampostería está totalmente restringida, es decir los elementos no pueden variar sus dimensiones en la magnitud:

$$\Delta L = \epsilon_0 L_0 = \alpha L_0 \Delta T \quad (2.7.1.2)$$

su dimensión final será la misma que la inicial.

La tensión térmica, σ_t , como se muestra en la figura 2.7.1.3, puede calcularse usando la curva tensión-deformación unitaria del material. Asumiendo un modulo de elasticidad igual a E e igual a la tangente a la curva en el punto M (Intersección de la curva con la recta vertical $\epsilon = \epsilon_0$), la tensión térmica viene dada por:

$$\sigma_t = \epsilon_0 E = \alpha E \Delta T \quad (2.7.1.3)$$

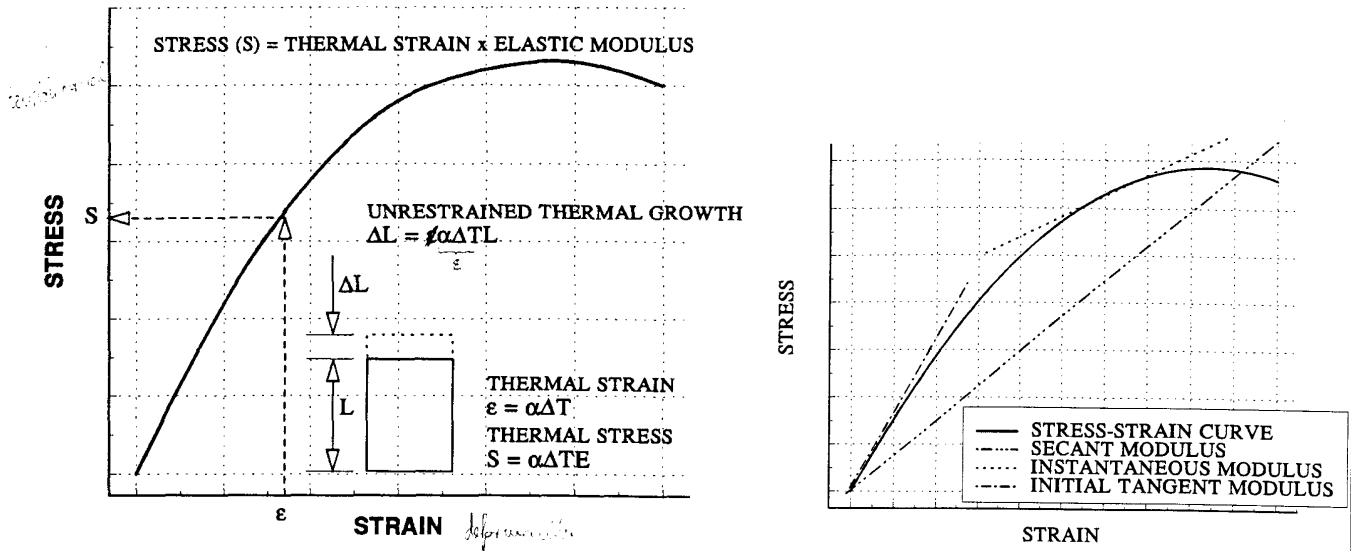


Figura 2.7.1.3.- Carga controlada por la deformación.

Las propiedades mecánicas de los materiales son muy sensibles a las operaciones y proceso de fabricación.

Los ingenieros de materiales y los metalúrgicos, por otro lado, dirigen sus esfuerzos a producir y conformar materiales que puedan soportar las condiciones de servicio predichas por el análisis de tensiones. Esto necesariamente implica un conocimiento de la relación entre la microestructura (es decir, los detalles internos) de los materiales y sus propiedades mecánicas.

2.7.2.- CONCEPTOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN.

Si una fuerza o carga es estática o bien cambia de forma relativamente lenta con el tiempo y es aplicada uniformemente sobre una sección o superficie de una pieza, el comportamiento mecánico del material puede ser estimado mediante un simple ensayo esfuerzo - deformación. Por tanto, para obtener la relación entre tensión y deformación tendremos que proceder necesariamente por vía experimental mediante ensayos realizados en el laboratorio, en donde se comprueba, en efecto, que para dos piezas de distintos materiales, de iguales dimensiones y sometidas al mismo estado de cargas, las deformaciones son distintas.

En los ensayos de compresión y de tracción el esfuerzo, σ , se mide como la fuerza, F, actuando por unidad de área (A), es decir:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.7.2.1)$$

La alteración de la forma o dimensiones de un cuerpo como resultado de las tensiones se denomina deformación. Existen tres principales maneras de aplicar la carga, a saber: tracción, compresión y cizalladura (Figuras 2.7.2.1 a, b,

c). En las aplicaciones de ingeniería, muchas cargas son torsionales más que de cizalladura pura. Este tipo de carga se ilustra en la figura 2.7.2.1.d. Puesto que existen esos tipos principales de tensión darán lugar a deformaciones de tracción, compresión, cizalladura y de torsión.

La deformación por tracción viene dada por :
$$\varepsilon_t = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.7.2.2)$$

y la de compresión:
$$\varepsilon_c = \frac{L_0 - L}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.7.2.3)$$

Los esfuerzos de tracción causan en la pieza una elongación perpendicular a su propia dirección, mientras que los de compresión dan lugar a una contracción.

En los ensayos en que se utiliza simplemente una fuerza de cizalladura tal como se muestra en la figura 2.7.2.1.c, la tensión de cizalladura τ se calcula de acuerdo con:

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (2.7.2.4)$$

donde F es la carga o fuerza impuesta paralelamente a las caras superior e inferior, cada una de las cuales tiene un área A_0 . La deformación de cizalladura γ se define como la tangente del ángulo de deformación θ , tal como se indica en la figura 2.7.2.1.c, y, viene dada por la relación :

$$\gamma_c = \frac{aa'}{ad} = \text{tg } \theta \quad (2.7.2.5)$$

donde el ángulo θ es el resultante del cambio de inclinación de un cierto plano sujeto a una tensión cortante pura, τ , y una línea perpendicular a este. El segmento aa' es el deslizamiento horizontal del lado ab con respecto al lado cd . La tensión cortante es equivalente al estado tensional producido por una tracción en una dirección e igual compresión en la dirección perpendicular.

Las unidades de tensión y deformación de cizalladura son las mismas que las correspondientes de tracción.

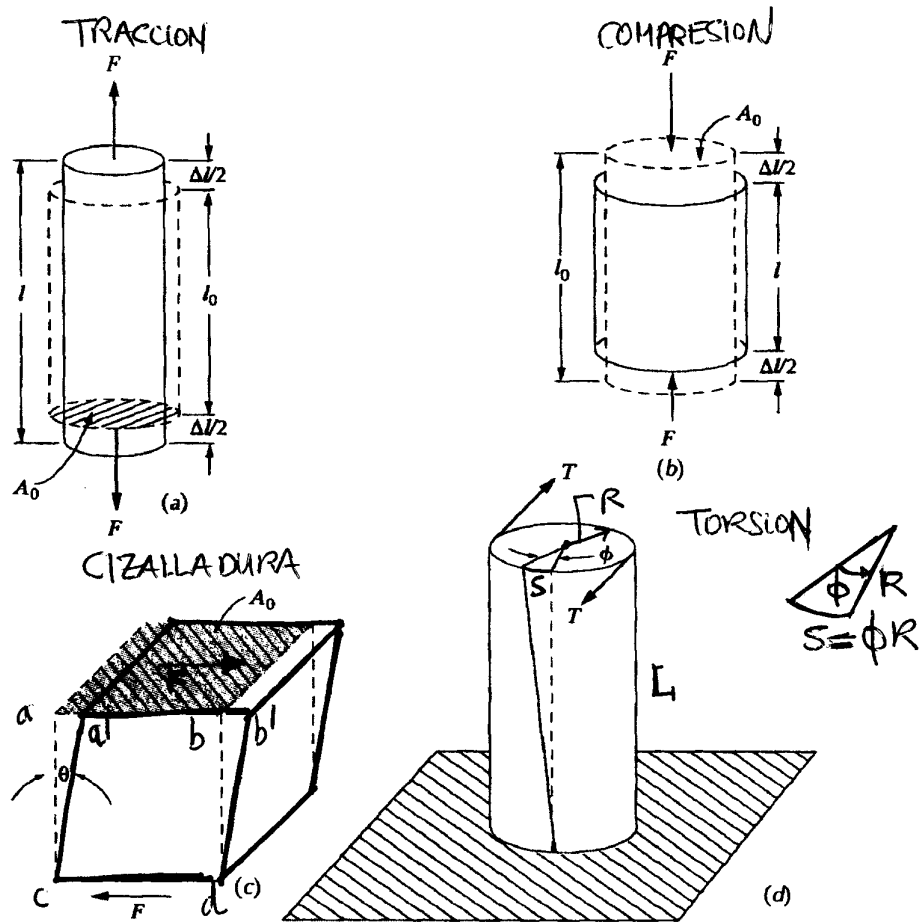
La torsión es una variación de la cizalladura pura, mediante la cual un miembro estructural es deformado de la forma mostrada en la figura 2.7.2.1.d. Las fuerzas de torsión producen un movimiento rotacional alrededor del eje longitudinal de un extremo del miembro respecto al otro extremo. Ejemplos de torsión se encuentran en el caso de ejes de máquinas y ejes impulsores, y también en brocas. Los ensayos de torsión generalmente se realizan sobre cilindros sólidos, o bien sobre tubos. La tensión de cizalladura τ es una función del par aplicado T, es decir $\tau = f(T)$, mientras que la deformación de cizalladura γ está relacionada con el ángulo de giro, Φ de la figura 2.7.2.1.d y viene dada por :

$$\gamma_t = \frac{\Phi R}{L} \quad \left(\Phi = \frac{2ML}{\pi R^4 G} \right), \quad G = \text{Módulo de cizalladura}, \quad M = \text{Momento del par} = TR \quad (2.7.2.6)$$

La tensión y la deformación de cizalladura son proporcionales entre sí según la expresión :

$$\tau = G \gamma \quad (2.7.2.7)$$

donde G es el módulo de cizalladura, o sea, la pendiente de la región elástica de la curva tensión-deformación de cizalladura.



COMMON STATES OF STRESS

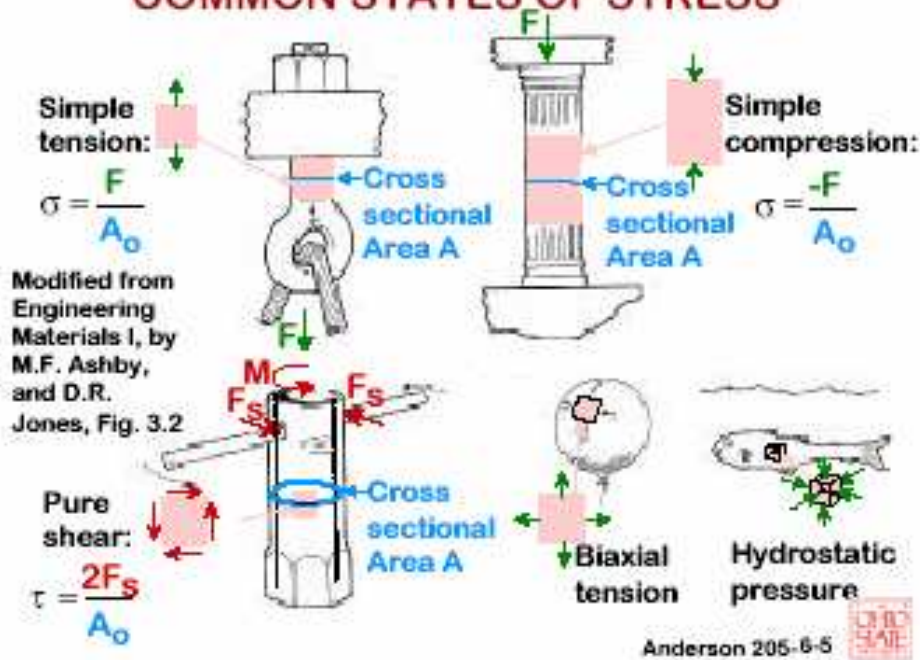


Figura 2.7.2.1.- (a).- Ilustración esquemática de como una carga de tracción produce un alargamiento y una deformación lineal positiva. Las líneas discontinuas representan la forma antes de la deformación y las sólidas, después de la deformación. (b).- Ilustración esquemática de como una carga de compresión produce una contracción y una deformación lineal negativa. (c).- Representación esquemática de la deformación de cizalladura, y, donde $\gamma = \text{tg}(\theta)$ (d).- Representación esquemática de una deformación torsional (o sea, ángulo de giro Φ) producido por un par aplicado T.

Cuando sobre un metal se aplica una tracción, se produce un alargamiento elástico y una deformación ϵ_z en la dirección de la carga aplicada (la cual se tomará arbitrariamente como la dirección z), tal como se indica en la figura 2.7.2.2. Como resultado de este alargamiento, se producirán contracciones en la direcciones laterales (x e y) perpendiculares a la dirección de la aplicación de la tensión. A partir de dichas contracciones, se pueden determinar las deformaciones de compresión ϵ_x y ϵ_y . Se define un parámetro denominado coeficiente de Poisson como el cociente entre las deformaciones laterales y axiales, o sea,

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (2.7.2.8)$$

El signo negativo se incluye en la expresión para que ν sea siempre positivo, puesto que ϵ_x y ϵ_y siempre son de signo opuesto a ϵ_z . Teóricamente el coeficiente de Poisson para sólidos isotrópicos debería ser 0.25. Además, el máximo valor de ν (o bien el valor para el cual no hay cambio neto de volumen) es 0.50. Muchos metales y aleaciones tienen valores del coeficiente de Poisson comprendido entre 0.25 y 0.35

El módulo de cizalladura y el módulo elástico están relacionados entre sí y con el módulo de Poisson mediante la relación:

$$E = 2 G (1 + \nu) \quad (2.7.2.9)$$

En muchos metales G tiene un valor igual a 0.4 E. Por consiguiente, cuando un módulo es conocido los otros pueden ser calculados de forma aproximada.

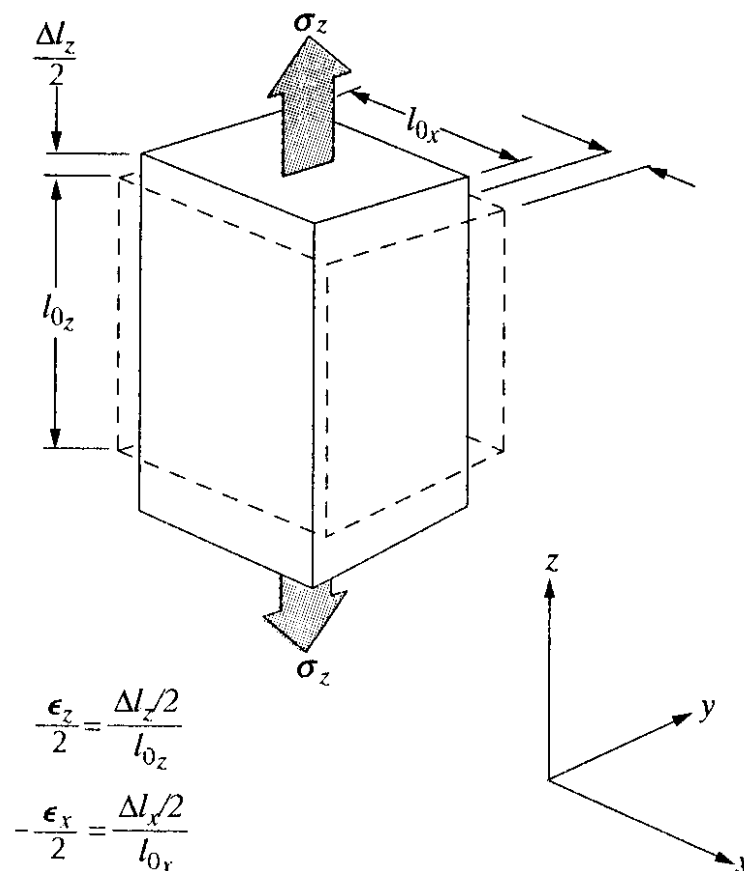


Figura 2.7.2.2.- Alargamiento axial (z) (deformación positiva) y contracciones laterales (x e y) en respuesta a una tracción aplicada. Las líneas continuas representan las dimensiones después de aplicación de la carga y las discontinuas, antes.

2.7.3.- CURVAS TENSION - DEFORMACION.

Las curvas tensión - deformación , usualmente, se obtienen mediante ensayos de laboratorio realizados mediante normas estandarizadas y utilizando probetas también estandarizadas. Se fijan la velocidad de carga y la temperatura.

Los ensayos se pueden realizar con cargas de compresión, tracción, flexión y cortadura, que a su vez pueden ser estáticas o dinámicas. Los ensayos de compresión, tracción y flexión con cargas estáticas son los que mas se suelen realizar.

Los ensayos de TRACCION se realizan con los MATERIALES DUCTILES con un cierto grado de plasticidad, tales como los materiales metálicos ferrosos y no ferrosos, plásticos, gomas, fibras, etc.

Los ensayos de COMPRESION Y FLEXION se realizan con los MATERIALES FRAGILES, tales como los materiales refractarios, el hormigón, cerámicos, etc. Estos materiales poseen una baja resistencia a la tracción en comparación con la de compresión.

En [la figura 2.7.3.1](#), puede verse la forma general de la curva tensión - deformación de un material dúctil y la de un material frágil. Se puede observar que los materiales dúctiles rompen después de experimentar una deformación apreciable, mientras que los materiales frágiles rompen después de pequeñas deformaciones. En [la figura 2.7.3.2](#) se muestra la curva tensión – deformación del acero y en [la figura 2.7.3.3](#) la de un material refractario con un 70 % de Al_2O_3 en función de la temperatura y ensayado a compresión.

Las curvas tensión - deformación nos permiten determinar las principales características mecánicas de los materiales, Así, se pueden estimar una serie de importantes propiedades tales como :

- 1.- RESISTENCIA.
- 2.- RIGIDEZ
- 3.- DUCTILIDAD.
- 4.- RESILIENCIA.
- 5.- TENACIDAD.

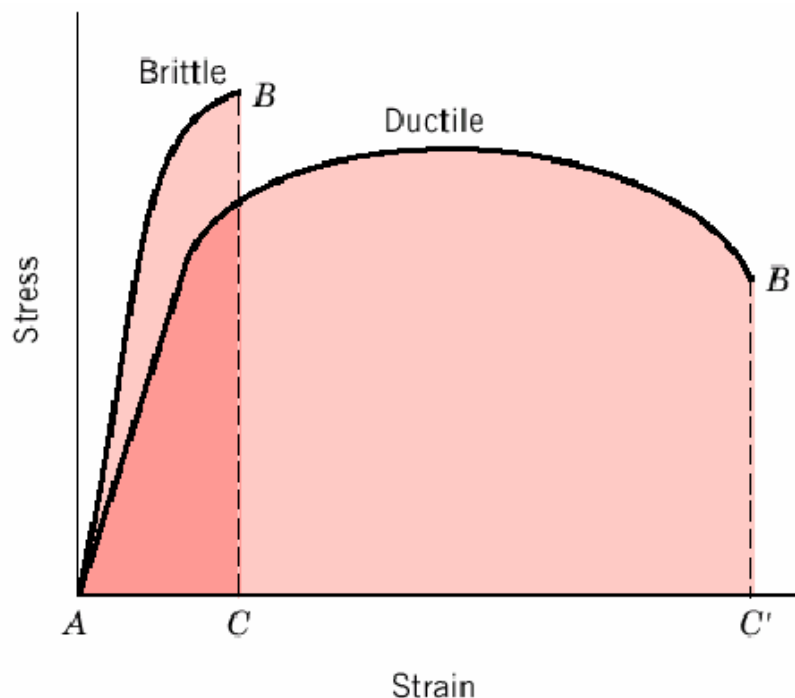


Figura 2.7.3.1.- Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura.

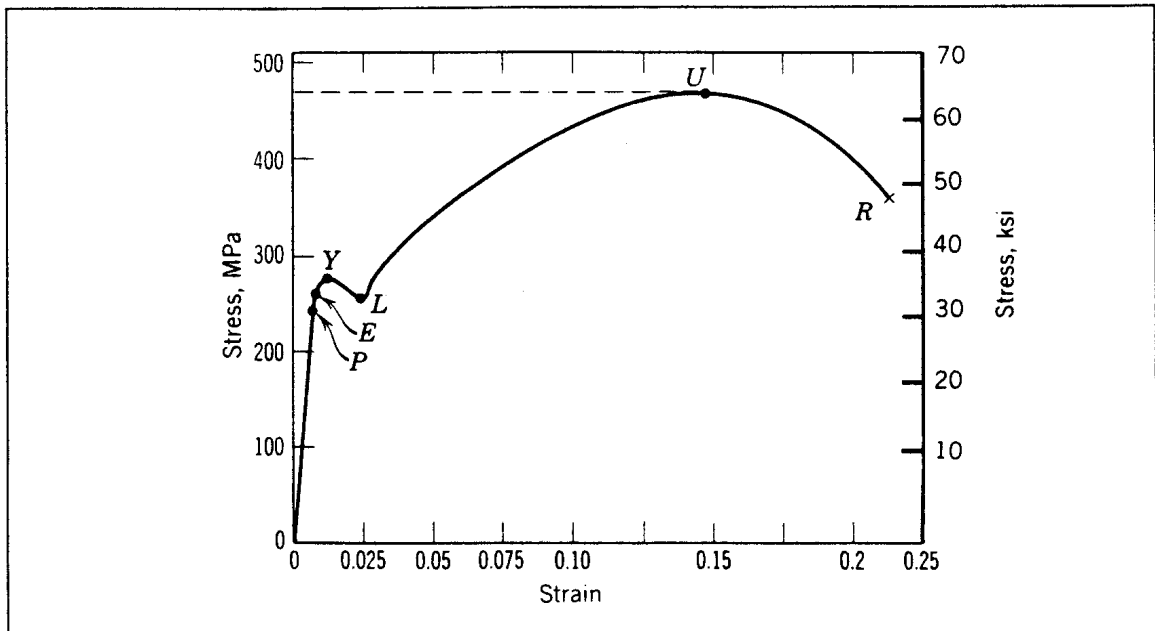


FIGURE 7-42 Stress-strain diagram for mild steel in tension.

Figura 2.7.3.2.- Diagrama tensión - deformación de un acero sometido a tracción.

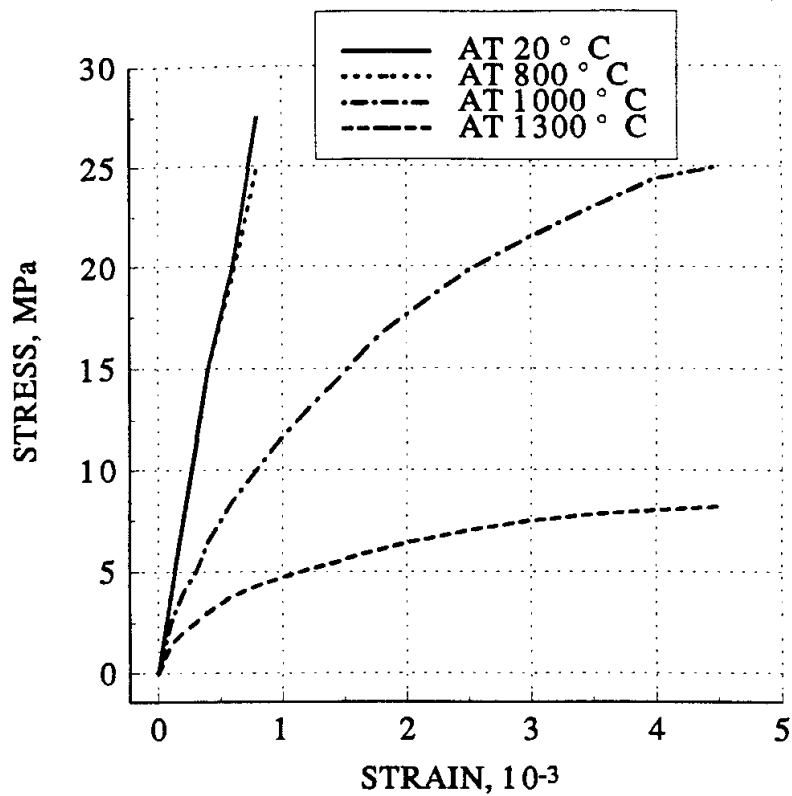


FIGURE 3.1 STATIC COMPRESSIVE STRESS-STRAIN DATA FOR 70% ALUMINA BRICK

Figura 2.7.3.3.- Diagrama tensión - deformación de un material refractario con un 70 % de Al_2O_3 en función de la temperatura y ensayado a compresión.

La curva tensión – deformación del ensayo de tracción de un material dúctil presenta una serie de puntos, que determinan a su vez una serie de zonas, (Figura 2.7.3.4) cuya denominación es:

P = Límite de proporcionalidad.

E = Límite elástico . Cuando al material se le somete a una tensión menor o igual a la correspondiente a dicho punto, al liberar al material de la carga no se presenta deformación permanente (El material retorna a su tamaño original). Para los materiales dúctiles el límite elástico (E) y el límite de proporcionalidad (P) están muy próximos y puede considerarse que tiene el mismo valor.

El punto E determina la zona elástica, OE, que se puede dividir en dos : la zona de elasticidad proporcional, OP, y la no proporcional, (PE). En la zona proporcional se cumple la Ley de HOOKE, en la que los alargamientos son proporcionales a los esfuerzos, es decir:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.7.3.1)$$

donde E es el denominado módulo de Young o de elasticidad y es la pendiente del segmento lineal de la curva tensión – deformación (Figura 2.7.3.5).

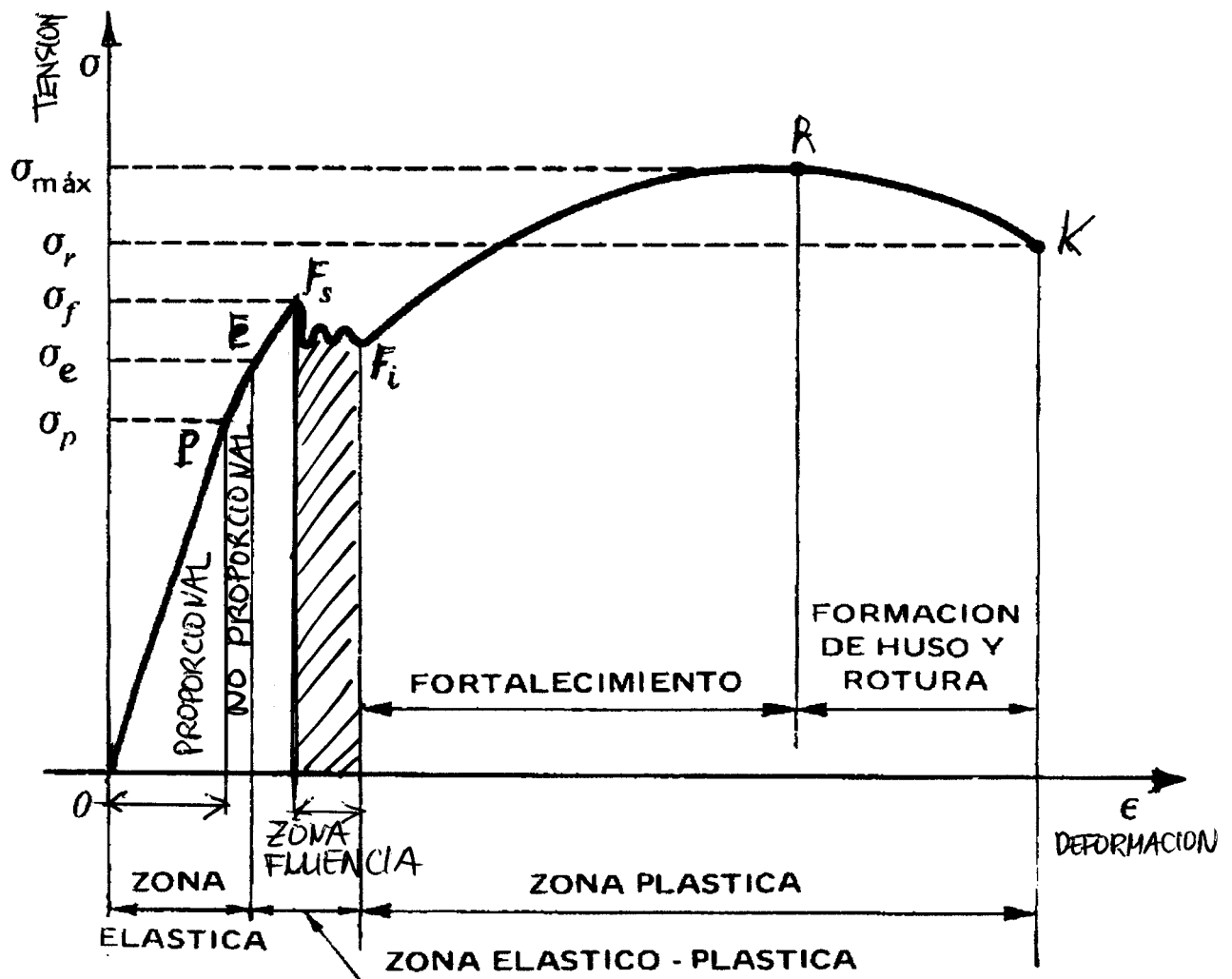


Figura 2.7.3.4.- Diagrama básico tensión –deformación del ensayo de tracción de un material dúctil.

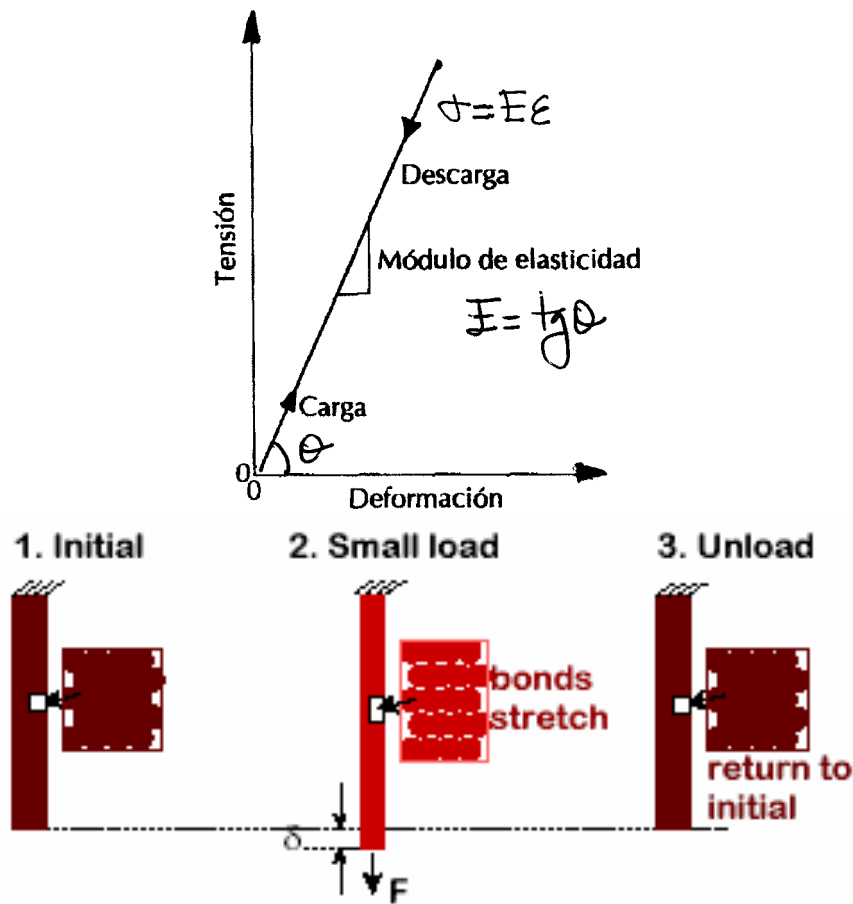


Figura 2.7.3.5.- Diagrama esquemático tensión-deformación con deformación elástica lineal para ciclos de carga-descarga.

El módulo de elasticidad de un material nos define la mayor o menor capacidad de un material de deformarse bajo tensiones y puede ser interpretado como la RIGIDEZ del material, es decir, su resistencia a la deformación elástica, de tal modo que cuanto mayor es el módulo más rígido es el material, o sea, menor es la deformación elástica que se origina cuando se aplica una determinada tensión σ .

A escala atómica la deformación elástica macroscópica se manifiesta como pequeños cambios en el espaciado intraatómico y así los enlaces entre átomos son estirados. Por tanto, la magnitud del módulo de elasticidad es una medida de la resistencia a la separación de los átomos contiguos. Esto depende de dos factores, que son especialmente importantes:

- Las fuerzas de enlace intraatómicas, que mantienen unidos a los átomos actuando como pequeños muelles (Figura 2.7.3.6). Existen enlaces primarios (IONICO, COVALENTE Y METALICO), que son todos relativamente fuertes y dan puntos de fusión entre 750 y 4750 °C y enlaces secundarios (VAN DER WAALS Y PUENTES DE HIDROGENO), que son relativamente débiles y dan puntos de fusión entre -150 y 250 °C.

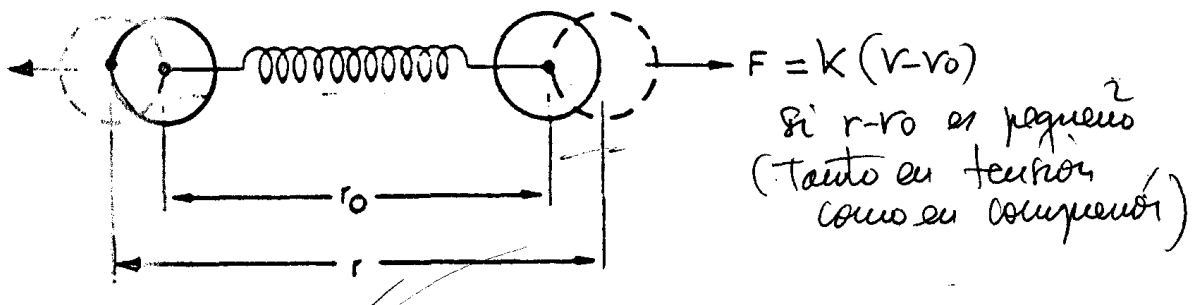


Figura 2.7.3.6.- Simulación del enlace entre dos átomos

La figura 2.7.3.7 muestra las curvas fuerza-separación tanto para materiales que tienen enlaces fuertes como para materiales con enlaces débiles. La pendiente en r_0 se indica en cada caso. Los metales y los cerámicos poseen enlaces primarios (Covalente e iónico en los cerámicos y metálico y covalente en los metales), mientras que los polímeros poseen enlaces secundarios.

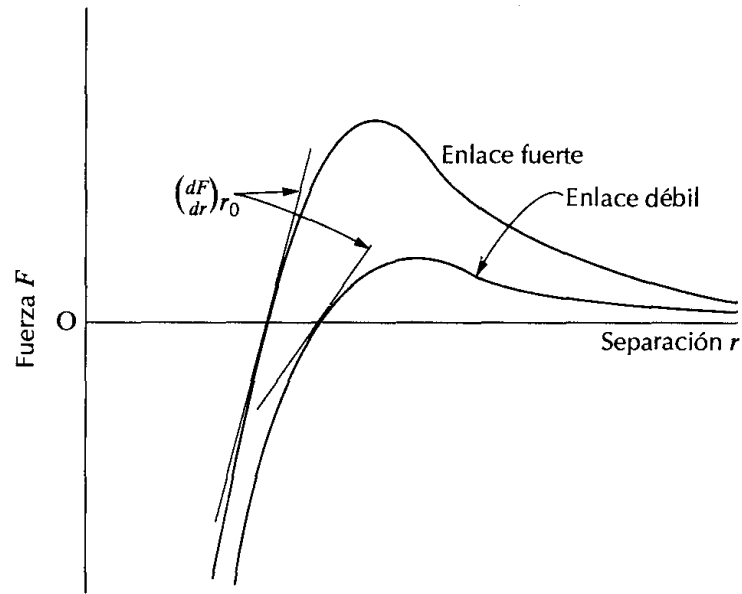


Figura 2.7.3.7.- Fuerza frente a la separación interatómica para átomos unidos débilmente y para tomos unidos fuertemente. La magnitud del modulo de elasticidad es proporcional a la pendiente de cada curva en la separación de equilibrio r_0 .

- El empaquetamiento atómico, que determina cuantos pequeños muelles hay por unidad de área y el ángulo en que ellos son estirados (Figura 2.7.3.8). El empaquetamiento esta fuertemente influenciado por el tipo de enlace.

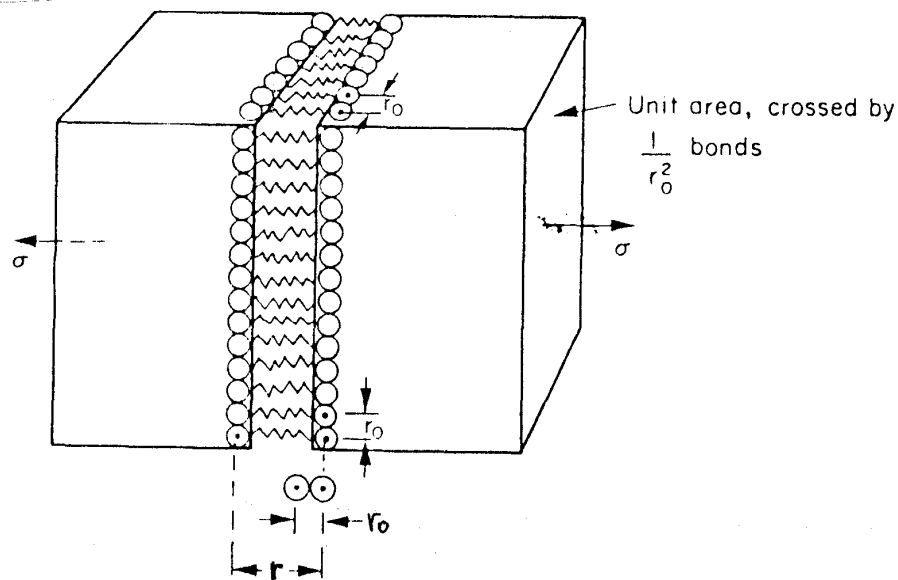


Figura 2.7.3.8.- Número de enlaces por unidad de área

Los valores del modulo de elasticidad de los materiales cerámicos, entre ellos los refractarios, en general, son mayores que los valores de los metales. Para los polímeros son menores. Esas diferencias son una consecuencia directa de los distintos tipos de enlace en los tres tipos de materiales.

Sobrepasando el punto E se entra en la zona elástico – plástica (EF_i), en la cual en el caso de cesar la fuerza se observarían deformaciones permanentes, lo que imposibilita que el material vuelva a recuperar las condiciones iniciales. Llegado a este punto, se pueden observar unas líneas que forman 45° con el eje de la probeta llamadas líneas de Lüders y que son producidas por las tensiones tangenciales cuyos valores máximos, corresponden a esas direcciones y originan un desplazamiento relativo de las redes cristalinas de moléculas del material.

Pertencientes a dicha zona tenemos los puntos :

F_s = Límite de fluencia superior.

F_i = Límite de fluencia inferior.

Hasta el punto F_s los alargamientos son pequeños pero al llegar a el aumentan considerablemente sin necesidad de aumentar la fuerza F . Para cierto tipo de materiales la fuerza disminuye hasta el valor determinado por el punto F_i . En el límite de fluencia superior, la deformación plástica se inicia con una disminución de la tensión. La deformación prosigue bajo una tensión que fluctúa ligeramente alrededor de un valor constante, correspondiente al punto de fluencia inferior.

Dentro de esta zona se puede distinguir la zona de fluencia, $F_s F_i$, donde las deformaciones crecen rápidamente sin apenas aumentar la carga. Las importantes deformaciones que tienen lugar en la zona de fluencia, producen a partir del punto F_i un aumento de resistencia del material que se conoce como ACRITUD.

Alcanzado el límite de fluencia inferior vuelve a ser necesario aumentar la carga durante el periodo de fortalecimiento y la curva es creciente hasta un valor máximo dado por el punto R :

R = Punto correspondiente a la máxima tensión o tensión de rotura

cuya tensión correspondiente se llama resistencia de rotura. La rotura propiamente dicha no se produce en el punto R, sino después de un periodo durante el cual la probeta se estira rápidamente, reduciéndose sensiblemente su sección hasta que se produce la rotura bajo un esfuerzo menor que la tensión de rotura (R) y que corresponde al punto K (tensión última). La deformación plástica, que se reparte en un principio a lo largo de toda la probeta, se concentra en una zona originando la estricción, el esfuerzo disminuye y la probeta se rompe.

La zona delimitada por los puntos F_i y K es la zona plástica, en la que también se puede distinguir dos zonas: la zona de fortalecimiento (ACRITUD) definida por los puntos F_i y R y la zona de formación de huso y rotura (RK).

La estricción es la disminución de la sección en la fractura de una probeta rota por alargamiento. Se expresa en porcentajes, según la siguiente expresión:

$$Z(\%) = \frac{S_o - S_f}{S_o} 100 = \frac{D_o^2 - D_f^2}{D_o^2} 100 \quad (2.7.3.2)$$

donde S_o es la sección inicial y S_f la sección de rotura.

Desde un punto de vista atómico, la deformación plástica corresponde a la rotura de los enlaces entre los átomos vecinos más próximos y a la reformación de éstos con nuevos vecinos, ya que un gran número de átomos o moléculas se mueven unos respecto a otros. Al eliminar la tensión no vuelven a sus posiciones originales. El mecanismo de esta deformación es diferente para materiales cristalinos y amorfos. En los materiales cristalinos, la deformación tiene lugar mediante un proceso denominado deslizamiento, en el cual está involucrado el movimiento de dislocaciones (Figura 2.7.3.9). La deformación plástica en los sólidos no cristalinos (así como en los líquidos) ocurre por un mecanismo de flujo viscoso.

PLASTIC DEFORMATION (METALS)

(at lower temperatures: $T < T_{\text{melt}}/3$)

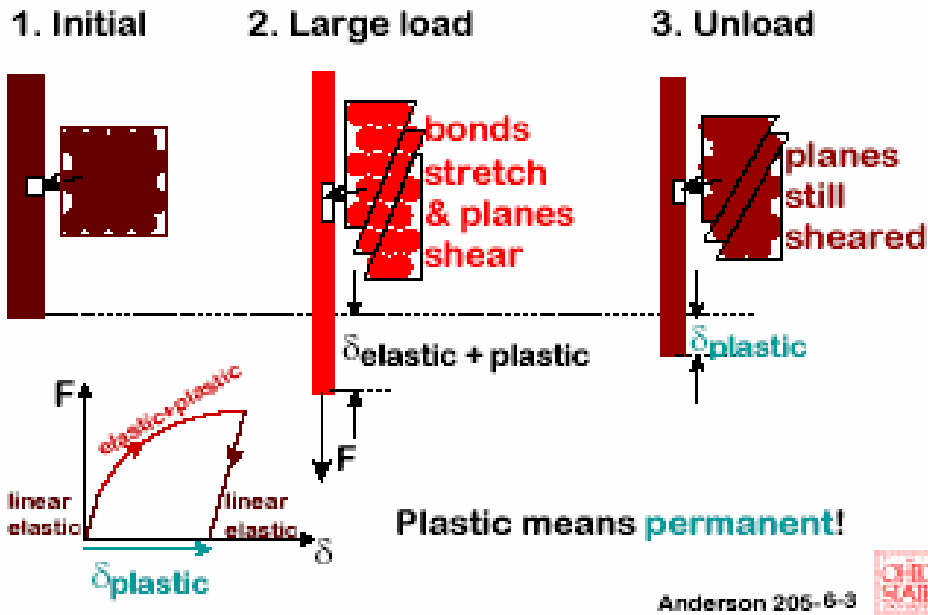


Figura 2.7.3.9.- Mecanismo de deformación plástica.

Existen algunos materiales (por ejemplo, fundición gris y hormigón) para los cuales la porción elástica inicial del diagrama tensión-deformación no es lineal (Figura 2.7.3.10). Por tanto, no es posible determinar el módulo de elasticidad tal como ha sido descrito anteriormente. Cuando se produce este tipo de comportamiento no lineal, se utiliza el módulo tangente o bien el módulo secante. El módulo tangente se toma como la pendiente de la curva tensión - deformación a algún determinado nivel de la tensión, mientras que el módulo secante representa la pendiente de una secante trazada desde el origen hasta algún punto determinado de la curva $\sigma - \epsilon$. La determinación de estos módulos se ilustra en la figura 2.7.3.10.

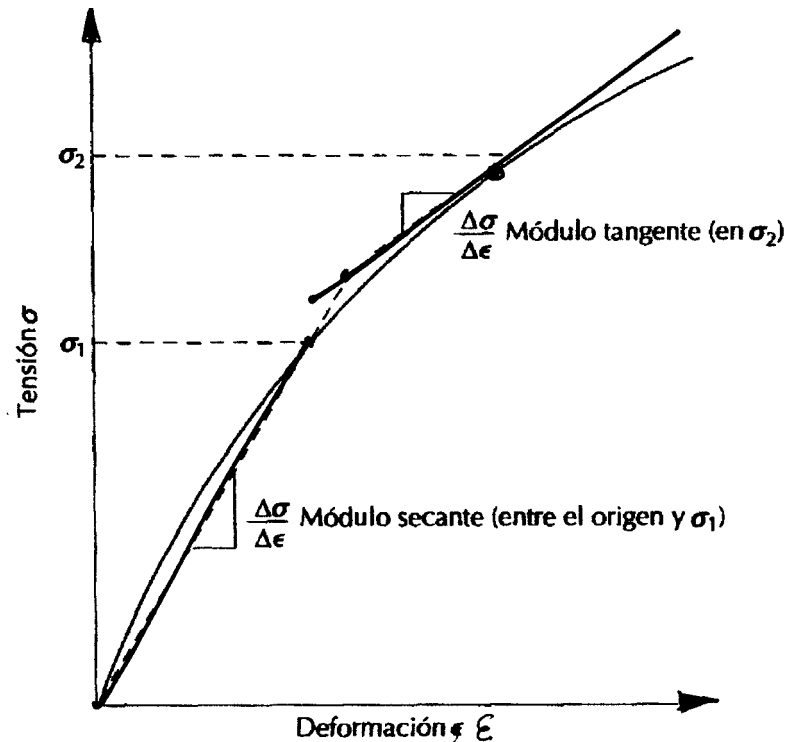


Figura 2.7.3.10.- Diagrama esquemático tensión-deformación mostrando comportamiento elástico no lineal, y como se determinan los módulos secante y tangente.

La mayoría de las estructuras se diseñan de tal manera que solamente ocurra deformación elástica cuando sean sometidas a tensiones. Por consiguiente, es deseable conocer el nivel de tensiones para el cual empieza la deformación plástica, o sea, cuando ocurre el fenómeno de fluencia. En muchos casos, la posición del punto que nos indica el comienzo de tal deformación no puede ser determinada con precisión. Por este motivo se ha establecido una convención por la cual se traza una línea recta paralela a la línea elástica proporcional del diagrama tensión - deformación desplazada por una determinada deformación, usualmente 0.002.

La tensión correspondiente a la intersección de esta línea con el diagrama tensión-deformación cuando éste se curva se denomina límite elástico, σ_y (Se utiliza la palabra "límite elástico" para la propiedad del metal que en inglés se denomina "yield strength") . Esto se muestra en la figura 2.7. 3.11.a.

Para aquellos materiales que tienen una región elástica no lineal (Figura 2.7.3.10), la utilización del método anterior no es posible, y la práctica usual es definir el límite elástico como la tensión necesaria para producir una determinada deformación (por ejemplo $\epsilon = 0.005$).

Algunos aceros y otros materiales exhiben el tipo de diagrama tensión - deformación mostrado en la figura 2.7.3.11.b. La transición elasto - plástica está muy bien definida y ocurre de forma abrupta y se denomina fenómeno de discontinuidad del punto de fluencia. En los metales en que ocurre este fenómeno, el límite elástico se toma como el promedio de la tensión asociada con el límite de fluencia inferior, ya que está bien definido y es poco sensible al procedimiento seguido en el ensayo.

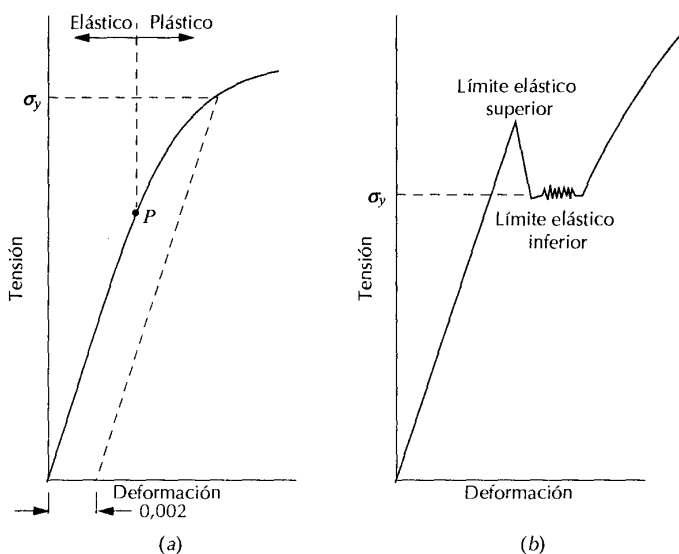


Figura 2.7. 3.11.- (a).- Curva de tracción típica de un metal que muestra las deformaciones elástica y plástica, el limite proporcional P y el limite elástico σ_y , determinado como la tensión para una deformación plástica del 0.002 (b).- Curva de tracción típica de algunos aceros que presentan el fenómeno de la discontinuidad de la fluencia.

Sin embargo el tomar el límite de fluencia inferior como límite de elasticidad puede traer consigo que se pueda romper el material sin necesidad de llegar a la tensión de rotura. En efecto, si se hace desaparecer la carga F cuando la tensión σ_1 pertenece a la zona elástico - plástica, queda una deformación permanente ϵ_A (Figura 2.7.3.12.a.).

Si aplicamos nuevamente un esfuerzo hasta conseguir la misma tensión anterior σ_1 , se observa que el alargamiento ϵ_2 es considerablemente superior al ϵ_1 , y las cosas ocurren como se indica en la figura 2.7.3.12 .b. Si cesa la fuerza causante de la deformación se mantiene una deformación permanente ϵ_B que, como se ve, es notoriamente mayor que ϵ_A .

Al hacer el proceso reiterativo vemos que en una de las operaciones de someter a la probeta a la tensión σ_1 ,se rompe sin llegar a este valor. Se deduce que sin necesidad de aplicar una tensión que llegue a σ_1 , ni aun que pertenezca a la zona plástica, se puede conseguir la rotura de un material por aplicaciones sucesivas de un esfuerzo

que produzca simplemente una pequeña deformación permanente. Es por esta causa que las tensiones admisibles deben pertenecer a la zona de elasticidad proporcional en la que no existen deformaciones permanentes.

Lógicamente el valor máximo admisible debería ser la σ_e , límite de elasticidad, pero al ser difícil de determinar la frontera entre la zona plástica y la elástico-plástica, en la práctica se toma como tensión admisible el cociente entre la tensión de rotura y un número entero n que varía según el material de que se trate y llamado coeficiente de seguridad, es decir :

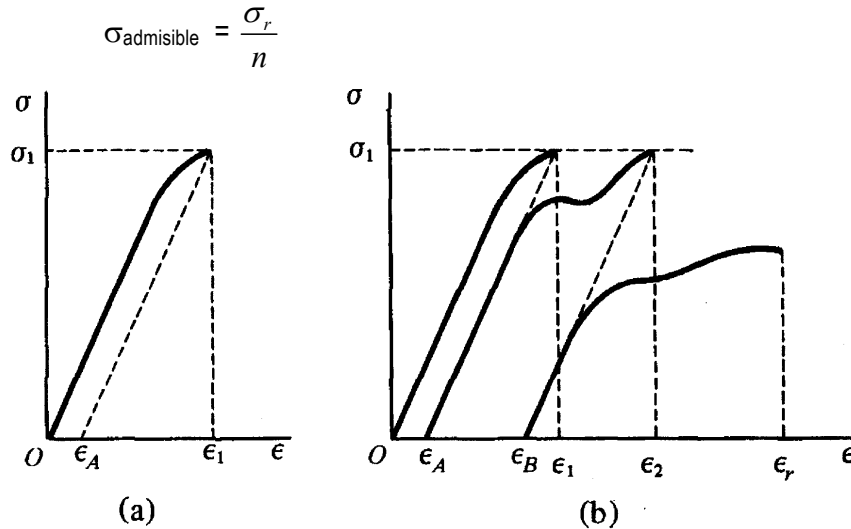


Figura 2.7.3.12.- Proceso reiterativo de aplicación de una carga sobre un material .

Otras propiedades de los materiales.

Ductilidad .

Es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada por el material hasta la fractura. Un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica se denomina frágil. El diagrama tensión-deformación para materiales dúctiles y para materiales frágiles se ilustran esquemáticamente en la figura 2.7.3.13.

La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como alargamiento relativo porcentual, o bien mediante el porcentaje de reducción de área. El alargamiento relativo porcentual a rotura, % EL, es el porcentaje de deformación plástica a rotura, o bien:

$$\% \text{ EL} = \frac{L_f - L_o}{L_o} 100 = 100\epsilon_f \quad (2.7.3.3)$$

donde L_f es la longitud en el momento de la fractura y L_o es la longitud de la probeta original. Siempre que una parte significativa de la deformación plástica a la rotura esté confinada en la región de la estricción, la magnitud de % EL dependerá de la longitud de prueba de la probeta. Cuanto más corta sea L_o , mayor será la fracción del alargamiento total que proviene de la estricción, y, por consiguiente mayor será el valor de % EL. Por tanto, se debe especificar el valor de L_o cuando se menciona el alargamiento relativo, el cual se suele tomar igual a 50 mm.

El porcentaje de reducción de área % AR se define como:

$$\% \text{ AR} = \frac{A_o - A_f}{A_o} 100 \quad (2.7.3.4)$$

donde A_o es el área de la sección inicial y A_f es el área de la sección en el momento de la fractura (Tanto L_f como A_f se miden después de la rotura, volviéndose a colocar juntas las dos piezas resultantes). Para un determinado material los valores de % EL y % AR son en general diferentes. La mayoría de los metales tienen por lo menos un pequeño grado de ductilidad a temperatura ambiente. Sin embargo, algunos se hacen frágiles a medida que la temperatura disminuye.

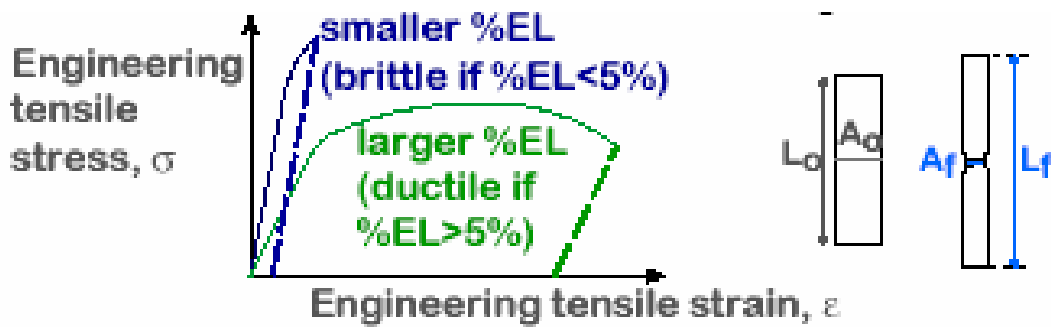


Figura 2.7.3.13.- Diagramas de un material frágil y dúctil.

El conocimiento de la ductilidad de un material es importante por lo menos por dos razones. En primer lugar, indica al diseñador el grado en que una estructura podrá deformarse antes de producirse la rotura. En segundo lugar, especifica el grado de deformación que puede permitirse durante las operaciones de conformación. A menudo se dice que los materiales relativamente dúctiles son "indulgentes", en el sentido de que cualquier error en el cálculo de la tensión de diseño lo ponen de manifiesto deformándose antes de producirse la fractura.

Como materiales frágiles pueden considerarse aquellos que tienen una deformación a la fractura menor que aproximadamente el 5%.

Resiliencia .

La resiliencia es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de cederla cuando se deja de aplicar la carga. La propiedad asociada se denomina módulo de resiliencia, U_R , que es la energía de deformación por unidad de volumen que se requiere para deformar un material hasta el límite elástico.

En el caso de disponer de la curva tensión-deformación, el módulo de resiliencia de una probeta sometida a una carga uniaxial es justamente el área encerrada por dicha curva hasta la fluencia, el eje $O\varepsilon$ y la recta vertical correspondiente al límite elásticos (Figura 2.7.3.14), o bien

$$U_R = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma d\varepsilon$$

Suponiendo que la región es elástica lineal ($\sigma = E\varepsilon$) se tiene:

$$U_R = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y \quad (\text{Área del triángulo})$$

en donde ε_y es la deformación en el límite elástico.

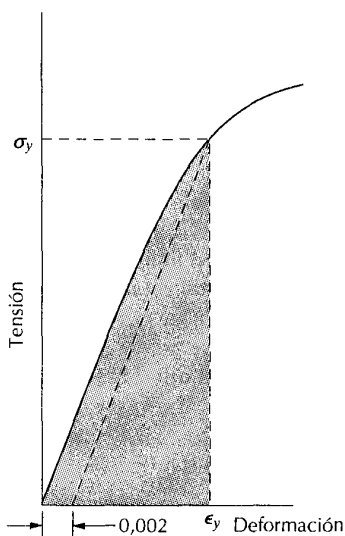


Figura 2.7.3.14.- Esquema donde se indica como se obtiene el módulo de resiliencia (correspondiente al área sombreada) a partir de la curva de tracción.

Las unidades de resiliencia son el producto de las unidades de los ejes del diagrama tensión - deformación. En el Sistema Internacional es joules por metro cúbico (J/m^3 , o de forma equivalente Pa). Los joules son unidades de energía, y por tanto el área bajo la curva tensión - deformación representa absorción de energía por unidad de volumen de material.

La incorporación de la ecuación $\sigma = E\varepsilon$ da lugar a la expresión :

$$U_R = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y = \frac{1}{2} \sigma_y \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) = \frac{\sigma_y^2}{2E} \quad (2.7.3.5)$$

Por consiguiente, los materiales resilientes son aquellos que tienen un límite elástico muy alto y un módulo de elasticidad muy bajo. Tales materiales podrían utilizarse en aplicaciones para muelles.

Tenacidad .

La tenacidad es una medida de la capacidad de un material de absorber energía, durante la deformación plástica, antes de la fractura. La geometría de la probeta así como la manera con que se aplica la carga son importantes en la determinación de la tenacidad. En el caso de condiciones de carga dinámicas (alta velocidad de deformación) y cuando está presente una entalla (o sea un concentrador de tensiones), la tenacidad a la entalla es evaluada utilizando ensayos de impacto. Además, la tenacidad de fractura es una propiedad que nos indica la resistencia a la fractura de un material cuando existe una grieta.

En el caso de la situación estática (baja velocidad de deformación), la tenacidad puede ser evaluada a partir de los resultados del ensayo de tracción. Es el área bajo la curva $\sigma - \varepsilon$ hasta la fractura. Esta propiedad específica se denomina módulo de tenacidad, T, y es la máxima cantidad de energía por unidad de volumen que puede absorber el material sin fracturarse. Las unidades de tenacidad son las mismas que las de resiliencia (o sea, energía por unidad de volumen de material).

Para que un material sea tenaz, debe poseer alta resistencia y ductilidad y, a menudo, los materiales dúctiles son más tenaces que los frágiles. Esto se ve en la figura 2.7.3.1, en la cual están representadas las curvas tensión - deformación para ambos tipos de materiales. Se puede observar que, aun cuando los materiales frágiles tienen mayor límite elástico, tienen menor tenacidad que los dúctiles a causa de la falta de ductilidad. Esto se puede deducir comparando las áreas ABC y AB'C' de la figura 2.7.3.1.

En el caso de que no se disponga de la curva anterior el módulo de tenacidad, T, se puede calcular del siguiente modo (Figura 2.7.3.15):

$$T = \frac{1}{2} (\sigma_y + \sigma_u) \varepsilon_f \quad (2.7.3.6)$$

Para materiales que poseen una curva tensión - deformación de forma parabólica, tales como el hormigón y la fundición gris, el módulo de tenacidad puede calcularse mediante la siguiente expresión :

$$T = \frac{2}{3} (\sigma_u \varepsilon_f) \quad (2.7.3.7)$$

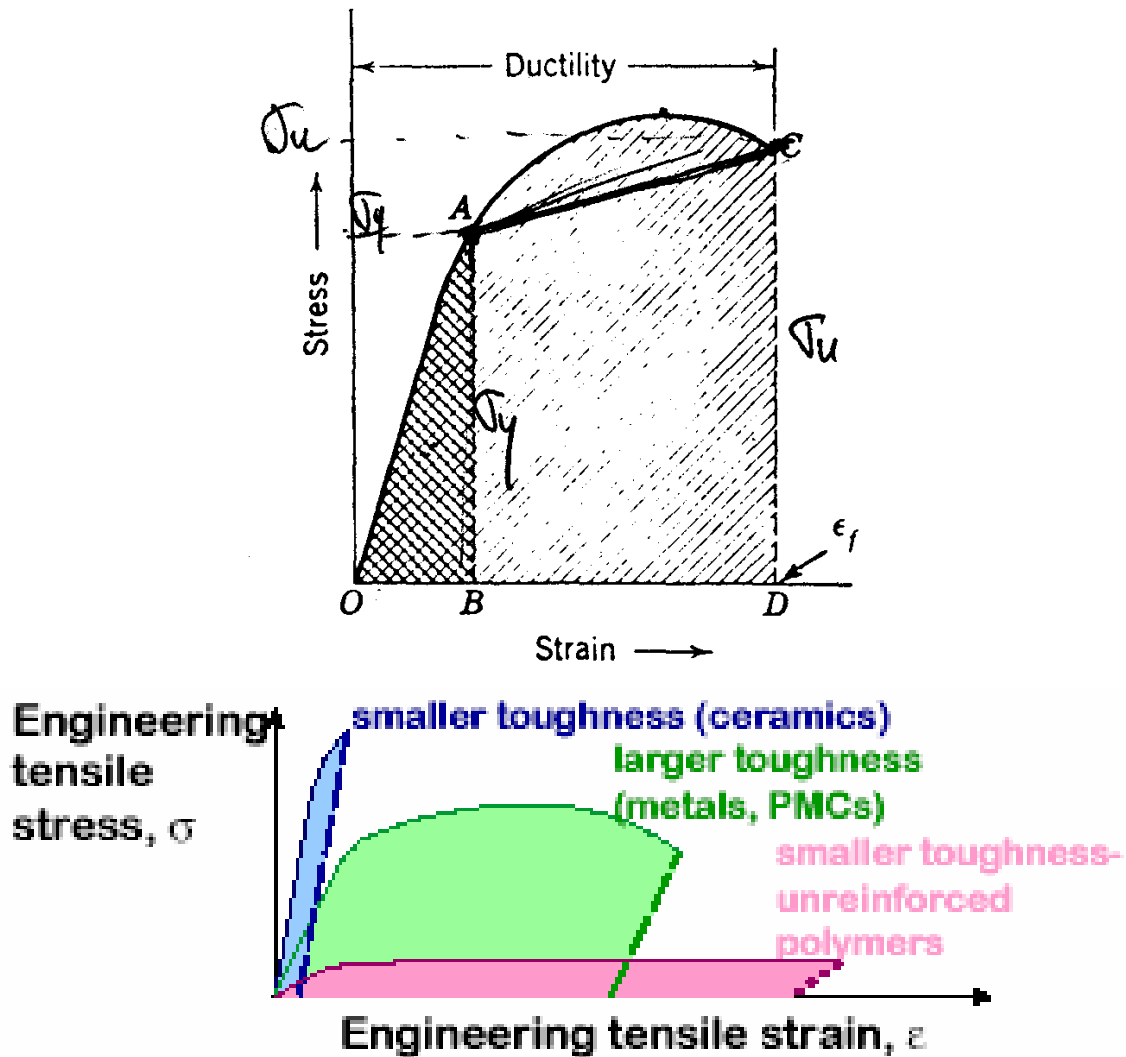


Figura 2.7.3.15 .- (a).-Representación diagramática de la ductilidad, tenacidad y resiliencia. El área OACD es una medida de la tenacidad y el área OAB de la resiliencia. (b).-Tenacidad de los distintos tipos de materiales.

2.7.4.- DUREZA.

2.7.4.1.- Introducción.

Otra propiedad mecánica importante es la dureza, la cual es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada (por ejemplo, una pequeña abolladura o rayadura). Los primeros ensayos de dureza se basaban en el comportamiento de los minerales junto con una escala construida según la capacidad de un material para rayar a otro más blando. Un método cualitativo de ordenar de forma arbitraria se basa en la escala de Mohs ([Tabla 2.7.4.1.1](#))

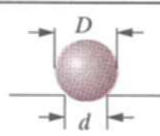
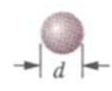
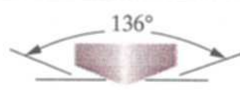

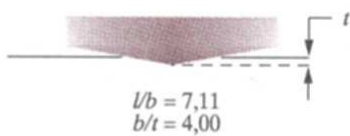
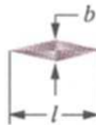
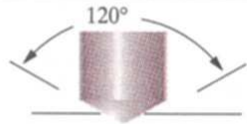

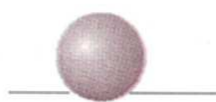

A lo largo de los años se han ido desarrollando técnicas cuantitativas de dureza que se basan en un pequeño penetrador que es forzado sobre una superficie del material a ensayar en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga. En estos ensayos se mide la profundidad o tamaño de la huella resultante, lo cual se relaciona con un número de dureza. Cuanto más blando es el material, mayor y más profunda es la huella, y menor es el número de dureza. Las durezas medidas tienen solamente un significado relativo (y no absoluto), y es necesario tener precaución al comparar durezas obtenidas por técnicas distintas.

Tabla 2.7.4.1.1.- Escala de dureza de MOHS

Dureza	Mineral	Comparación
1	Talco	La uña lo raya con facilidad
2	Yeso	La uña lo raya
3	Calcita	La punta de un cuchillo lo raya con facilidad
4	Fluorita	La punta de un cuchillo lo raya
5	Apatito	La punta de un cuchillo lo raya con dificultad
6	Feldespató Potásico	Un trozo de vidrio lo raya con dificultad
7	Cuarzo	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero despiden chispas
8	Topacio	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero despiden chispas
9	Corindón	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero despiden chispas
10	Diamante	Puede rayar un trozo de vidrio y con ello el acero despiden chispas

En la [tabla 2.7.4.1.2](#) pueden verse los distintos ensayos desarrollados para la determinación de la dureza.

Tabla 2.7.4.1.2.- Ensayos para la determinación de la dureza.

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula para el número de dureza ^a
		Vista lateral	Vista superior		
Brinell	Esfera de 10mm de acero o de carburo de tungsteno			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Microdureza Vickers	Pirámide de diamante			P	$HV = 1,854P/d_1^2$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$HK = 14,2P/l^2$
Rockwell y Rockwell superficial	<ul style="list-style-type: none"> Cono de diamante Esferas de acero de $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro 			<ul style="list-style-type: none"> 60 kg 100 kg 150 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Rockwell <ul style="list-style-type: none"> 15 kg 30 kg 45 kg
					

^a Para las fórmulas dadas, P (la carga aplicada) está en kg, D, d, d₁ y l están dadas en mm.
Fuente: Adaptado de H. W. Hayden, W. G. Moffatt y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol III, *Mechanical Behavior*.
 © 1965 John Wiley & Sons, New York. Reproducido con permiso de John Wiley & Sons Inc.

2.7.4.2.- Dureza BRINELL.

En los ensayos de dureza Brinell también se fuerza un penetrador duro esférico en la superficie del metal a ensayar. El diámetro del penetrador de acero endurecido (o bien de carburo de tungsteno) es de 10 mm . Durante el ensayo, la carga se mantiene constante durante un tiempo especificado (entre 10 y 30 s). Los materiales más duros requieren cargas mayores.

El numero de dureza Brinell, HB, es una función de tanto la magnitud de la carga como del diámetro de la huella resultante (Tabla 2.7.4.1.2). Este diámetro se mide con una lupa de pocos aumentos, que tiene una escala graduada en el ocular. El diámetro medido es entonces convertido a número HB aproximado usando una tabla. En esta técnica solamente se utiliza una escala. El número de dureza Brinell también se indica por BHN.

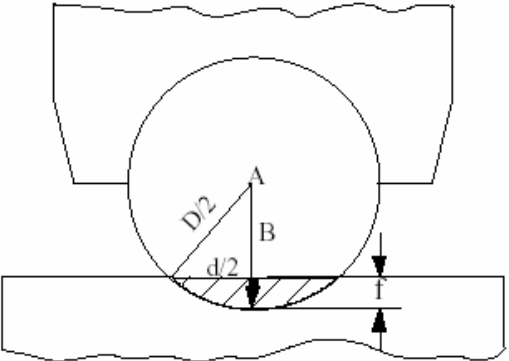
No se utilizan los ensayos Brinell para durezas superiores a 500 (aceros templados), porque se deforman las bolas.

Nomenclatura: XXX HBS (D/P/t) Ejemplo: 156 HBS 10/3000/1

HB viene dado por:

$$HB = \frac{P}{S} \left[\frac{Kg}{mm^2} \right]$$

Carga efectuada
Superficie de la huella



D ==> diámetro de la bola
d ==> diámetro de la huella

- ponemos todo en función del dato mayor para tener menor error

$$S = \pi D f$$

$$f = \frac{D}{2} - \overline{AB}$$

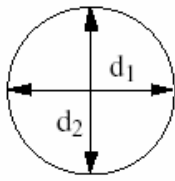
$$\overline{AB} = \sqrt{\frac{D^2}{2} - \frac{d^2}{2}}$$

$$S = \pi D f$$

$$f = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

$$S = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Impronta

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$


$$HBS = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

El valor de la carga P viene dado por : $P = K D^2$, donde K=cte. de ensayo. El tiempo de ensayo es t =10 - 15 s según normas UNE. Los valores de K para algunos materiales son:

- Aceros y elementos siderúrgicos: K=30 ;
- Cobres, Bronces, Latones: K=10 ;
- Aluminio y aleaciones: K=5 ;
- Materiales blandos (Sn, Pb): K=2.5 ;

Condiciones de ensayo:

- 1 - La superficie de la probeta debe ser plana, estar limpia, homogénea y perpendicular a la bola, libre de óxido y lubricantes, con el fin de obtener una huella bien definida
- 2 - El espesor de la probeta (s), debe ser al menos ocho veces la flecha de la impronta. ($s = 8f$)
- 3 - La distancia entre 2 huellas = (4:6)d y la distancia del centro de la huella al borde = (2.5:3)d.
- 4 - Temperatura de ensayo = 23 °C ±5

Uso de HBS:

a).- Determinar el %C de un acero. Solo valido para aceros al carbono.

$$\%C = \frac{HBS - 80}{141}$$

b).- Cálculo de la resistencia a la tracción.

$$\sigma_r = 0.36HBS \cong \frac{HBS}{3}$$

2.7.4.3.- Dureza Rockwell.

El ensayo de dureza Rockwell constituye el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar virtualmente cualquier metal o aleación desde el más duro al más blando. Los penetradores son bolas esféricas de acero endurecido que tienen diámetros: 1.588, 3.175, 6.350 y 12.70 mm. Para los materiales mas duros se usa un penetrador cónico de diamante (Brale).

Con este sistema, se determina un número de dureza a partir de la diferencia de profundidad de penetración que resulta al aplicar primero una carga inicial pequeña y después una carga mayor. La utilización de la carga pequeña aumenta la exactitud de la medida. Basándose en la magnitud de las cargas mayores y menores, existen dos tipos de ensayo: Rockwell y Rockwell superficial.

En el ensayo de Rockwell, la carga menor es de 10 kg, mientras las cargas mayores son 60, 100 y 150 kg. Cada escala esta representada por una letra del alfabeto. En las tablas 7.1.1 y 7.3.1.a se indican varias de estas escalas junto con los penetradores y cargas correspondientes.

Para ensayos superficiales, la carga menor es de 3 kg, mientras que el valor de la carga mayor puede ser 15, 30 o 45 kg. Estas escalas se identifican mediante un número (15, 30 o 45, según la carga) y una letra (N, T, W o Y, según el penetrador). Los ensayos superficiales se realizan frecuentemente en probetas delgadas. La tabla 7.3.1.b presenta varias escalas superficiales.

Cuando se especifican durezas Rockwell y superficiales, debe indicarse, además del numero de dureza, el símbolo de la escala utilizada. La escala se designa por el símbolo HR seguido por una identificación de la escala. Por ejemplo, 80 HRB representa una dureza Rockwell de 80 en la escala B, y 60 HR30W indica una dureza superficial de 60 en la escala 30W. Las escalas Rockwell también se designan frecuentemente por una letra R con la letra de la escala como subíndice, por ejemplo, RC, significa escala Rockwell C.

Para cada escala las durezas pueden llegar a valores de 130. Sin embargo, a medida que la dureza alcanza valores superiores a 100 o inferiores a 20 en cualquier escala, estos son poco exactos. Como las escalas se solapan en esa situaciones es mejor utilizar la escala vecina mas dura o la vecina mas blanda respectivamente también se producen inexactitudes si la muestra es demasiado delgada, si la huella se realiza demasiado cerca de un borde, o bien si dos huellas están demasiado próximas.

Tabla 2.7.7.3.1.- Escalas de dureza: (a) Rockwell (b) Rockwell superficial.

<i>Símbolo de la escala</i>	<i>Penetrador</i>	<i>Carga mayor (kg)</i>
A	Diamante	60
B	Bola de 1/16 pulg.	100
C	Diamante	150
D	Diamante	100
E	Bola de 1/8 pulg.	100
F	Bola de 1/16 pulg.	60
G	Bola de 1/16 pulg.	150
H	Bola de 1/8 pulg.	60
K	Bola de 1/8 pulg.	150

(a)

<i>Símbolo de la escala</i>	<i>Penetrador</i>	<i>Carga mayor (kg)</i>
15N	Diamante	15
30N	Diamante	30
45N	Diamante	45
15T	Bola de 1/16 pulg.	15
30T	Bola de 1/16 pulg.	30
45T	Bola de 1/16 pulg.	45
15W	Bola de 1/8 pulg.	15
30W	Bola de 1/8 pulg.	30
45W	Bola de 1/8 pulg.	45

(b)

Condiciones de ensayo:

- 1 - La superficie de la probeta debe ser plana, estar limpia, homogénea y perpendicular a la bola, libre de óxido y lubricantes, con el fin de obtener una huella bien definida.
- 2.- El espesor de la probeta debe ser 10 veces la penetración del cono ó de la bola (profundidad de la huella), $s = 10 f$
3. - La distancia entre 2 huellas = $3d$ y la distancia del centro de la huella al borde = $2.5 d$.
4. - Temperatura de ensayo = $23^{\circ} C \pm 5$
- 5.- Si las piezas son cilíndricas y $\phi < 30$ mm. debemos introducir un factor de corrección que se da en gráficas.

Ventajas del método Rockwell:

- Método rápido y preciso, no necesita de operarios especializados.
- Huellas más pequeñas que el método Brinell.
- Inconveniente tiene que si el material no asienta perfectamente, las medidas resultan falseadas.

Los equipos modernos para la medida de la dureza Rockwell están automatizados y son de muy fácil utilización: La dureza es medida directamente, y cada medida requiere únicamente unos pocos segundos.

Los equipos modernos de ensayo también permiten la variación del tiempo de aplicación de la carga. Esta variable debe ser considerada al interpretar los resultados de los ensayos de dureza.

2.7.4.4.- Microdureza Vickers.

El método Vickers (también a veces denominado pirámide de diamante), se deriva directamente del método Brinell. Se emplea mucho en laboratorio y en particular para piezas delgadas y templadas, con espesores mínimos hasta de 0.2 mm.

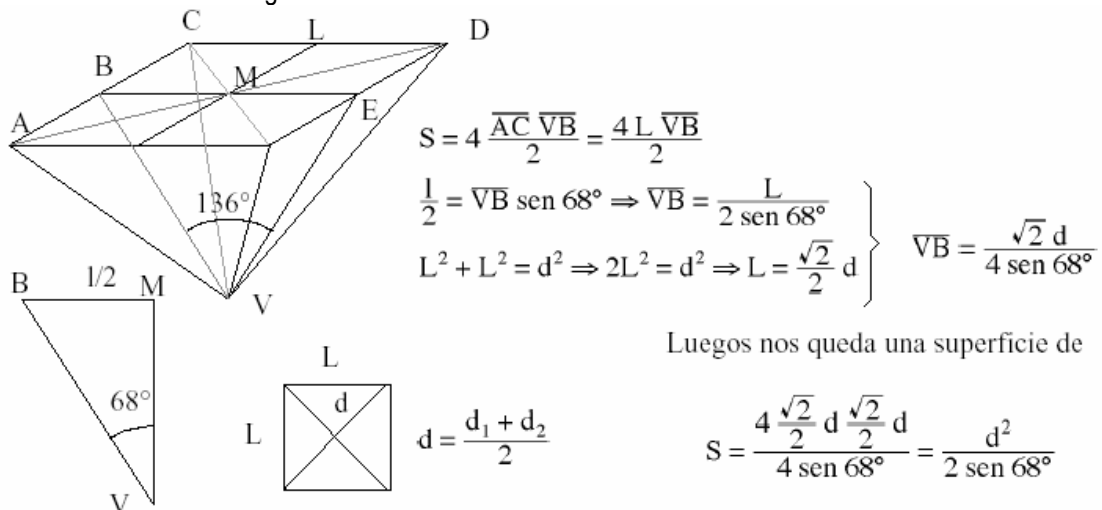
Se utiliza como penetrador una punta piramidal de base cuadrangular y ángulo en el vértice entre caras de 136° . Este ángulo se eligió para que la bola Brinell quedase circunscrita al cono en el borde de la huella.

La dureza Vickers viene dada por:

$$HV = \frac{P}{S} \text{ [Kg/mm]}$$

donde S es la superficie de la impronta y P la carga aplicada.

Ponemos la fórmula en función de la diagonal "d":



Así queda pues la expresión para la dureza Vickers:
$$HV = 1.854 \frac{P}{d^2} \frac{Kg}{mm^2}$$

donde P es generalmente 30 Kp (entre 5 y 100 Kp), pero si es dureza Vickers superficial es 1.3 ó 5 Kp. La marca resultante se observa al microscopio y se mide.

Nomenclatura: XXX HV P/t

Condiciones de ensayo:

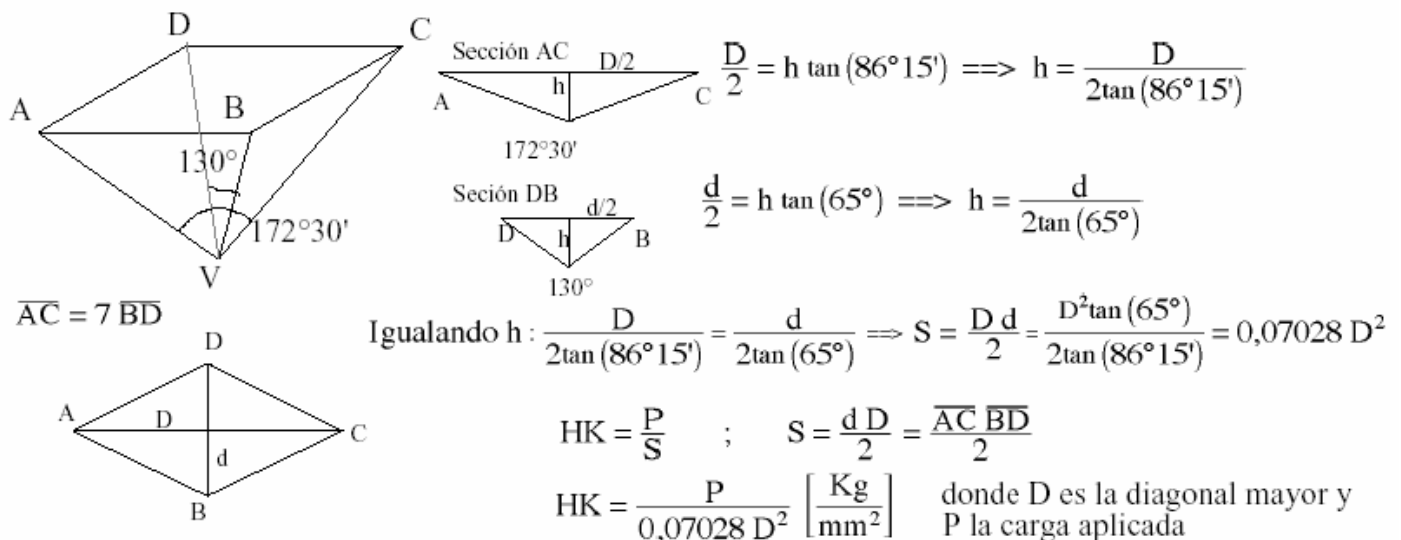
1. - La superficie de la probeta debe ser pulida, plana; estar limpia, homogénea y perpendicular a la bola, libre de óxido y lubricantes.
2. - $s = 1.5 d$ (s = espesor de la probeta).
3. - Distancia entre centros de 2 huellas = $(3:6) d$; Distancia del centro de la huella al borde = $(2,5:3) d$.
4. - Temperatura de ensayo = $23^\circ \text{C} \pm 5$
5. - En probetas cilíndricas, P debe ser tan pequeña que $f < 0,01 \text{ mm}$.

Ventajas del método Vickers:

- 1.- Las huellas Vickers son comparables entre sí; independientes de las cargas.
- 2.- Pueden medirse una amplia gama de materiales, desde muy blandos hasta muy duros, llegándose hasta 1.150 HV.
- 3.- Se pueden medir piezas muy delgadas con cargas pequeñas, hasta espesores de orden de 0.05 mm.
- 4.- Puede medirse dureza superficial. (para determinar recubrimientos de los materiales)
- 5.- La escala Vickers es más detallada que la Rockwell (32 unidades Vickers = 1 unidad Rockwell)
- 6.- Como es preciso examinar la huella puede comprobarse el estado del penetrador.

2.7.4.5.- Microdureza Knoop.

Se usa para durezas normales ($P=1 - 5 \text{ Kp}$), superficiales ($P=1/2 - 1 \text{ Kp}$) y microdurezas ($P=10 \text{ gr} - 500 \text{ gr}$). El penetrador esta hecho con una pirámide rómbica con relación entre diagonales de 1:7. Sus ángulos entre aristas son $a = 130^\circ$ y $b = 172^\circ 30'$, donde se obtiene:



El método Knoop se emplea sólo en laboratorio, para medir la dureza de láminas muy delgadas, incluso de depósitos electrolíticos. Nomenclatura: XXX HK P/t

Condiciones de Ensayo:

- 1.- $D \leq 3e$ (e = espesor de la probeta)

Las técnicas Knoop y Vickers se consideran ensayos de microdureza debido a la magnitud de la carga y al tamaño del indenteador. Ambas son muy convenientes para la medida de la dureza de pequeñas regiones seleccionadas en la superficie de la muestra. además, ambas técnicas Knoop y Vickers son utilizadas para el ensayo de materiales frágiles, tales como las cerámicas. Las escalas de dureza para ambas técnicas son aproximadamente equivalentes.

2.7.4.6.- Conversión de la dureza.

Es muy conveniente disponer de métodos para convertir la dureza de una escala a otra. Sin embargo, puesto que la dureza no es una propiedad del material muy bien definida, y debido a las diferencias experimentales de cada técnica, no se ha establecido un método general para convertir las durezas de una escala a otra. Los datos de conversión han sido determinados experimentalmente y se ha encontrado que son dependientes del tipo de material y de las características. La escala de conversión más fiable que existe es la que corresponde a aceros. Estos datos se presentan en la figura 2.7.4.6.1 para las durezas Knoop, Brinell y de las dos escalas Rockwell, también se incluye la escala de Mohs.

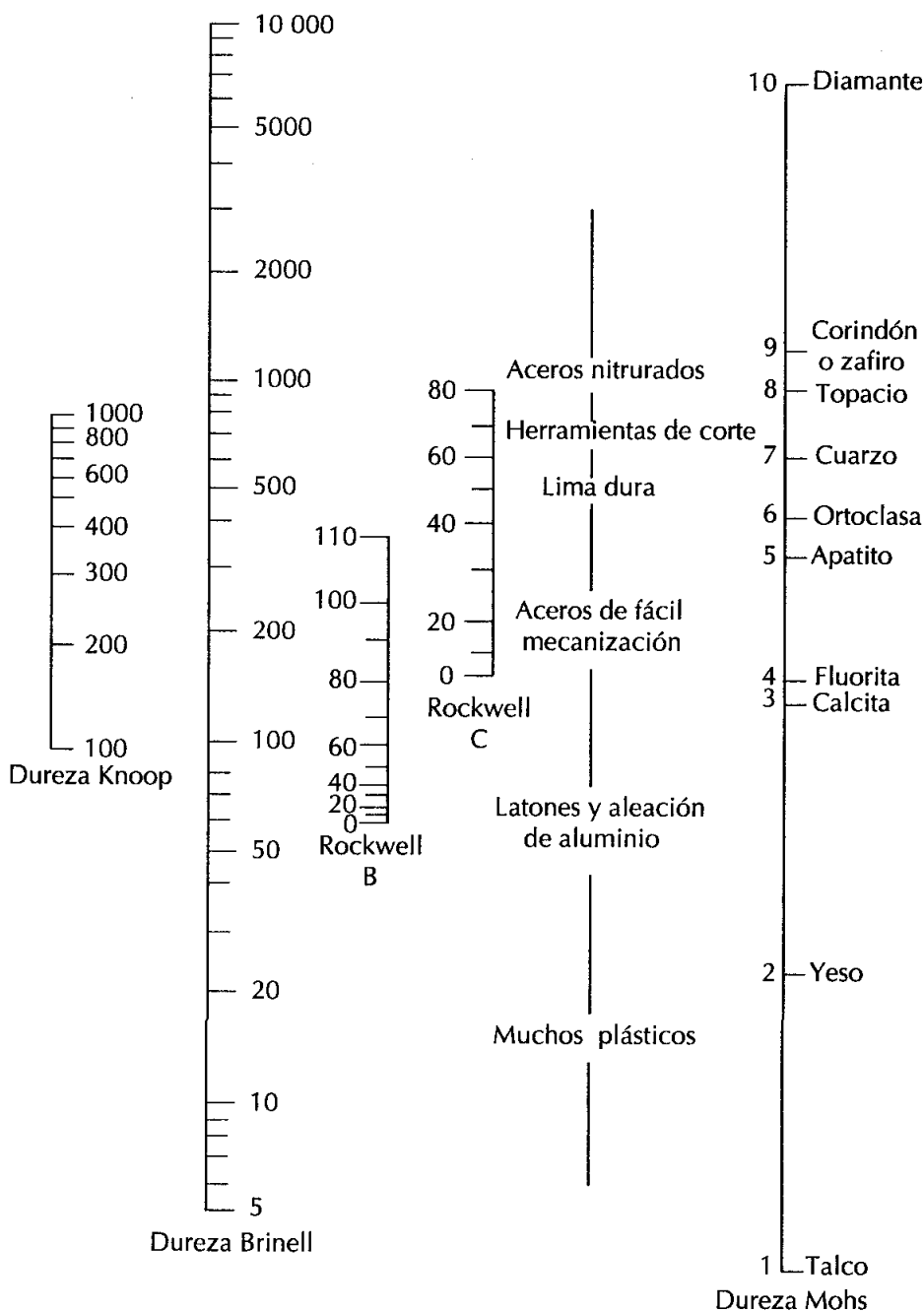


Figura 2.7.4.6.1.- Comparación de las varias escalas de dureza.

2.7.4.7.- Correlación entre dureza y la resistencia a la tracción.

Tanto la resistencia a la tracción como la dureza son indicadores de la resistencia de un metal a la deformación plástica. Por consiguiente, estas propiedades son, a grandes rasgos, proporcionales, tal como se muestra en la figura 2.7.4.7.1 para la resistencia a la tracción en función de la HB en el caso de la fundición, aceros y latones. Tal como se indica en la figura 2.7.4.7.1, la relación de proporcionalidad no es la misma para todos los metales. Como regla general, para la mayoría de los aceros, el número HB y la resistencia a la tracción están relacionados de acuerdo con:

$$\sigma_t \text{ (MPa)} = 3.45 \times \text{HB}$$

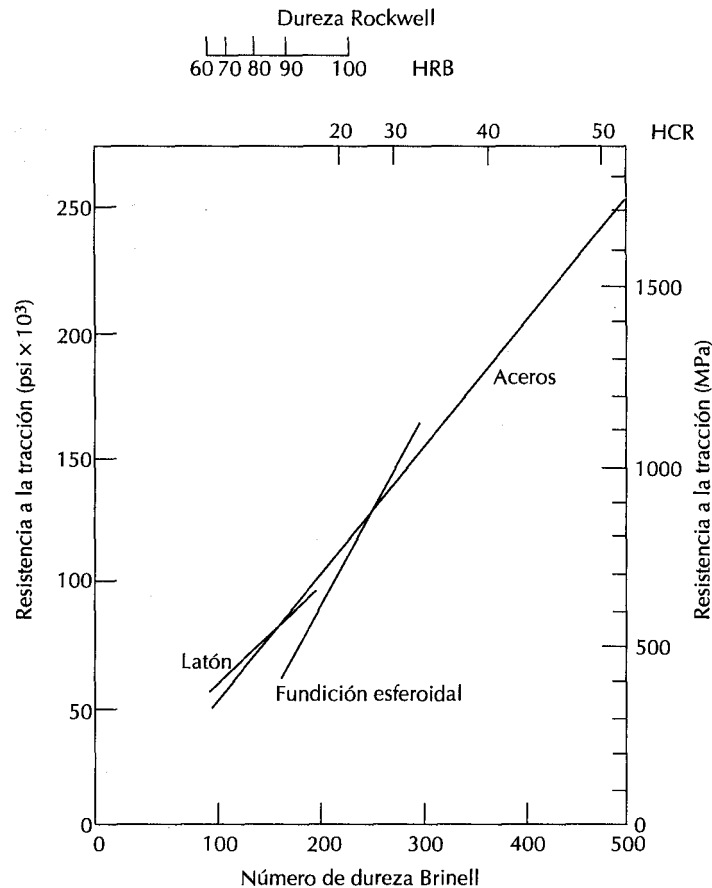


Figura 2.7.4.7.1.-Relación entre dureza y resistencia a la tracción para el acero, el latón y la fundición.

Los ensayos de dureza se realizan con mucha mayor frecuencia que cualquier otro ensayo por varias razones:

- 1.- Son sencillos y baratos, y ordinariamente no es necesario preparar una muestra especial.
- 2.- El ensayo es no destructivo, la muestra no es fracturada ni es excesivamente deformada, ya que una pequeña huella es la única deformación.
- 3.- Otras propiedades mecánicas pueden ser estimadas a partir de los resultados de dureza, tales con la resistencia a la tracción (Figura 2.7.4.7.1).

2.7.5.- Tipos de Rotura.

La resistencia a la rotura no es una propiedad, sino el resultado de un ensayo que da la tensión o carga necesaria por unidad de sección para producir la rotura del metal ensayado. Como la rotura de un metal puede producirse por tracción, por compresión, por torsión o por cizalladura. Entonces habrá una resistencia a la rotura por tracción, otra por compresión, otra por torsión y otra por cizalladura.

La fractura o rotura simple es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión aplicada estática (es decir, constante o que cambia lentamente con el tiempo) y a temperaturas que son relativamente bajas en comparación con la temperatura de fusión del material. Se comentarán las fracturas que resultan de cargas de tracción uniaxiales.

En los materiales de ingeniería, existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil. La clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica. Los materiales dúctiles exhiben normalmente una deformación plástica substancial con muy alta absorción de energía antes de la fractura. Por otro lado, en la rotura frágil existe normalmente poca o ninguna deformación plástica con poca absorción de energía en el proceso de rotura.

Cualquier proceso de fractura está compuesto de dos etapas -la formación y la propagación de una fisura- en respuesta a una tensión aplicada. El modo de fractura depende mucho del mecanismo de propagación de la grieta. La fractura dúctil se caracteriza por la existencia de mucha deformación plástica en la vecindad de la grieta que avanza.

Además, el proceso tiene lugar lentamente a medida que la grieta se extiende. Una grieta de este tipo se suele decir que es estable. Es decir, se resiste a su extensión a menos que se aumente la tensión aplicada. Además, hay evidencia de deformación plástica apreciable en las superficies de fractura (por ejemplo, retorcimiento y desgarre). Por el contrario, en el caso de la fractura frágil, las grietas pueden extenderse de forma muy rápida, con muy poca deformación plástica. Tales grietas se denominan inestables, y la propagación de la grieta, una vez iniciada, continúa espontáneamente sin un aumento en la tensión aplicada.

La fractura dúctil es siempre preferida por dos razones. En primer lugar, la fractura frágil ocurre de forma súbita y catastrófica sin ningún síntoma previo. Esto es consecuencia de la propagación rápida y espontánea de la grieta. Además, en el caso de fractura dúctil la presencia de deformación plástica es un síntoma de que la fractura es inminente, siendo así posible tomar medidas preventivas. En segundo lugar, para inducir la fractura dúctil se requiere más energía de deformación ya que los materiales dúctiles generalmente son más tenaces. Bajo la acción de una tensión aplicada, la mayoría de los metales son dúctiles, mientras que las cerámicas son notablemente frágiles y los polímeros pueden exhibir ambos tipos de fractura.

FRACTURA DUCTIL.

Las superficies de fractura dúctiles tienen sus propios rasgos tanto a nivel microscópico como macroscópico. [La figura 2.7.5.1](#) muestra esquemáticamente dos perfiles microscópicos característicos de fractura. La configuración mostrada en [la figura 2.7.5.1.a](#) se encuentra en metales muy blandos, tales como oro y plomo a temperatura ambiente, y en otros metales, polímeros y vidrios inorgánicos a temperaturas elevadas. Estos materiales son muy dúctiles y se rompen cuando la estricción se reduce prácticamente a un punto, presentando una reducción de área virtualmente igual al 100%.

El tipo más común de perfil de fractura a tracción en los materiales dúctiles es el representado en [la figura 2.7.5.1.b](#), en la cual la fractura es precedida por solo una cantidad moderada de estricción.

El proceso de fractura normalmente ocurre en varias etapas ([Figura 2.7.5.2](#)). En primer lugar, después de iniciarse la estricción, se forman pequeñas cavidades, o microcavidades, en el interior de la sección, tal como se indica en [la figura 2.7.5.2.b](#). A continuación, a medida que la deformación aumenta, estas microcavidades se hacen mayores, se juntan y coalescen para formar una grieta elíptica, la cual tiene su eje mayor perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada. La grieta continúa creciendo en una dirección paralela a su eje mayor mediante este proceso de coalescencia de microcavidades ([Figura 2.7.5.2.c](#)).

Finalmente, se produce la fractura por la rápida propagación de una grieta alrededor del perímetro exterior de la estricción ([Figura 2.7.5.2.d](#)), por deformación de cizalladura formando un ángulo de alrededor de 45° con respecto al eje de tracción, o sea, el ángulo en el cual la tensión de cizalladura es máxima. Algunas veces, una fractura que tiene este contorno característico se denomina fractura copa-cono debido a que una de las superficies tiene la forma de una copa y la otra la de un cono.

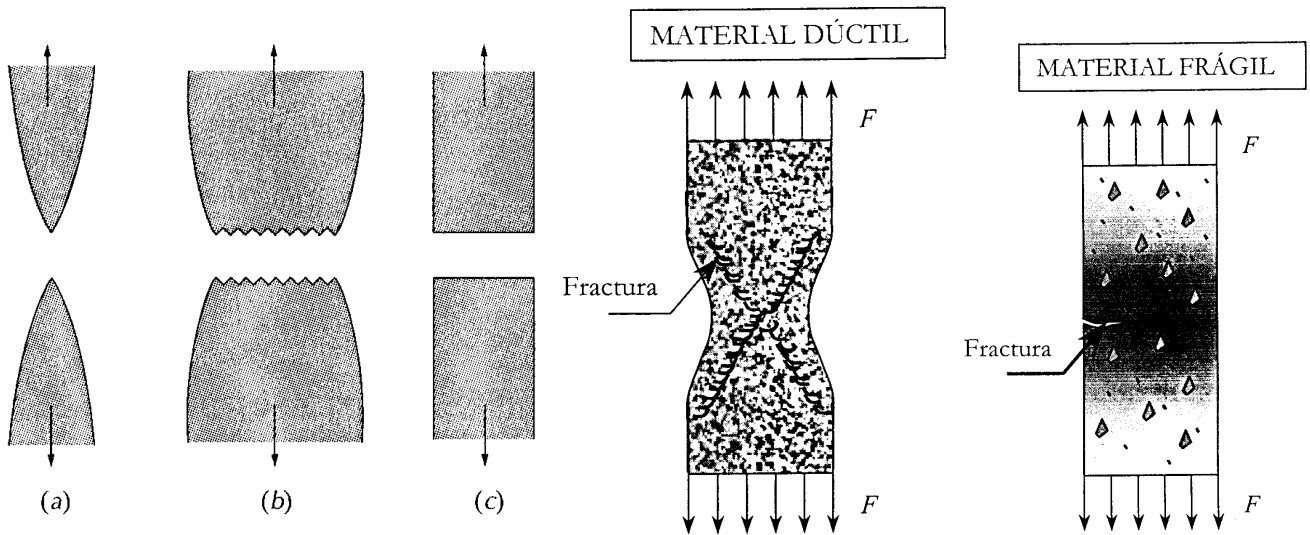


Figura 2.7.5.1.- (a).- Fractura muy dúctil en la cual la probeta se estricciona hasta llegar a un punto. (b).- Fractura moderadamente dúctil después de cierta estricción. (c) Fractura frágil sin ninguna deformación plástica.

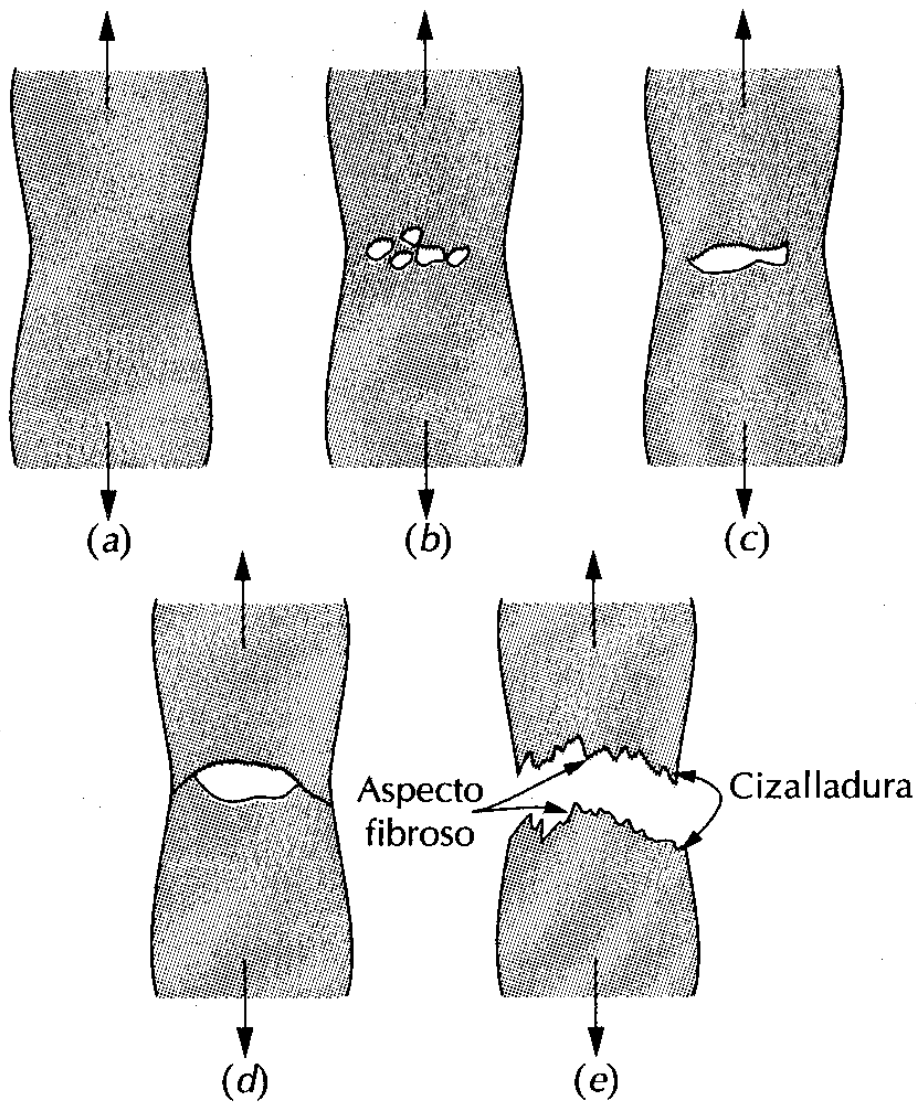


Figura 2.7.5.2.- Etapas en la fractura copacono. (a).- Estricción inicial. (b).- Formación de pequeñas cavidades. (c).- La coalescencia de cavidades forma una grieta. (d).- Propagación de la grieta. (e).- Fractura final por cizalladura a un ángulo de 45° respecto a la dirección de la tensión.

En resumen, las características de las roturas dúctiles son :

* La rotura produce un cono a 45° .

* Observando el gráfico de [la figura 2.7.5.3](#) se observa :

- Tiene un gran alargamiento en el periodo de estricción y rotura.
- La diferencia entre el límite de proporcionalidad y tensión de rotura es muy grande.
- Tiene un gran periodo plástico.

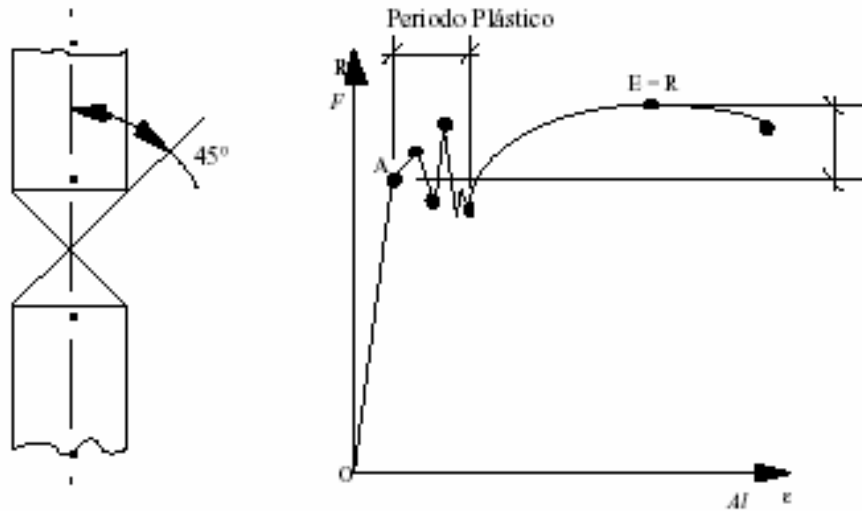


Figura 2.7.5.3.- Características de las roturas dúctiles.

FRACTURA FRÁGIL.

La fractura frágil ocurre sin apreciable deformación plástica, y por propagación rápida de una grieta. La dirección del movimiento de la grieta es casi perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y produce una superficie de fractura relativamente plana, tal como esta indicado en [la figura 2.7.5.1 .c](#).

Las superficies de fractura de los materiales que se han roto de una manera frágil tienen sus propios detalles característicos; cualquier signo de deformación plástica importante esta ausente. La fractura frágil en materiales amorfos, tales como vidrios cerámicos, produce una superficie lisa y brillante.

En la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta corresponde a la sucesiva y repetida rotura de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos. Tal proceso se denomina descohesión. Este tipo de fractura se dice que es transgranular (o transcristalina), debido a que las grietas pasan a través de los granos. En algunas aleaciones, la propagación de la grieta ocurre a lo largo de los bordes de grano; esta fractura se denomina fractura intergranular.

En resumen, las características de las roturas frágiles son:

* Prácticamente no tiene cono de rotura. No hay apenas estricción.

* La rotura es de 90° respecto al eje.

* Observando el gráfico de [la figura 2.7.5.4](#) se tiene :

- Desaparece el periodo plástico. El alargamiento es muy corto.
- El periodo de estricción y rotura es muy corto.
- La diferencia entre el punto A y el punto B es muy corta.

Estos dos casos son los casos extremos, los demás casos se comprenden entre estos dos.

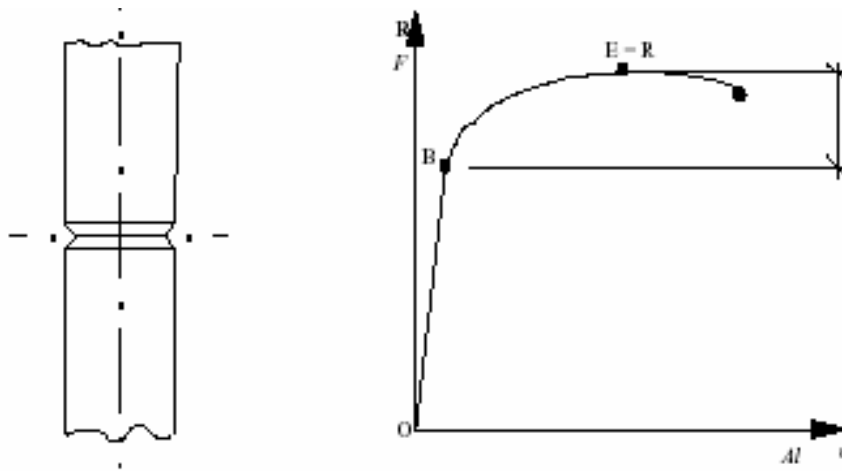


Figura 2.7.5.4.- Características de las roturas frágiles.

Factores de los que dependen las roturas:

(a).- Temperatura: Actualmente se realizan ensayos en diferentes temperaturas (horno y aparato que produce frío-gas)

* Comportamiento en frío: A medida que se enfría el periodo plástico va desapareciendo, se convierte de material dúctil a frágil. El límite elástico se aproxima a la tensión de rotura.

* Comportamiento en caliente (Figura 2.7.5.5): Aumenta el periodo plástico, disminuye la tensión de rotura.

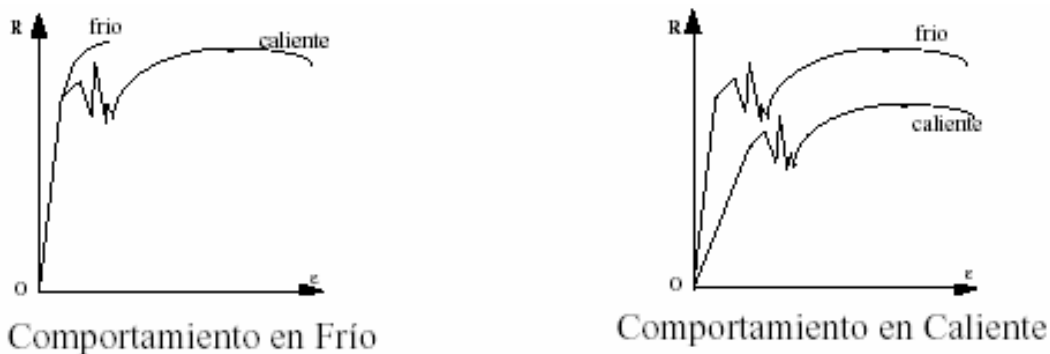


Figura 2.7.5.5 .- Influencia de la temperatura en el comportamiento del material frente a la rotura

(b).- Velocidad: Al aumentar la velocidad disminuimos el periodo plástico. No cambia la Tensión de Rotura.

(c).- Distribución de tensiones: Hacen que el material se convierta en frágil. Hay cambios de tensiones en:

- Disminución de secciones.
- Ángulos.
- Roturas internas.
- Tratamientos: cementaciones, templados.
- Soldaduras.
- Mecanizados.

(d).- Estructura Cristalina:

- Grano grande y abierto. El material rompe antes, NO hay periodo plástico.
- Grano pequeño y cerrado. Hay periodo plástico, el material rompe más tarde.

(e).- Composición del material:

- Hay elementos que tienden a hacer frágil el material como son: C, Si, S, P, Sb, Arsénico, y gases(N, H, O)
- Hay elementos que eliminan los anteriores, por lo que beneficia al material al hacerlo más dúctil. El Mn (cierra la estructura), el Ni y Al (disminuyen el tamaño del grano), elementos desgasificantes.

2.7.6.-PRINCIPIOS DE MECANICA DE LA FRACTURA.

2.7.6.1.-Tensión teórica de fractura.

La fractura es la separación de un cuerpo, por fuerzas físicas o químicas, en dos o más partes, resultado de lo cual se crean nuevas superficies. La fractura incluye la rotura de enlaces atómicos a través de la propagación de fisuras o grietas (Figura 2.7.6.1.1). Primero ha de producirse la creación de una fisura o grieta y después ha de propagarse.

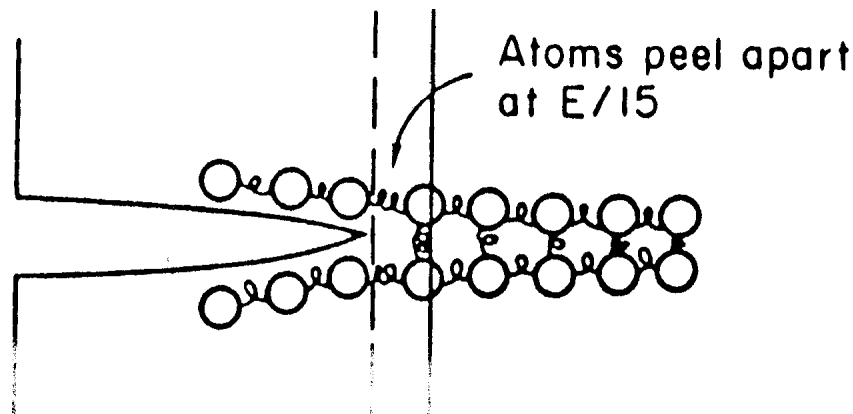


Figura 2.7.6.1.1.- Rotura de enlaces atómicos a través de la propagación de fisuras o grietas

Se denomina resistencia teórica de un material en un punto, a aquella que se obtiene de considerar una situación ideal perfecta en el medio continuo, es decir homogénea sin discontinuidades, donde solo actúan las fuerzas químicas de ligadura interatómica (fuerzas cohesivas que existen entre los átomos: iónicas, covalentes, metálicas, de Van Der Waals). Es decir que el material está libre de defectos y su capacidad mecánica es entonces la ideal.

El concepto de resistencia teórica sirve para conocer el límite superior de resistencia, que se puede alcanzar con un material hipotéticamente perfecto. El objetivo es saber hasta qué límites se puede aprovechar la resistencia de un material si se garantizara su perfecta fabricación. En otras palabras, lo que se intenta es responder a la pregunta: ¿cuanto más hay que mejorar el proceso de fabricación de un material para que su resistencia se acerque a la teórica?

Se demuestra que la resistencia teórica de un material viene dada por:

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{\gamma_s E}{r_0}} \quad (2.7.6.1.1)$$

donde :

E = Modulo de elasticidad

γ_s = Energía superficial específica (J/m^2)

r_0 = Separación interatómica de equilibrio.

En la tabla 2.7.6.1.1 se dan las características mecánicas de algunas sustancias para problemas de tracción. Asimismo, en la tabla 2.7.6.1.2 puede verse la comparación entre la resistencia teórica de la alúmina y del carburo de silicio con su resistencia real a tracción según el tipo de material. La mayoría de los materiales cerámicos se fabrican de modo que son policristalinos.

La resistencia real es, aproximadamente, $\frac{1}{100}$ de la teórica.

Tabla 2.7.6.1.1 - Características mecánicas de algunas sustancias para problemas de tracción.

Material	Ligadura	Estructura	Plano-Fractura	E_{th}^0 GNm ⁻²	σ_{th} GNm ⁻²	E_{th}^0/σ_{th}
Diamante (C)	Covalente	Cúbica	(111)	1210	205	5,9
Silicio (Si)	Covalente	Cúbica	(111)	188	32	5,9
Alúmina (Al ₂ O ₃)	Covalente	Hexagonal	(0001)	460	46	10,0
Cloruro de Sodio (NaCl)	Iónica	Cúbica	(100)	44	4,3	10,2
Magnesia (Mg O)	Iónica	Cúbica	(100)	245	37	6,6
Hierro- α (α Fe)	Metálica	Cuerpo	(100)	132	30	4,4
		Cúb.Centra.				
Cobre (Cu)	Metálica	Cara Cúb. Centrada	(111)	192	39	4,9
Zinc (Zn)	Metálica	Paq. Hexag.	(0001)	35	3,8	9,2

Tabla 2.7.6.1.2.- Comparación entre la resistencia teórica de la alúmina y del carburo de silicio con su resistencia real.

Material	E [GPa (psi)]	Estimated theoretical strength [GPa (psi)]	Measured strength of fibers [GPa (psi)]	Measured strength of polycrystalline specimen [GPa (psi)]
Al ₂ O ₃ ^a	380 (55 × 10 ⁶)	38 (5.5 × 10 ⁶)	16 (2.3 × 10 ⁶)	0.4 (60 × 10 ³)
SiC	440 (64 × 10 ⁶)	44 (6.4 × 10 ⁶)	21 (3.0 × 10 ⁶)	0.7 (100 × 10 ³)

En la tabla 2.7.6.1.3 pueden verse los valores de la energía superficial de varios materiales en vacío o en atmósferas inertes.

Tabla 2.7.6.1.3.- Valores de la energía superficial de varios materiales en vacío o en atmósferas inertes

Material	Temperature (°C)	Surface Energy (ergs/cm ²)
Water (liquid)	25	72
Lead (liquid)	350	442
Copper (liquid)	1120	1270
Copper (solid)	1080	1430
Silver (liquid)	1000	920
Silver (solid)	750	1140
Platinum (liquid)	1770	1865
Sodium chloride (liquid)	801	114
NaCl crystal (100)	25	300
Sodium sulfate (liquid)	884	196
Sodium phosphate, NaPO ₃ (liquid)	620	209
Sodium silicate (liquid)	1000	250
B ₂ O ₃ (liquid)	900	80
FeO (liquid)	1420	585
Al ₂ O ₃ (liquid)	2080	700
Al ₂ O ₃ (solid)	1850	905
0.20 Na ₂ O-0.80 SiO ₂	1350	380
0.13 Na ₂ O-0.13 CaO-0.74 SiO ₂ (liquid)	1350	350
MgO (solid)	25	1000
TiC (solid)	1100	1190
CaF ₂ crystal (111)	25	450
CaCO ₃ crystal (1010)	25	230
LiF crystal (100)	25	340

2.7.6.2.-Relación entre resistencia real y resistencia teórica.

La magnitud de la resistencia teórica σ_{th} es considerablemente mayor que aquella denominada resistencia real o nominal del material σ_f .

En la década de los años veinte, A. A. Griffith propuso que la discrepancia entre la resistencia cohesiva teórica y la resistencia a la fractura observada podía ser explicada por la presencia de defectos, es decir de las dislocaciones, microfisuras, poros, huecos, etc. los cuales siempre existen en condiciones normales en la superficie y en el interior de una pieza de material.

Para ello, se utiliza el concepto de concentración de tensiones desarrollado por Inglis. La presencia de irregularidades en forma de discontinuidades en la matriz del material provoca un incremento de las tensiones, en los bordes de dicha discontinuidad, conocido como "concentración de tensiones". Estos defectos van en detrimento de la resistencia a la fractura debido a que una tensión aplicada puede ser amplificada o concentrada en la punta del defecto, en un grado que depende de la orientación de la grieta y de la geometría.

Particularmente, Inglis, para placas de grandes dimensiones sometidas a tracción y suponiendo que el orificio de la placa es elíptico, con lo que consigue aproximar "un simple hueco" a "un defecto de aspecto similar a una fisura". Así, fue posible estudiar en forma muy aproximada el estado tensional en la cabeza de una fisura (Figura 2.7.6.2.1). Si se supone que esta orientado con su eje mayor perpendicular a la tensión aplicada, la tensión máxima en el extremo de la grieta, σ_m , vale:

$$\text{Hueco elíptico: } \sigma_{MAX} = \sigma \frac{(a+b)^2}{a^2-b^2} \left[\frac{2a^2}{b(a^2-b^2)}(a-b) - 1 \right] \cong \sigma \left[1 + \frac{2a}{b} \right] \quad (2.7.6.2.1)$$

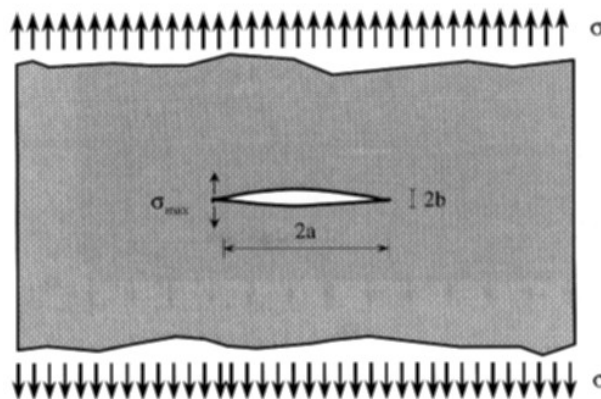


Figura 2.7.6.2.1.- Placa finita con un orificio elíptico, sometida a un estado plano de tensiones

y para elipses muy delgadas puede realizarse la siguiente aproximación,

$$\sigma_{MAX} \cong 2\sigma \left[\frac{a}{b} \right] \quad \forall \left(\frac{a}{b} \right) \gg \frac{1}{2} \quad (2.7.6.2.2)$$

La tensión máxima en el extremo de la grieta, σ_m , también puede ser aproximada por:

$$\sigma_{max} = 2\sigma_0 \sqrt{\frac{a}{\rho_t}} \quad (2.7.6.2.3)$$

donde σ_0 es la magnitud de la tensión nominal aplicada, ρ_t es el radio de curvatura de la punta de la grieta y a representa la longitud de una grieta superficial, o bien la mitad de la longitud de una grieta interna. Así para una microgrieta relativamente larga

que tiene un radio de curvatura pequeño, el factor $\left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$ puede ser muy grande. Esto da un valor de σ_m varias veces mayor que σ_0 .

En la figura 2.7.6.2.2, se muestra el perfil de la tensión a través de la sección que contiene una grieta. Tal como se ilustra mediante este perfil, la magnitud de la tensión localizada disminuye con la distancia a la punta de la grieta. En las posiciones muy alejadas, la tensión es exactamente la tensión nominal σ_0 , o sea, la carga dividida por el área de la sección.

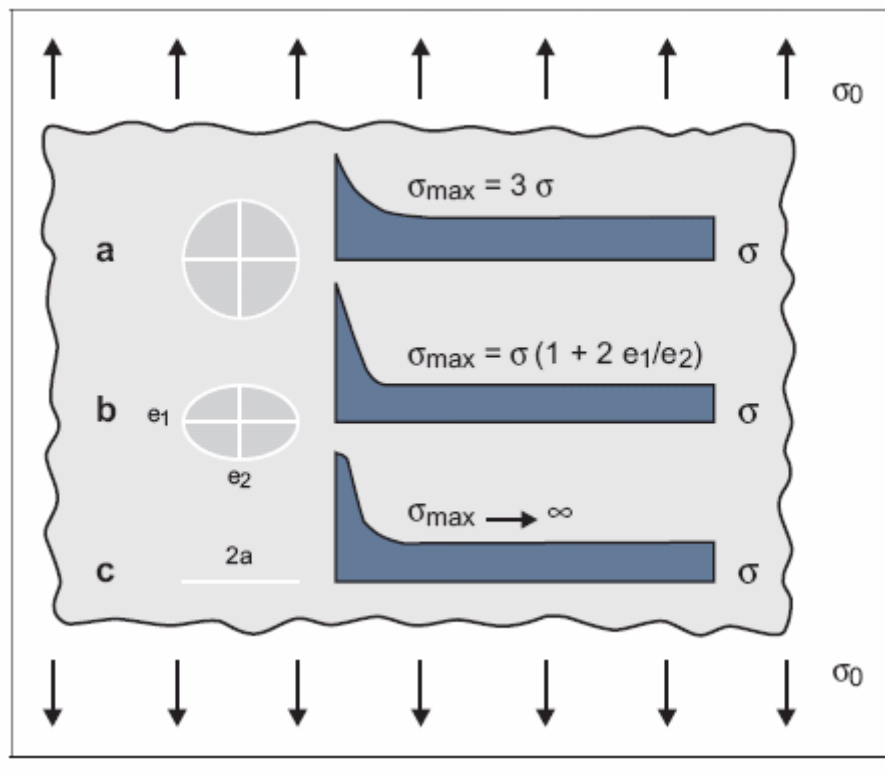
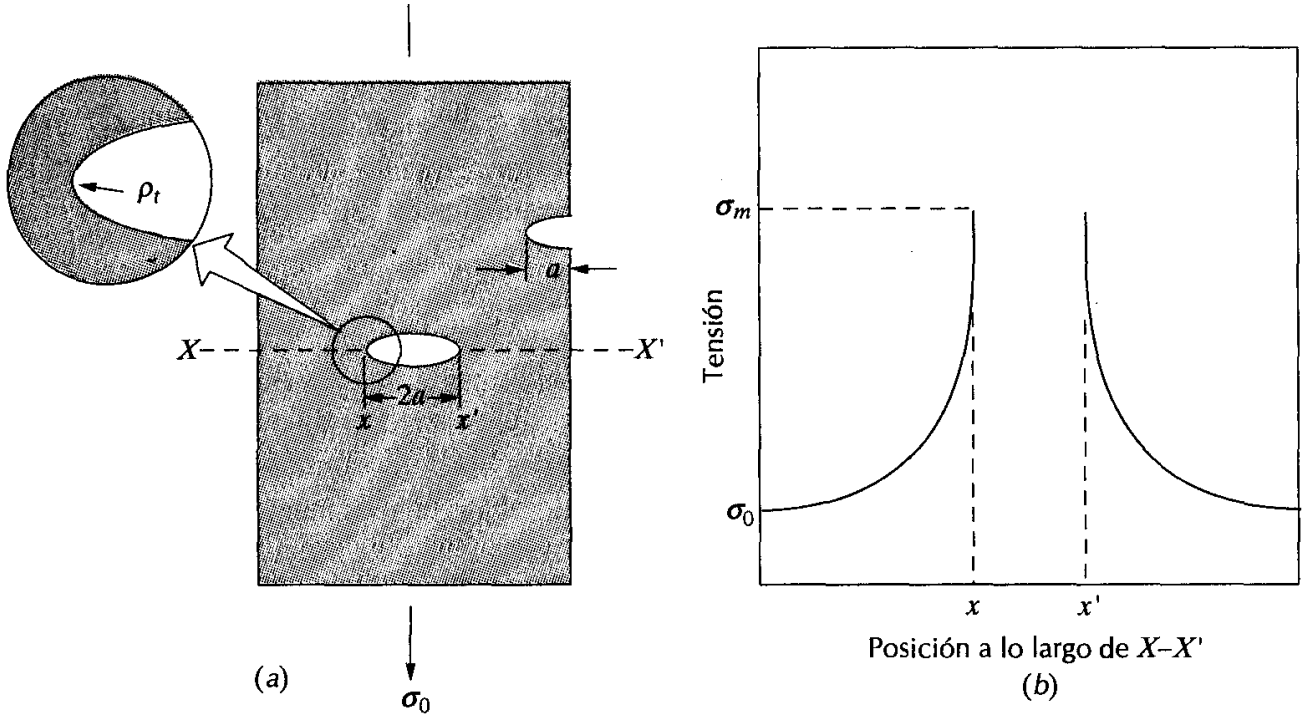


Figura 2.7.6.2.2.- (a).- Geometría de grietas superficiales e internas. (b).- Perfil esquemático de la tensión a lo largo de la línea X-X' en (a), mostrando la amplificación de la tensión en las posiciones cercanas a las puntas de la grieta.

A menudo el cociente $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0}$ se denomina factor de concentración de tensiones K_t :

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} \quad (2.7.6.2.4)$$

el cual es simplemente una medida del grado con que una tensión externa es amplificada en el extremo de una grieta pequeña.

Como comentario adicional, se puede decir que la amplificación de la tensión no está restringida a estos defectos microscópicos; puede ocurrir en discontinuidades internas macroscópicas (por ejemplo, agujeros), en ángulos vivos y en entallas en estructuras grandes. Además, el efecto de un concentrador de tensión es más significativo en materiales frágiles que en materiales dúctiles. Para un material dúctil, ocurre deformación plástica cuando la tensión máxima excede al límite elástico. Esto conduce a una distribución más uniforme de la tensión en la vecindad del concentrador de tensiones y al desarrollo de un factor de concentración de tensiones máximo que es menor que el valor teórico. Esta fluencia plástica del material y la redistribución de tensiones asociada no ocurre en absoluto alrededor de los defectos y discontinuidades en los materiales frágiles; por consiguiente, la tensión que resulta es la teórica.

Griffith propuso que en todos los materiales frágiles existe una población de fisuras y defectos pequeños que tienen una variedad de tamaños, geometrías y orientaciones. Al aplicar un esfuerzo 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 entonces se propaga rápidamente.

Si no existieran defectos, la resistencia a la fractura sería igual a la resistencia cohesiva del material. Filamentos metálicos y cerámicos muy pequeños ("whiskers"), creados prácticamente libres de defectos, tienen resistencias a la fractura que están próximas a sus valores teóricos.

Durante la propagación de una grieta se produce lo que se denomina liberación de energía de deformación elástica, o sea, parte de la energía que es almacenada en el material cuando es deformado elásticamente. También se forman nuevas superficies en las caras de la grieta cuando esta se extiende, lo cual origina un incremento en la energía superficial del sistema. Griffith demostró que la tensión crítica que se requiere para propagar una grieta en un material frágil viene dada por

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (2.7.6.2.5)$$

donde :

E = módulo de elasticidad

γ_s = energía superficial específica

a = mitad de la longitud de una grieta interna.

La fractura ocurre cuando el nivel de la tensión aplicada excede un valor crítico σ_c .

El desarrollo previo se aplica a materiales completamente frágiles para los cuales no hay deformación plástica. La mayoría de los metales y muchos polímeros experimentan alguna deformación plástica antes de la fractura; esto produce un enroscamiento del extremo de la grieta, o sea, un aumento en el radio de la punta de la misma y, por consiguiente, aumenta la resistencia a la fractura.