

ENSAYO DE TRACCIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS

INTRODUCCIÓN

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 y el acero de los ejes de los automóviles. 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 de un material refleja 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.

Las propiedades mecánicas de los materiales se determinan realizando ensayos cuidadosos de laboratorio que reproducen las condiciones de servicio hasta donde sea posible. Los factores que deben considerarse son la naturaleza de la carga aplicada, su duración, así como las condiciones del medio. La carga puede ser una tracción, una compresión o una cizalladura, y su magnitud puede ser constante con el tiempo o bien fluctuar continuamente. El tiempo de aplicación puede ser de sólo una fracción de segundos o durar un período de varios años. La temperatura de servicio puede ser un factor importante.

El papel del ingeniero de estructuras es determinar las tensiones (también denominados esfuerzos) y las distribuciones de tensiones en los componentes que están sujetos a cargas bien definidas. Esto puede lograrse mediante técnicas experimentales y/o mediante análisis de tensiones por medios matemáticos teóricos. Estos temas se tratan en los libros de texto tradicionales dedicados al análisis de tensiones y a la resistencia de materiales.

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.

Los materiales elegidos para aplicaciones estructurales tienen combinaciones deseables de características mecánicas. El presente tema se concentra principalmente en el comportamiento mecánico de los metales; los polímeros y las cerámicas son tratados aparte porque son mecánicamente bastante diferentes de los metales. Se analiza el comportamiento esfuerzo-deformación de los metales y las principales propiedades mecánicas relacionadas, y se examinan otras características mecánicas que son importantes.

CONCEPTO DE ESFUERZO, TENSIÓN, RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN

Esfuerzo

La constitución de la materia en los sólidos presupone un estado de equilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión de sus elementos constituyentes (cohesión), o sea que, cuando no actúan sobre el cuerpo fuerzas exteriores, éste se mantendrá en equilibrio permanente y conservará, por lo tanto, su forma y dimensiones, teóricamente inalterables, durante un tiempo indefinido.

Al actuar fuerzas exteriores, se rompe el equilibrio interno y se modifican la atracción y repulsión, aumentando una con respecto a la otra según que la carga aplicada tienda a alejar o acercar a los átomos, generándose por lo tanto una fuerza interna que tenderá a restaurar la cohesión; cuando ello no ocurre, el material se rompe.

Como consecuencia, la variación o diferencia en el equilibrio interno es la fuerza interior que tiende a oponerse al efecto aplicado.

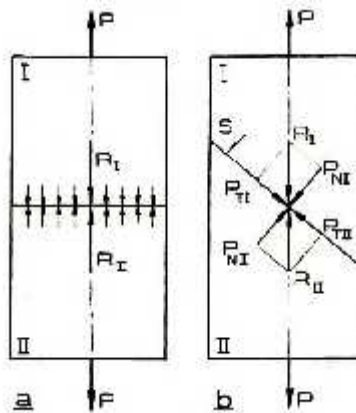


Fig. 1. Esfuerzos en tracción simple

La existencia de las fuerzas interiores puede justificarse gráficamente, sin entrar al estudio de la estructura atómica del material, realizando cortes hipotéticos en un cuerpo, sobre el que actúan cargas compatibles con su resistencia (Fig. 1), al analizar qué fuerzas o sistemas de fuerzas debemos aplicar para que las partes no se desplacen.

En efecto, si tenemos en cuenta que cuando los cortes supuestos no se realizan subsisten en el interior del material las mismas condiciones, el equilibrio deberá ser mantenido por las fuerzas interiores, en cuyo caso comprobamos además el esfuerzo producido por el cuerpo, el que es posible medir con los valores y unidades de las fuerzas que lo originan. La condición de equilibrio queda entonces expresada por:

$$\text{Fuerza exterior o carga} = \text{Fuerza interior o esfuerzo (kgf - N)}$$

Si suponemos que las cargas aplicadas son perpendiculares a la sección transversal y se reparten uniformemente (igual intensidad en todos los puntos), el esfuerzo total sobre una sección podrá ser considerado igual a la resultante de las fuerzas interiores que actúan sobre la misma. Si esta sección es transversal, el esfuerzo total será normal, figura 1.a; en cambio, si presenta una determinada inclinación, figura 1.b, la resultante interna se descompone en sus componentes normales (PN) y tangenciales (PT), siendo por lo tanto posible hablar de esfuerzos normales y esfuerzos tangenciales.

Esta descomposición la impone el hecho real de que son los esfuerzos normales y tangenciales los que producen efectos singulares en el material.

El esfuerzo normal tiende a alcanzar un valor crítico para el cual se produce la decohesión de la estructura o fractura propiamente dicha, en cambio el tangencial tenderá a generar deslizamientos de los elementos componentes, que pondrán de manifiesto la mayor o menor capacidad del material a ser deformado.

Clasificación de los Esfuerzos

Si bien la clasificación genérica anterior permite agrupar a los esfuerzos en normales y tangenciales, su individualización se obtiene analizando el efecto que producen en las secciones transversales. Podemos así distinguir cinco esfuerzos simples: *tracción*, *compresión*, *flexión*, *torsión* y *corte*. (Fig. 2. *Esfuerzos Simples*).

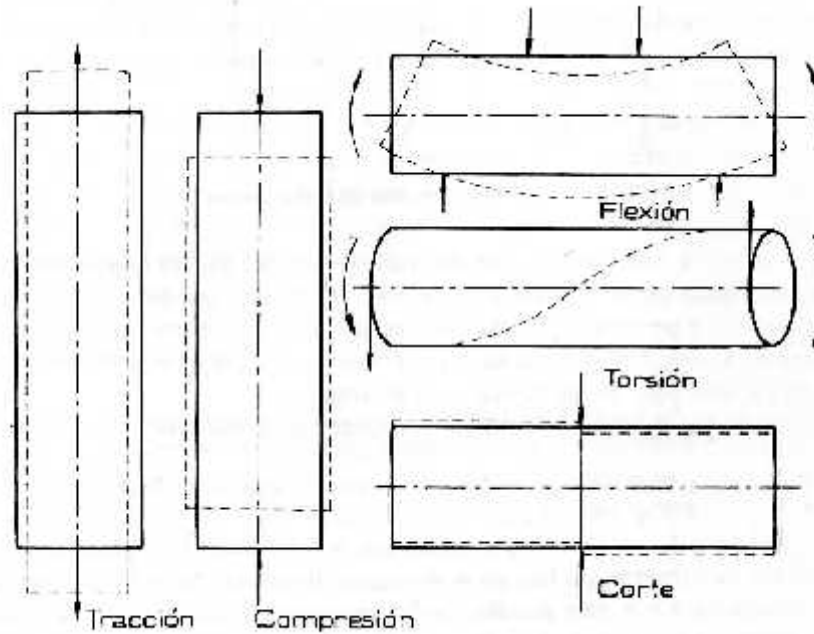


Fig. 2. Esfuerzos Simples

Tensión - Resistencia

Los valores en kilogramo fuerza o newton de los esfuerzos producidos en el material no dan una medida de su resistencia o capacidad para soportar las cargas que le pueden ser aplicadas, por ser función de sus dimensiones. Se impone, por lo tanto, que la valoración se efectúe refiriendo el esfuerzo a la unidad de sección, obteniéndose el esfuerzo unitario o tensión que puede definirse como la resistencia interna de la unidad de área a una carga o fuerza exterior.

La tensión puede ser también normal () o tangencial () según el esfuerzo que la origina.

$$Tensión Normal = \frac{\text{Esfuerzo normal}}{\text{Sección}} = \sigma = \frac{P_N}{S}$$

$$Tensión Tangencial = \frac{\text{Esfuerzo tangencial}}{\text{Sección}} = \tau = \frac{P_T}{S}$$

Estas expresiones se aplican en forma directa en los casos en que el efecto exterior, y por consiguiente el esfuerzo que se le opone, se valorice en kilogramo fuerza o newton (cargas), tal como ocurre en tracción, compresión y corte.

En cambio cuando no es posible definir el efecto aplicado exclusivamente en valores de carga, pues depende de otras variables dadas por la luz entre apoyos o el brazo de palanca, flexión y torsión respectivamente, la reacción del material se manifiesta por un momento interior generado por los esfuerzos que actúan en las secciones transversales.

Aplicando el concepto de tensión anterior (esfuerzo sobre sección) y relacionando las fuerzas interiores y momentos de reacción que ellas producen en las secciones donde actúan con los momentos aplicados, se llega a las siguientes expresiones de tensión:

$$\text{Tensión de flexión} = \sigma = \frac{\text{Esfuerzo flector aplicado o interior}}{\text{Módulo resistente}} = \sigma = \frac{Mf}{W_x}$$

$$\text{Tensión de torsión} = \tau = \frac{\text{Momento torsor aplicado o interior}}{\text{Módulo resistente}} = \sigma = \frac{Mt}{W_x}$$

Las deducciones de estas fórmulas las efectuaremos al estudiar flexión y torsión respectivamente.

Desde el punto de vista teórico-práctico son varias las tensiones que representan características especiales de los materiales y que permiten definir sus propiedades elásticas o de resistencia.

Entre las tensiones de mayor importancia para todos los materiales en general mencionaremos la que se define como resistencia, que se obtiene de considerar las cargas o momentos máximos según el tipo de esfuerzo aplicado.

Deformaciones

Como resultado inmediato a la aplicación de una carga o generación de un esfuerzo en un material, surge una deformación que puede resultar *elástica o plástica*; será elástica cuando el cuerpo recupera sus dimensiones originales al cesar la carga que la provoca (la energía de deformación almacenada se transforma en energía de recuperación al cesar las cargas que las generaron) y plástica o permanente en caso contrario.

La capacidad de un material a deformarse elásticamente se denomina *elasticidad* y la finalización del periodo elástico permite determinar la carga al límite elástico.

En experiencias de laboratorio se ha comprobado que la mayoría de los materiales empleados en ingeniería presentan la particularidad de que el límite elástico coincide prácticamente con el límite al cual los esfuerzos o cargas son proporcionales a las deformaciones que originan, verificándose lo expresado por Robert Hooke (1660).

Algunos materiales, entre ellos el caucho o la goma, no dan linealidad entre esfuerzos y deformaciones, aunque su elevada capacidad elástica resulte bien conocida.

El límite elástico se alcanza para muy pequeñas deformaciones, por lo que su determinación exige el empleo de instrumentos de gran sensibilidad y exactitud denominados calibres de deformaciones o extensómetros.

El periodo proporcional o elástico y la capacidad de deformación plástica de los materiales variarán según su naturaleza, condiciones de carga, por sus formas y temperaturas a que se encuentren sometidos.

ENSAYO DE TRACCIÓN – DIAGRAMA P- L

Un cuerpo se encuentra sometido a un esfuerzo de tracción simple, cuando sobre sus secciones transversales se le aplican cargas normales uniformemente repartidas y de modo de tender a producir su alargamiento.

Por las condiciones de ensayo, el de tracción estática es el que mejor determina las propiedades mecánicas de los metales, o sea aquellas que definen sus características de resistencia y deformabilidad. Permite obtener, bajo un estado simple de tensión, el límite de elasticidad o el que lo reemplaza prácticamente, la carga máxima y la consiguiente resistencia estática, en base a cuyos

valores se fijan los de las tensiones admisibles o de proyecto (σ_{adm}); y mediante el empleo de fórmulas empíricas conocer, aunque sólo aproximadamente, el comportamiento del material bajo otros tipos de cargas, esfuerzos o ensayos (fatiga, dureza, etc.).

$$\sigma_{et} = \frac{P}{S_0} \quad \sigma_{ET} = \frac{P_{max}}{S_0}$$

σ_n = tensión nominal o convencional en cualquier instante del ensayo
 σ_{ET} = resistencia estática nominal o convencional de tracción

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{ET}}{coef.seguridad(N)} \quad (\text{Material frágil})$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_P}{coef.seguridad(N)} \quad (\text{Material dúctil})$$



Fig. 3. Tracción simple

Cuando la probeta se encuentra bajo un esfuerzo estático de tracción simple, se alarga en mayor o menor grado según su naturaleza, a medida que crece la carga, pudiéndose estudiar gráficamente la relación de ésta con las deformaciones que produce. Estos gráficos, que pueden obtenerse directamente de la máquina de ensayo, permiten deducir las propiedades mecánicas de los metales, por lo que el conocimiento de sus puntos y zonas características reviste gran importancia.

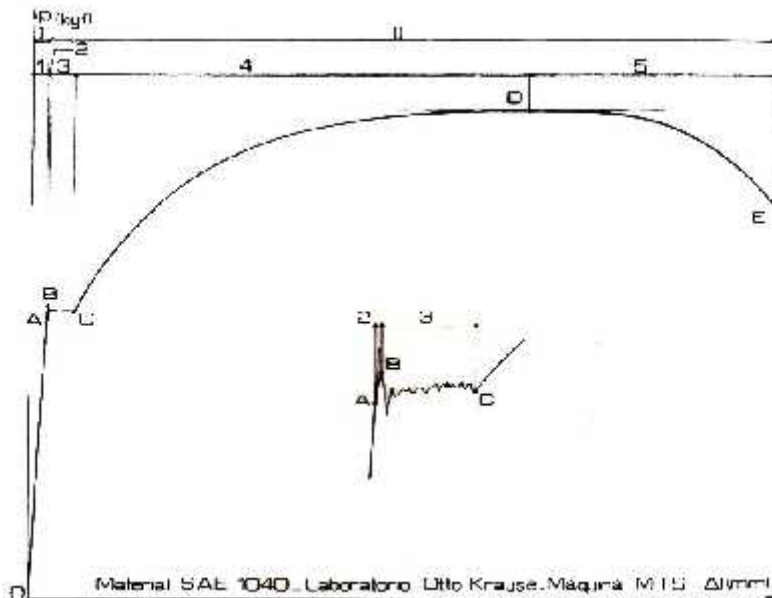


Fig. 4. Gráfico de ensayo de tracción estática de un acero dúctil

A = Límite de proporcionalidad (recta de Hooke)

B = Límite inicial de fluencia o elástico aparente.

C = Límite final de fluencia.

D = Carga máxima.

E = Rotura de la probeta.

I) PERIODO PROPORCIONAL

1 - Zona elástica

II) PERIODO PLASTICO

2 - Zona de alargamientos pseudoelásticos

3 - Zona de fluencia o escurrimiento.

4 - Zona de alargamiento homogéneo en toda la probeta.

5 - Zona de estricción.

El caso más típico nos lo presenta el gráfico de un acero dúctil indicado en la Fig. 4, en coordenadas $P - l$ expresadas en kN (kgf) y mm.

Se observa en el diagrama que el comienzo, desde el punto O hasta el A, está representado por una recta que nos pone de manifiesto la proporcionalidad entre los alargamientos y las cargas que los producen (R. Hooke). Dentro de este periodo y prácticamente hasta el punto A, los aceros presentan la particularidad de que la barra retorna su longitud inicial al cesar la aplicación de la carga por lo que recibe indistintamente el nombre de **periodo proporcional o elástico**.

Pasado el límite proporcional se presenta un pequeño tramo ligeramente curvo AB, que hace muy dificultoso determinar con exactitud el límite elástico en diagramas obtenidos directamente en la máquina de ensayos con registro de las deformaciones hasta la rotura del material, diferencia que depende además de la sensibilidad del equipo utilizado.

Por otra parte si consideramos que en la muy pequeña deformación plástica que tiene lugar entre los puntos AB está incluida la elástica diferida en el tiempo (anelasticidad), se justifica que se tome directamente al punto B como referencia de la propiedad elástica del material, al que se lo denomina **límite elástico aparente** que coincide con el superior de fluencia ("límite de fluencia").

El punto B marca el inicio de oscilaciones o pequeños avances y retrocesos de la carga con relativa importante deformación permanente del material. Este periodo de escurrimiento surge como consecuencia del fenómeno de fluencia que, en este caso y a temperatura ambiente, se produce sin aumento de carga, resultando una significativa característica de los aceros dúctiles.

Las oscilaciones en este periodo denotan que la fluencia no se produce simultáneamente en todo el material, por lo que las cargas se incrementan en forma alternada, fenómeno que se repite hasta que el escurrimiento es total y que nos permite distinguir los **límites superiores e inferiores de fluencia**. El límite elástico aparente puede alcanzar valores de hasta el 10 % mayores que el límite final de fluencia.

Hacemos notar que en los diagramas obtenidos directamente de las máquinas en ensayos a velocidad de deformación constante, el límite inicial de fluencia, que fija la "tensión al límite de fluencia", puede estar eventualmente afectado por la velocidad de deformación.

Exceptuando al que hemos considerado como límite de fluencia (superior inicial), este período carece en sí de importancia para determinar las propiedades mecánicas de los aceros, por lo que a sólo título de estudio se considera al límite final como el que mejor representa la característica del período, debido a que el inicial puede estar afectado por las causas enumeradas.

Más allá del punto final de fluencia C, las cargas vuelven a incrementarse y los alargamientos se hacen más notables, o sea que se entra en el período de las grandes deformaciones, las que son

uniformes en toda la probeta hasta llegar a D, por disminuir, en igual valor en toda la longitud del material, la dimensión lineal transversal.

El final del período de alargamiento homogéneo queda determinado por la carga máxima, a partir de la cual la deformación se localiza en una determinada zona de la probeta, provocando un estrechamiento de las secciones que la llevan a la rotura; al período DE se lo denomina de **estricción**.

En la zona plástica se produce, por efecto de la deformación, un proceso de endurecimiento, conocido con el nombre de **acritud**, que hace que al alcanzar el esfuerzo la resistencia del metal, éste al deformarse adquiera más capacidad de carga, lo que se manifiesta en el gráfico hasta el punto D. En el período de estricción, la acritud, si bien subsiste, no puede compensar la rápida disminución de algunas secciones transversales, produciéndose un descenso de la carga hasta la fractura.

Para entender este fenómeno, tengamos en cuenta que teóricamente una vez pasado el límite elástico o al iniciar su período de fluencia, el acero continuaría deformándose sin prácticamente elevación de la carga, tal como ocurre en la arcilla y materiales plásticos en general, por lo que el incremento de ésta se hace necesario para vencer el aumento de su resistencia, debida a la **acritud** (igual proceso ocurre con la gran mayoría de los metales, ensayados a temperatura ambiente).

Las deformaciones plásticas, resultantes del movimiento de las dislocaciones formadas durante la cristalización del metal, da como resultado la generación de nuevas imperfecciones, lo que aumenta notablemente la capacidad de deformación de los metales, aunque provoca un aumento de la tensión tangencial crítica necesaria para desplazarlas, éste es el fenómeno que se conoce con el nombre de **acritud**. El deslizamiento múltiple, cruzado o simultáneo en varios planos, que resulta común en los metales, favorece el desarrollo del fenómeno.

En la fluencia, la superficie pulida de la probeta (rectificada) se torna granulada, con la aparición, en algunos casos, de líneas formando ángulos de aproximadamente 45° , a las que se las reconoce como de deslizamiento, escurrimiento, de Luders o Hartmann, que coinciden con los planos en donde tienen lugar las máximas tensiones cortantes y que indicarían, por lo tanto, la pérdida de elasticidad de la barra por la acción de estos esfuerzos.

En este período el acero dúctil puede experimentar un incremento de deformación de hasta 0,025 cm/cm (0,5 cm para probetas normales de 20 cm de largo calibrado), sin aumento aparente de la carga, lo que hace que en las probetas industriales (sin pulir), el mismo se manifieste cuando se "descascarán" o comienzan a desprenderse pequeñísimas láminas de su superficie exterior, debido a que conservan su capa de óxido de laminación.

Fenómeno de Fluencia

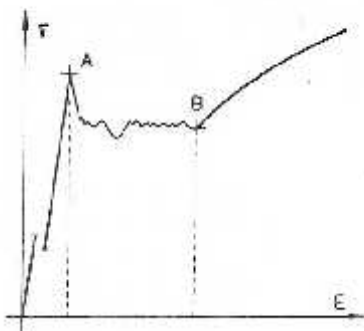


Fig. 5. Fenómeno de Fluencia

En la mayoría de los metales la transición entre el comportamiento elástico y plástico se produce en forma gradual y progresiva, fenómeno que se traduce en una separación lenta de la función lineal de la relación tensión-deformación (gráfico de ensayo), a partir del límite de elasticidad, produciéndose un aumento apreciable en la energía absorbida por el material durante el proceso de deformación.

Sin embargo en los aceros dúctiles y semidúctiles las deformaciones plásticas aparecen en forma abrupta y localizadas en una zona de la probeta tan pronto es alcanzado el límite elástico, para luego incrementarse a un nivel de tensión igual o menor que aquel, Fig. 5; este fenómeno recibe el nombre de **período de fluencia o escurrimiento**, pues el material fluye

o cede sin que aumente la tensión, siendo A y B los puntos inicial y final de fluencia.

En estos metales las primeras deformaciones plásticas, punto A, se localizan en zonas discretas de la probeta, llamadas bandas de Luder o Hartmann, que como es de esperar coinciden con los planos en que tienen lugar las máximas tensiones tangenciales (45 y 135 °).

Formadas las primeras bandas de deslizamiento, tienden a propagarse al resto del material, generando nuevas líneas de Luder a una velocidad que será función de la tensión aplicada, aumentando con ésta. Es importante tener en cuenta que la zona del material comprendida entre dos bandas de deslizamiento permanecen con deformaciones exclusivamente elásticas durante el período de fluencia, el que finaliza cuando las líneas de Luder o Hartmann se hayan propagado a todo el volumen de la probeta, punto B.

El fenómeno de fluencia es por lo tanto un período de deformaciones no homogéneas o localizadas que se propagan por la acción de la tensión aplicada. Este proceso está íntimamente relacionado con la presencia en la estructura de pequeñas cantidades de átomos de impurezas, así por ejemplo en los aceros porcentajes de carbono y nitrógeno mayores del 0,001 % son suficientes para la generación de la fluencia, pero cantidades mayores de 0,9 % la eliminan

DIAGRAMAS CONVENCIONALES Y REALES

Los diagramas de ensayos referidos a las cargas (P) y a los alargamientos (Δl) son de uso casi exclusivo del Laboratorio de Ensayos, siendo empleados en Resistencia de Materiales y en Proyecto los trazados en función de las tensiones (σ) y de las deformaciones unitarias (ϵ), que resultan más prácticos por referir los valores de cargas y alargamientos a la unidad de sección transversal y longitud inicial respectivamente.

El cambio de designación de los ejes coordenados no implica modificaciones de las formas de los diagramas, debido a que para pasar de carga a tensión, habrá que dividir aquélla por una constante dada por la sección inicial ($\sigma=P/S_0$) y para obtener las deformaciones unitarias, los alargamientos tendrán que referirse a una longitud inicial de ensayo, también supuestamente constante ($\epsilon=\Delta l/l_0$), bastará entonces un simple cambio de escalas al modificar la denominación de los ejes.

Es evidente que los diagramas referidos a las tensiones y deformaciones unitarias presentan la gran ventaja de independizar a los valores de las dimensiones que pueda presentar el material ensayado.

Obsérvese que hemos referido a las tensiones y deformaciones unitarias a valores de sección y longitud constantes, lo que hace que el diagrama resulte convencional; como estas dimensiones no se mantienen durante el ensayo, considerando su variación o verdadero valor para cada instante obtendremos el diagrama de tensiones y deformaciones unitarias reales, que como veremos difiere fundamentalmente del

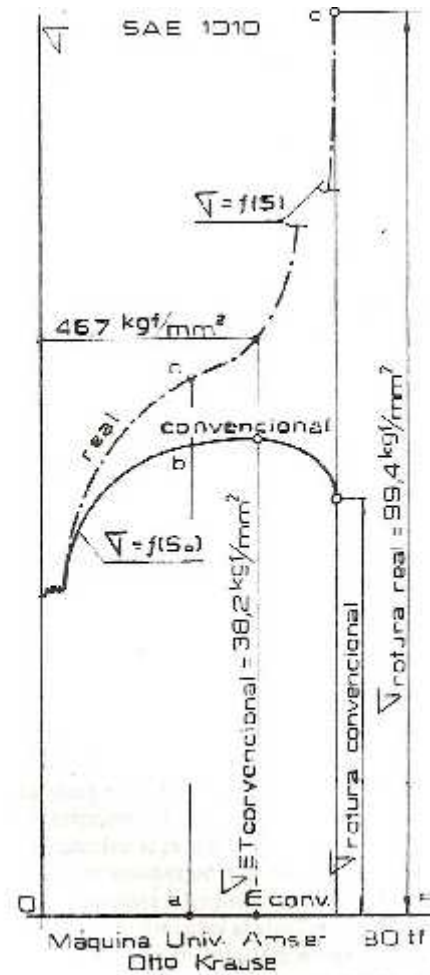


Fig. 6. Diagrama convencional y real

Diagrama Real de Tensiones

El diagrama convencional induce a creer que la probeta rompe para un valor de la tensión que no es la máxima, lo que contradice a todo concepto lógico, pero hemos aclarado que las tensiones en él representadas se calculan en base a su sección inicial y no a las instantáneas, o sea que no se tiene en cuenta la disminución de la sección al producirse el alargamiento del material.

Para obtener el diagrama de tensiones reales hasta la carga máxima, conociendo el convencional, se puede recurrir a varios métodos gráficos de mayor o menor exactitud, por lo que para su determinación emplearemos un procedimiento gráfico-analítico, que se basa en el hecho comprobado experimentalmente de que la deformación plástica hasta la carga máxima se produce a volumen constante, por lo que tenemos:

$$S_0 \cdot l_0 = S \cdot l \therefore S = S_0 \cdot \frac{l_0}{l}$$

además en todo momento se cumple que:

$$\sigma_r = \frac{P}{S}$$

en donde σ_r será la tensión real P y S valores instantáneos, luego:

$$\sigma_r = \frac{P}{S_0} \cdot \frac{l_0}{l}$$

en la que P/S_0 corresponden a la tensión convencional σ .

$$\sigma_r = \sigma \cdot \frac{l_0}{l}$$

l = longitud entre puntos de referencia en cada instante.

Como el diagrama está referido a los alargamientos unitarios convencionales, podemos calcular la tensión real en función de estos:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon$$

Reemplazando este valor en la fórmula anterior, obtenemos el de las tensiones reales en función de las convencionales para cualquier punto comprendido entre el límite de fluencia y la carga máxima:

$$\sigma_r = \sigma (1 + \varepsilon)$$

El procedimiento expuesto podría considerarse como definitivo en metales frágiles en los que una vez alcanzada la carga máxima sobreviene la rotura, en cambio en los dúctiles el proceso que tiene lugar en la estricción impone tener en cuenta otras consideraciones. En la estricción o deformación localizada se produce un efecto similar al de una entalla que modifica el estado de tensión en la sección afectada, por lo que la tensión que surge de considerar a la carga de fractura y la sección transversal de la probeta en ese instante, debe corregirse considerando el estado triaxial. Sin

embargo, para no extendernos en análisis que escapan a nuestra finalidad es que en la determinación de la curva de tensiones reales de un acero dúctil, indicada en la figura 3, consideramos como tensión real de rotura a la obtenida por:

$$\sigma_{rotura} = \frac{P_{rotura}}{S_{final}}$$

Resumiendo tenemos:

1) Para un punto b del diagrama convencional, la tensión real resulta:

$$\sigma_b = \sigma_{conv} (1 + \epsilon_a)$$

y así sucesivamente para cualquier punto comprendido entre el límite de fluencia y la carga máxima.

2) La tensión real de rotura, punto d, será:

$$\sigma_{rotura} = \frac{P_{rotura}}{S_{final}}$$

3) Finalmente, se unen todos los puntos determinados mediante una curva continua, que dará forma al diagrama de tensiones reales.

Generalmente el diagrama de tensiones reales se presenta con variación lineal a partir del punto correspondiente a la carga máxima o a la resistencia estática convencional.

El diagrama real sólo se construye a partir del límite inicial de fluencia, puesto que hasta ella reducción de sección es prácticamente nula, de lo que podemos deducir que para aquellos materiales que admiten poca deformación, la diferencia entre sus respectivos diagramas reales y convencionales será menor y con tendencia a superponerse, o sea que irá disminuyendo a medida que aumenta la fragilidad de los metales.

Diagrama Real de Deformaciones

La fórmula del alargamiento unitario aplicada en el laboratorio podría resultar casi real para deformaciones elásticas a las que les corresponden alargamientos sumamente pequeños, en cambio bajo un estado de tensión simple y en deformación plástica o permanente las deformaciones resultan del orden del milímetro, provocando para valores sucesivos una "apreciable" variación de longitud de referencia inicial. Este hecho hace que para obtener un valor representativo de la deformación real experimentada por el material, deban considerarse períodos de cargas con sus correspondientes variaciones de longitud hasta la finalización del ensayo.

La expresión matemática del alargamiento unitario real se debe a P. Ludwik (1909), que lo definió por la relación entre el incremento de deformación infinitesimal producido en la dirección de la tensión aplicada y la longitud instantánea:

$$\epsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

$$d\epsilon_r = \frac{dl}{l}$$

Evidentemente la deformación unitaria convencional, que como dijimos es la de aplicación para indicar la propiedad mecánica de deformabilidad de un material, difiere de la real y la relación entre ambas resulta:

Convencional:

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0} - 1 \quad \therefore \varepsilon + 1 = \frac{l}{l_0}$$

Real:

$$\varepsilon_r = \ln \frac{l}{l_0}$$

En donde:

$$\varepsilon_r = \ln(\varepsilon + 1)$$

Sin embargo, la fórmula que permite determinar las deformaciones reales en función de las convencionales es sólo aplicable al período comprendido entre la fluencia y la carga máxima, en donde la variación de la dimensión lineal transversal es uniforme entre marcas o puntos de referencia de la probeta (l_0), lo que no ocurre en el período de estricción en donde la deformación se localiza en una determinada zona.

Diagrama Obtenido Para Distintos Metales

Los diagramas de tracción varían de acuerdo con las distintas propiedades de los materiales; así por ejemplo, los materiales dúctiles rompen con mucha deformación y los frágiles generalmente cuando la deformación es uniforme en toda la probeta, es decir, que alcanzada la carga máxima se produce la rotura sin entrar en el período de estricción.

Dentro de los materiales dúctiles y frágiles se pueden clasificar respectivamente, en muy dúctiles a los que presentan mucha estricción, y muy frágiles en los que la rotura se produce inmediatamente después de pasado el límite de elasticidad.

En los aceros al carbono se puede obtener una gran variedad de gráficos, como se ve en la Fig. 7, en donde se pone de manifiesto que, al aumentar el porcentaje de carbono aumenta la resistencia del material, pero al mismo tiempo disminuye el alargamiento y, por consiguiente, la ductilidad del mismo.

El hecho de que los períodos iniciales rectos se superpongan nos está indicando que obedecen a una misma ecuación proporcional ($\sigma = E\varepsilon$), y por lo tanto que los distintos aceros presentan módulos de elasticidad (E) prácticamente iguales; la falta de sensibilidad debido a las escalas adoptadas, no permiten registrar las pequeñas diferencias que pudieran existir.

En estos gráficos puede también observarse que a medida que aumenta la resistencia del material ensayado, va desapareciendo el período de fluencia o sea que el límite final se eleva hasta prácticamente coincidir con la curva continua de deformaciones.

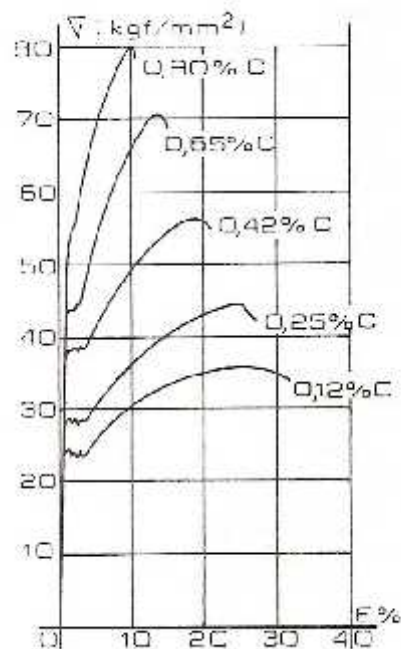


Fig. 7. Diagramas de tracción estática de aceros al carbono.

La comparación de los diagramas se hace posible, pues todos ellos fueron tomados a temperatura ambiente y las probetas sometidas a iguales incrementos de cargas en el tiempo, lo que tiene gran importancia, debido a que el aumento de la velocidad de ensayo produce una elevación del límite elástico y una disminución en la deformación del metal, aunque no afecta a la tensión de rotura, lo que nos dice que la forma de aplicación de las cargas, siempre que no se superen ciertos valores, influye en el límite elástico y no en su cohesión o resistencia.

Los gráficos obtenidos con metales distintos del acero que no han sido endurecidos por deformación, se presentan sin límite de elasticidad ni zona de fluencia, excepto algunas aleaciones de cobre y aluminio, que presentan sucesivas fluencias en la zona plástica, con grandes o pequeños alargamientos, según sean dúctiles o frágiles.

Los diagramas comparativos de la Fig. 8 dan una idea más exacta del comportamiento de algunos metales a la tracción.

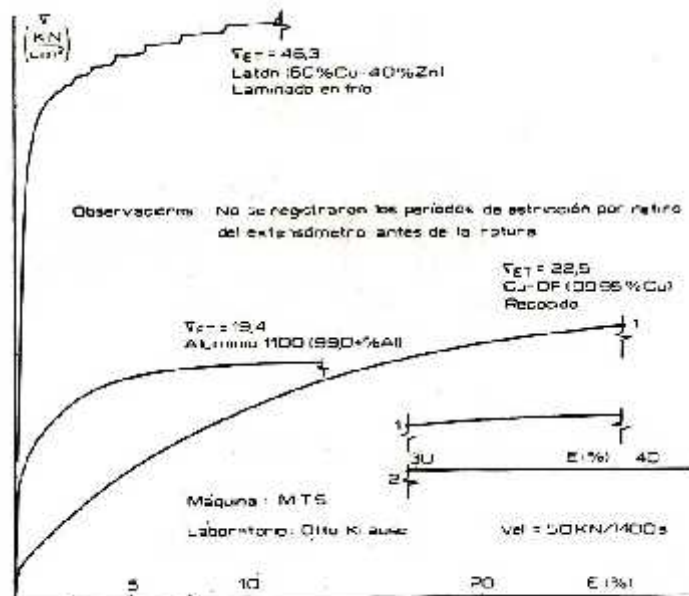


Fig. 8. Diagramas de tracción de distintos metales y aleaciones.

PROBETAS PARA TRACCIÓN

Las probetas para los ensayos de tracción pueden ser, como ya se ha visto, industriales o calibradas; las primeras se presentan en barras o perfiles de secciones más o menos constantes y sirven exclusivamente para ensayos de verificación; en cambio, las calibradas, se emplean en experiencias más rigurosas y adoptan formas perfectamente cilíndricas o prismáticas, con extremos ensanchados, no sólo para facilitar su sujeción en la máquina de ensayo, sino que para asegurar la rotura dentro del largo calibrado de menor sección, en la cual se marcan los denominados *puntos fijos o de referencia* a una distancia inicial preestablecida (l_0), que permitirá después de la fractura, juntando los trozos, determinar la longitud final entre ellos (l).

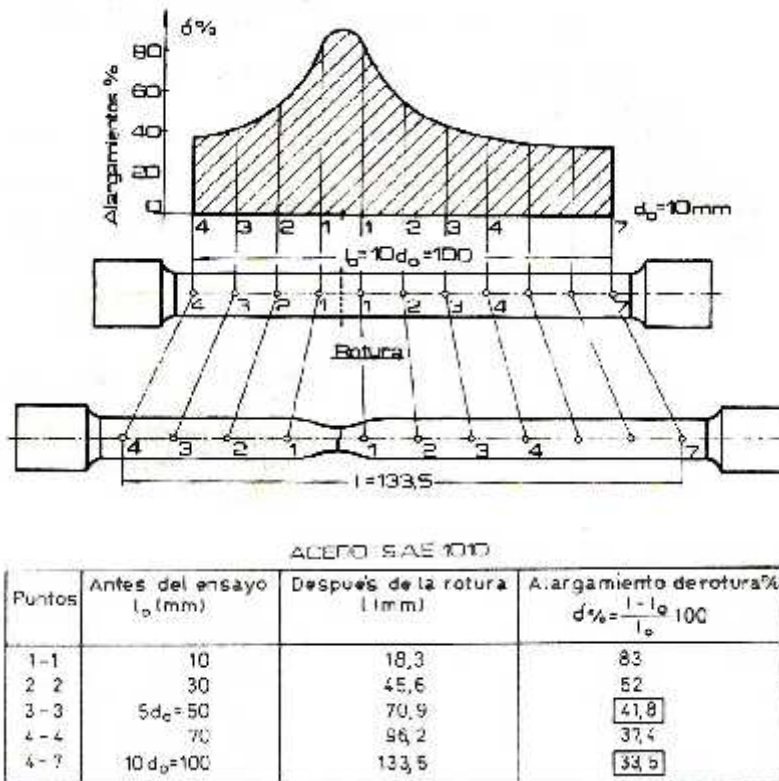


Fig. 9. Variación del alargamiento de rotura con la longitud inicial de un acero SAE 1010

El alargamiento ($\Delta l = l - l_0$) se habrá calculado así con referencia a una determinada longitud inicial y en su valor estará incluida la deformación uniforme de toda la probeta hasta la carga máxima y principalmente, en los casos de materiales dúctiles, la que corresponde al período de estricción, que afectará a una zona mayor, aún para un mismo metal, cuando sus probetas presentan mayores secciones transversales, obteniéndose por lo tanto, en estos casos, mayores alargamientos a igualdad de valores de l_0 . A su vez, para idénticas secciones, el efecto de la estricción será más notorio para menores valores de l_0 , por lo que resulta un mayor alargamiento de rotura.

Estos hechos han motivado la normalización de la longitud inicial, estipulándose que dos o más ensayos pueden compararse en sus alargamientos, si las probetas son geoméricamente semejantes, lo que se logra cuando l_0 es proporcional al diámetro o raíz cuadrada de la sección.

$$l_0 = K \cdot \sqrt{S_0} \therefore K = \frac{l_0}{\sqrt{S_0}}$$

o sea que los ensayos sobre probetas distintas resultan comparables si se cumple que:

Ley de semejanza: $\frac{l_0}{\sqrt{S_0}} = \frac{l_0'}{\sqrt{S_0'}} = \dots = K$

Si se toma la inversa de esta igualdad se obtiene la ley de Borda, conocida como ley de similitud.

La tabla siguiente nos da las variaciones de la ley de semejanza según las distintas normas, y la longitud inicial, que por comodidad de medida, se adopta para probetas cilíndricas.

Norma	Probetas	d_0	Ley de Semejanza	l_0
IRAM	larga corta	s/ norma 102	$l_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$ $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$	$10 \cdot d_0$ $5 \cdot d_0$
ASTM	Standard(pulg.) Standard(métrica)	$0,5" = 12,7mm$ $12,5 \pm 0,2$	$l_0 = 4,5 \cdot \sqrt{S_0}$ $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$	$4 \cdot d_0 = 2"$ $5 \cdot d_0$
Francesa y Española	larga corta	$27,7mm$ $13,82mm$	$l_0 = 8,16 \cdot \sqrt{S_0}$	$200mm$ $100mm$
BSI	Standard	$0,798" = 20,27mm$	$l_0 = 4 \cdot \sqrt{S_0}$	$3" = 76,2mm$
DIN	larga corta	s/norma 50.125	$l_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$ $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$	$10 \cdot d_0$ $5 \cdot d_0$

Modo y tiempo de Aplicación de las Cargas

Las cargas deben aplicarse de tal manera que resulten uniformemente distribuidas sobre la sección transversal del material, condición que se cumple utilizando dispositivos autocentrantes.

Tratándose de ensayos estáticos el incremento de las cargas se efectúa en forma muy lenta para evitar los efectos de las fuerzas de inercia, velocidad que se fija según las normas y materiales, adoptándose generalmente una variación de $0,1 \text{ kgf/mm}^2$ por segundo hasta alcanzar el límite de fluencia, a partir del cual puede llegarse como máximo a 50 kgf/mm^2 por minuto.

El incremento de la velocidad de la aplicación de las cargas de ensayo produce un retraso en la aparición de las deformaciones plásticas y un aumento en la resistencia del material.

Si las cargas se aplican muy lentamente se obtiene una disminución del límite de fluencia y un aumento de la resistencia con disminución de la ductilidad.

Por lo tanto, es necesario mantener la velocidad de aplicación de las cargas en los límites que fijan las normas.

En general las condiciones de ensayo según la norma ASTM E 8 -80, se fijan según los materiales, en base a cinco criterios diferentes:

- 1) *Velocidad o desplazamiento en vacío del dispositivo transmisor de carga:* Se determina por el avance de la mesa sin carga y por minuto.
- 2) *Velocidad de separación de las mesas de la máquina durante el ensayo:* Corresponde a una determinación igual a la anterior, pero en carga.
- 3) *Por tiempo de ensayo:* Corresponde al tiempo, en minutos o segundos, transcurrido desde el momento de aplicación de la carga al material, hasta el instante de su rotura. En este caso, puede estipularse al tiempo necesario para cumplir parte de la experiencia como condición de aplicación de carga.
- 4) *Por incremento del esfuerzo:* Está dado por el aumento de la tensión aplicada por minuto.
- 5) *Velocidad de alargamiento:* Se indica por el incremento del alargamiento unitario por minuto.

DETERMINACIONES A EFECTUAR EN UN ENSAYO DE TRACCIÓN ESTÁTICO

El ensayo de tracción es el que mejor define las propiedades mecánicas de los metales sometidos a la acción de cargas estáticas.

Estas propiedades quedan determinadas si se calcula la aptitud del material a resistir las cargas que le pueden ser aplicadas (propiedades de resistencia) y las deformaciones que experimenten por la acción de éstas (propiedades de deformabilidad)

1° Propiedades Mecánicas de Resistencia

Fluencia y límite elástico

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. Para los metales que experimentan la transición elastoplástica de forma gradual, el punto de fluencia puede determinarse como la desviación inicial de la linealidad de la curva tensión-deformación; este punto se denomina a menudo límite proporcional, y está indicado por P en la Fig. 10. En algunos casos, la posición de este punto 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 del diagrama de la 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 . Esto se muestra en la Fig. 10 a.

Para aquellos materiales que tienen una región elástica no lineal, 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 plástica (p. Ej. =0,005).

Algunos aceros y otros materiales exhiben el tipo de diagrama tensión-deformación mostrado en la Fig. 10. La transición elastoplástica está muy bien definida y ocurre de forma abrupta y se denomina fenómeno de discontinuidad del punto de fluencia. 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, denominado punto de fluencia inferior. 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. Por consiguiente, no es necesario utilizar el método del 0,2 % de deformación para estos materiales.

La magnitud del límite elástico de un metal es una medida de su resistencia a la deformación plástica. Los límites elásticos están comprendidos entre 35 MPa (5000 psi) para un aluminio de baja resistencia hasta valores superiores a 1400 MPa (200000 psi) para aceros de alta resistencia.

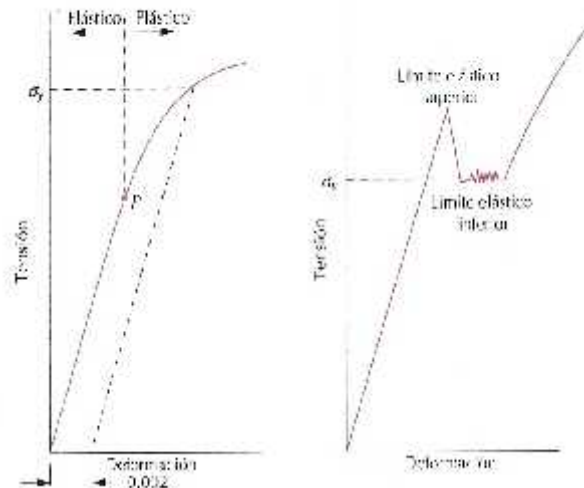


Fig. 10. (a) Curva de tracción típica de un metal que muestra las deformaciones elástica y plástica, el límite proporcional P y el límite elástico determinado como la tensión para una deformación plástica del 0,002. (b) Curva de tracción típica de algunos aceros que presentan el fenómeno de la discontinuidad de la fluencia.

Tensión al límite inicial de fluencia: $\sigma_f = \frac{P_f}{S_0}$

Si bien los límites inferiores de fluencia pueden resultar más exactos, por no encontrarse afectados por las fuerzas de inercia que se originan al aplicar las cargas de tracción, se fija como valor comparativo el que corresponde al superior inicial, que permite ser determinado más fácilmente en el gráfico de ensayo.

Tensión al límite convencional 0,2: $\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{S_0}$

En los metales que no presentan fluencia (aceros de alta resistencia, mejorados por tratamientos térmicos o endurecidos por deformación y los no féreos), a los efectos comparativos se determinan el o los límites convencionales que como ya vimos no representan una característica física del metal y sólo corresponden a la tensión capaz de producir una deformación permanente preestablecida por las normas (0,01; 0,1; 0,2 ó 0,5 % l_0).

Si bien es de suponer que el límite convencional "equivale" al de fluencia, su comparación no puede efectuarse teniendo en cuenta que éste depende fundamentalmente de la estructura cristalina.

La determinación de los límites convencionales requiere el empleo de extensómetros o máquinas con registradores electrónicos y puede realizarse aun en aquellos metales que presenten fluencia en sus diagramas de ensayo.

Resistencia Estática a la Tracción

Después de iniciarse la deformación plástica, la tensión necesaria para continuar la deformación en los metales aumenta hasta un máximo y después disminuye hasta que finalmente se produce la fractura. La resistencia a la tracción es la tensión en el máximo del diagrama tensión-deformación nominales.

Del gráfico de ensayo pueden determinarse el valor de la carga máxima, que permiten calcular las tensiones convencionales que fijan las propiedades de resistencia. La carga máxima también se registra en el cuadrante de la máquina de ensayo (registro analógico) y en algunos de sus tipos, además, en registros digitales y/o computarizados.

Resistencia estática a la tracción: $\sigma_{ET} = \frac{P_{\max}}{S_0}$

Las resistencias a la tracción pueden variar entre 50 MPa (7000 psi) para un aluminio hasta valores tan altos como 3000 MPa (450000 psi) para aceros de alta resistencia. Generalmente cuando se menciona la resistencia de un metal para propósitos de diseño se indica el límite elástico. Esto se debe a que cuando se alcanza la resistencia a la tracción, la deformación plástica que habría sufrido el material sería tan grande que no sería útil. Además, la resistencia a la fractura no se indica usualmente en el diseño en ingeniería.

2° - Propiedades Mecánicas de Deformabilidad

Alargamiento de rotura

Si antes de comenzar la experiencia se marcan sobre la probeta, en una generatriz o recta, los puntos de referencia de acuerdo con la norma aplicada (l_0), después del ensayo, juntando los trozos, es factible medir la distancia que los separa (l), de modo que el *alargamiento total* resulta:

$$\Delta l = l - l_0$$

Conocido este valor, se puede determinar el alargamiento de rotura, que no es más que el unitario convencional correspondiente a la fractura; por lo tanto y con el objeto de distinguirlo, se lo indica con δ en lugar de ϵ , como se estableció para cualquier otro punto del diagrama.

$$\delta \% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100$$

Determinación de la Longitud Final entre Puntos Fijos: Para determinar correctamente el alargamiento unitario de rotura es necesario medir, con la mayor exactitud posible, las máximas deformaciones que experimenta la probeta, lo que se consigue si la zona de estricción se encuentra lo suficientemente alejada de las marcas que fijan la longitud inicial l_0 .

Es así que las normas IRAM y DIN exigen, para aceptar los valores de los alargamientos unitarios de rotura, que "la fractura tenga lugar dentro del tercio medio de la longitud entre marcas".

Cuando se ensayan probetas industriales se marcan tres o más longitudes l_0 , de manera de aumentar la posibilidad de cumplir, para algunas de ellas, con la condición dada por las normas. (Fig. 11)

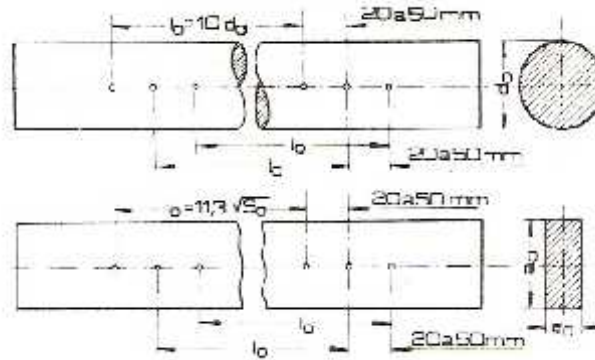


Fig. 11. Marcación de probetas industriales

Si las probetas son calibradas, la marcación anterior no puede realizarse por el ensanchamiento que presentan en sus cabezas, por lo que, para evitar la repetición de la experiencia, en el caso de no obtenerse la fractura en el tercio medio, se recurre a un procedimiento que resulta aceptable si se considera al material como de iguales propiedades en todas sus secciones (isótropo).

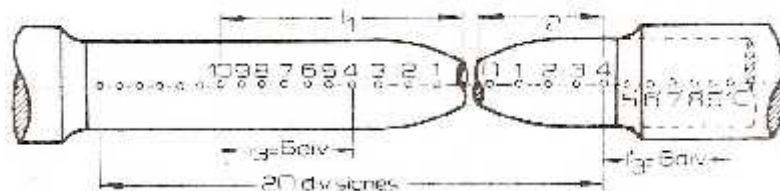


Fig. 12. Medición de l_0 con rotura fuera del tercio medio en probeta calibrada

Este método indica que la longitud inicial debe marcarse en 20 ó 10 partes iguales, según que se trate de probetas largas o cortas. Determinándose la longitud final de rotura de la siguiente manera:

Si la fractura se produce dentro del tercio medio se unen los trozos y se mide directamente l entre marcas extremas, en cambio si ello no ocurre se numerarán los puntos como se indica en la Fig. 12, llamándose 0 al más próximo a la rotura en el trozo corto.

Para determinar la longitud final se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se supone que la fractura se produce en el centro de la probeta, caso ideal, o en un punto muy próximo a él.
- Se acepta que el metal experimenta iguales deformaciones a ambos lados de la rotura.

De acuerdo con el primer criterio será necesario medir 10 puntos a cada lado de la fractura, lo que sólo puede realizarse en el trozo izquierdo de la figura (l_1); sobre el lado derecho se miden exactamente cuatro divisiones l_2 , faltando, para completar el total, seis divisiones l_3 .

Si el material es isótropo, los puntos equidistantes de la rotura experimentarán iguales deformaciones, por lo que la longitud l_3 resulta igual a la l_2 .

La longitud final será entonces igual a:

$$l = l_1 + l_2 + l_3 = (l_1 + l_2) + l_3$$

Las normas ASTM, si bien no indican este procedimiento, estipulan, como en el caso anterior, que la fractura se deberá producir dentro del tercio medio de la longitud calibrada, en caso contrario aconsejan realizar nuevas experiencias, siempre y cuando el alargamiento obtenido no esté comprendido en el especificado para el material ensayado.

Estricción

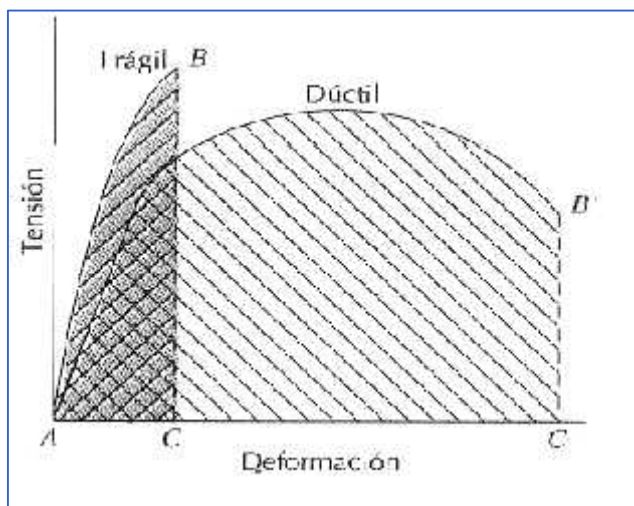
Como sabemos, una vez alcanzada la carga máxima se produce un estrangulamiento en una zona determinada de la probeta. Esta disminución de sección hace que se llegue a la rotura cuando la carga es inferior a la máxima aplicada, diferencia que se acrecienta con la ductilidad del material.

La estricción será entonces, la disminución relativa porcentual de la sección transversal de rotura.

$$\phi \% = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100$$

(S: Sección final)

3° - Otras Propiedades Mecánicas



Ductilidad

La **ductilidad** es otra importante propiedad mecánica. Es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada 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 ilustra esquemáticamente en la Fig. 13.

La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como *alargamiento relativo porcentual* (%), o bien mediante el

Fig. 13. Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura

porcentaje de reducción de área o estricción (%).

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.

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 5%.

Por consiguiente, a partir de ensayos de tensión-deformación se pueden determinar importantes propiedades mecánicas. La tabla siguiente presenta valores típicos a temperatura ambiente del límite elástico, la resistencia a la tracción y ductilidad de algunos de los metales más comunes, los cuales han sido tratados térmicamente para que tengan una baja resistencia. Estas propiedades son sensibles a la deformación previa, la presencia de impurezas, y/o a cualquier tratamiento térmico a que haya sido sometido el material.

El módulo de elasticidad es un parámetro mecánico que es insensible a estos tratamientos. De la misma manera que el módulo de elasticidad, el límite elástico y la resistencia a la tracción disminuyen al aumentar la temperatura; justamente ocurre lo contrario en el caso de la ductilidad, la cual usualmente aumenta con la temperatura. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra cómo la curva de tracción del hierro cambia con la temperatura.

Propiedades mecánicas típicas de varios metales en el estado recocido y de pureza comercial			
Metal	Límite elástico [psi (MPa)]	Resistencia a la tracción [psi (MPa)]	Ductilidad % EL (en 2 pulg.)
Oro	Nil	19000 (130)	45
Aluminio	4000 (28)	10000 (69)	45
Cobre	10000 (69)	29000 (200)	45
Acero	19000(130)	38000 (262)	45
Níquel	20000(138)	70000 (480)	40
Titanio	350000(240)	48000 (330)	30
Molibdeno	820000(565)	95000 (655)	35

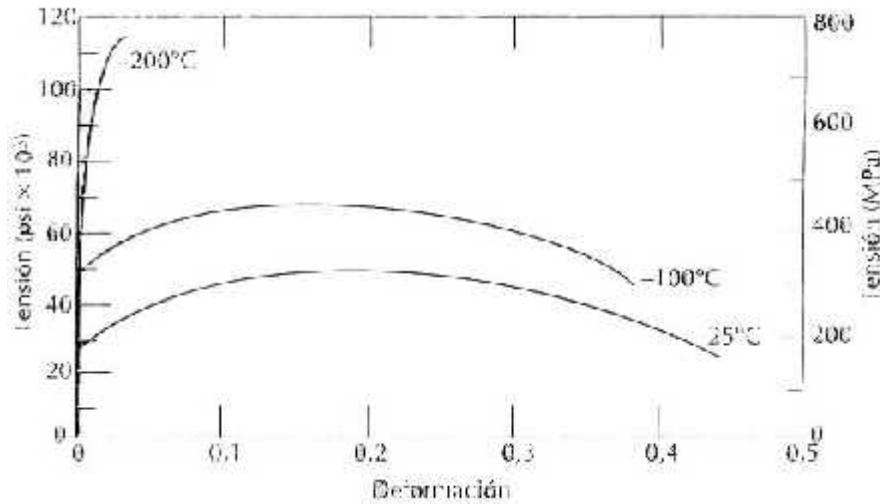


Fig. 14: Curvas típicas de tracción de hierro a tres temperaturas.

Resiliencia

La resiliencia es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformando y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar. 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.

Matemáticamente, el módulo de resiliencia de una probeta sometida a una carga uniaxial es justamente el área debajo de la curva tensión-deformación hasta la fluencia (Figura 16), o bien

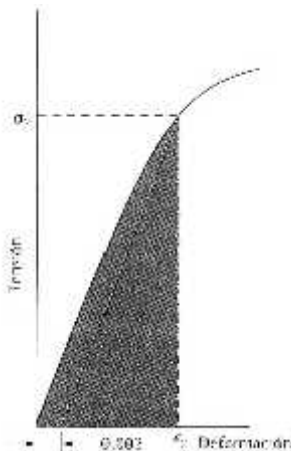
$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma \cdot d\epsilon$$

Suponiendo que la región es elástica lineal:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y$$

en donde ϵ_y es la deformación en el límite elástico.

Las unidades de resiliencia son el producto de las unidades de los ejes del diagrama tensión-deformación. En el Customary U.S., esta unidad es pulgada-libras fuerza por pulgada cúbica (pulg.-lbf /pulg.³, equivalente al psi), mientras que en el Sistema Internacional es joules por metro cúbico (J/m³, o de forma equivalente Pa). Tanto pulgadas por libra fuerza como joules son unidades de energía, y por tanto el área bajo la curva tensión-deformación representa absorción de energía por unidad de volumen (en pulgadas cúbicas o en metros cúbicos) de material. La incorporación de la Ecuación 1 en la Ecuación 2 se tiene



$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{1}{2} \sigma_y \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

Fig. 15. Esquema donde se indica cómo se obtiene el módulo de resiliencia (correspondiente al área sombreada) a partir de la curva de tracción n20

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

Tenacidad

La tenacidad de un material es un término mecánico que se utiliza en varios contextos; en sentido amplio, es una medida de la capacidad de un material de absorber energía 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 una entalla (o sea un concentrador de tensiones) está presente, 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 σ - hasta la carga máxima. 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 tanto resistencia como ductilidad; y, a menudo, los materiales dúctiles son más tenaces que los frágiles. Esto se ve en la Fig. 13, en la cual están representadas las curvas tensión-deformación para ambos tipos de materiales. Por consiguiente, aún cuando los materiales frágiles tienen mayor límite elástico y mayor resistencia a la tracción, 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 Fig. 13.

FRACTURAS POR TRACCIÓN

Cuando un metal es sometido a un esfuerzo de tracción, es posible obtener como se ha visto, tensiones normales y tangenciales las que tienden a separar o deslizar a los átomos de sus cristales o granos.

Desde el comienzo de la aplicación de la carga, dichas tensiones producen deformaciones que varían según la naturaleza de los cristales del material que se ensaya, así por ejemplo en los materiales dúctiles las deformaciones son elásticas hasta cierto límite, pasado el cual, las tensiones tangenciales provocan deslizamientos permanentes en los planos cristalográficos de aquéllos, dando lugar a las deformaciones plásticas, que aumentarán hasta alcanzar la rotura. Estas máximas tensiones cortantes tienen lugar a 45 y 135 grados con el eje longitudinal de la probeta, pudiéndose observar, en algunos casos, la aparición, sobre la superficie exterior de la misma, de las líneas de máximo deslizamiento.

Los materiales frágiles son aquéllos que ofrecen gran resistencia al deslizamiento, evitando por consiguiente las grandes deformaciones aun para valores máximos de los esfuerzos tangenciales, por lo que la rotura se produce por separación o arrancamiento debido a la acción de la tensión normal de tracción.

Al analizar las fracturas por tracción no estudiaremos casos particulares, tomando únicamente ejemplos que podemos denominar típicos, como son los que se presentan en los distintos materiales ferrosos, ofreciéndonos el acero dulce y la fundición fracturas tipo de materiales dúctiles y frágiles.

La rotura de una probeta cilíndrica de acero dulce podemos atribuirle a su poca aptitud para resistir los efectos de los esfuerzos tangenciales, los que al producir una disminución en sus secciones (estricción), por deslizamiento en sus cristales, hace que el estado de tensión simple y homogéneo se transforme, por un efecto similar al de entalladura, en un estado triple y heterogéneo o, en otras palabras, que aparecen tensiones transversales de tracción cuyos efectos máximos tienen lugar en el eje de la probeta, disminuyendo hacia los contornos de modo que éstos están afectados fundamentalmente, por esfuerzos simples de tracción como se observa en la Fig. 16.

El estado de tensión triple, que aparece al comenzar la estricción, hace que el esfuerzo tangencial que provoca los corrimientos cristalográficos, disminuya en su valor crítico, por lo que al reducirse la deformación resulta posible aumentar la tensión aplicada con tendencia a volver a aquel valor, lo que no se consigue pues antes se llega al valor crítico de la tensión normal o aquella capaz de vencer la cohesión entre los cristales.

Resumiendo diremos que en un acero dúctil la máxima deformación se produce en planos a 45 y 135 grados hasta el instante de alcanzarse la carga máxima o comienzo de la estricción, la que genera un estado triaxial cuya tensión normal máxima resulta la crítica, produciéndose la fractura propiamente dicha en un plano normal, al vencerse la cohesión entre cristales (arrancamiento).

La forma de la fractura en estos casos es la denominada de *cráter o copa y cono*, Fig. 17. a, que se inicia por una pequeñísima fisura en el centro de la sección, originada al separarse los granos que están en condiciones más desfavorables, la que se propaga rápidamente hasta alcanzar las proximidades de sus bordes, instante en que actúan las pordeslizamiento.

La rotura de la fundición se produce, como ya dijimos, exclusivamente por decohesión, en planos donde tienen lugar las máximas tensiones normales tal como se indica en la Fig. 17.

Si bien el estudio anterior se puede admitir como general, para diferenciar por la forma de la fractura a los materiales dúctiles y frágiles, todavía cabe indicar que aun dentro de estos tipos se presentan ligeras variaciones, las que, analizadas juntamente con el tamaño y color del grano, permiten deducir sus características mecánicas y la calidad.

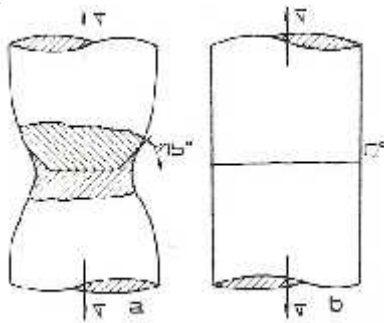


Fig. 17. Roturas en metales a) dúctiles b) frágiles

En los aceros, a medida que aumenta su resistencia, va disminuyendo la estricción, y la copa o cráter tiende a desaparecer o a presentar ligeras variantes. Así, por ejemplo, un acero un poco más resistente y menos dúctil que el de la Fig. 18 nos dará iguales características que éste en la fractura (grano medio y color mate en el centro, con contorno de grano más fino y brillante), con bordes parciales (el cono presenta en su periferia parte del contorno que le falta al cráter).

Los aceros resistentes rompen en secciones transversales con estructura sedosa y pequeñas rebabas periféricas, cuando son resistentes y tenaces la superficie de rotura indica nervaduras radiales y pequeñas rebabas.

Las fundiciones de hierro se fracturan según planos normales, con grano grueso y de color gris con tendencia a blanco brillante según su naturaleza.

Los metales no ferrosos pueden romper de variadas formas, pudiendo llegar a fracturas oblicuas en planos variables entre 45 y 55° en aleaciones de aluminio consideradas resistentes; e estas condiciones no se presentan deformaciones que provoquen estricción, aunque la fractura se por el deslizamiento que generan las tensiones tangenciales que le son críticas.

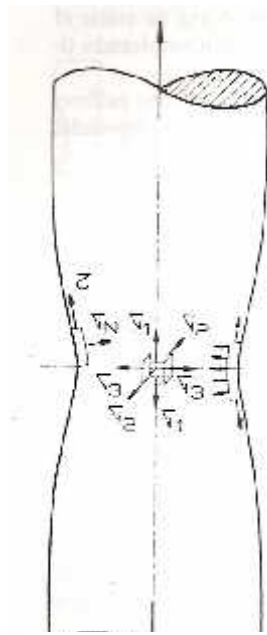


Fig. 16. Tensiones en tracción



Fig. 18. Fractura de fundición gris

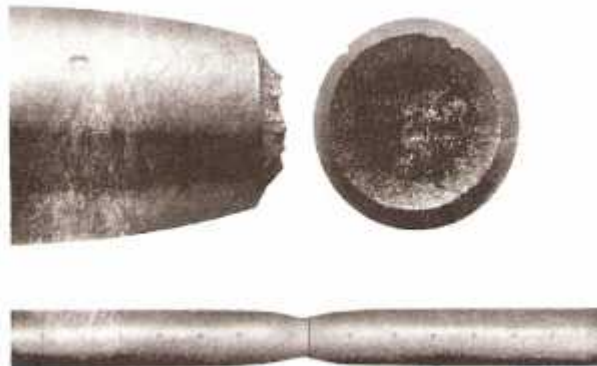


Fig. 19. Fractura de acero dúctil

ELASTICIDAD Y PLASTICIDAD

Si recordamos algunos conceptos, una deformación es elástica cuando desaparece completamente al anular la causa que la produjo; en cambio, una deformación plástica es aquella que no desaparece con la anulación de la causa.

Sobre la base de estas definiciones, se han dividido los materiales en elásticos y plásticos, respectivamente.

Los cuerpos sólidos, en general, presentan deformaciones que se componen de una parte elástica y de una plástica, cuya proporción relativa varía en los distintos materiales. Además, no debe perderse de vista que muchos materiales son elásticos hasta una cierta tensión, pasada la cual dejan de serlo para manifestarse como plásticos, como sería el caso de los aceros y el aluminio. Por otra parte, materiales con franco comportamiento plástico se pueden manifestar como elásticos cuando las cargas solicitantes son suficientemente pequeñas y, además, actúan durante un intervalo de tiempo muy reducido. Así, por ejemplo, una esferita apoyada sobre una superficie de asfalto se va hundiendo paulatinamente con el tiempo por su propio peso, mientras que la impresión que produce la misma esferita en el asfalto por efecto de un impacto, desaparece en un tiempo más o menos breve luego de la eliminación de la causa que la produjo.

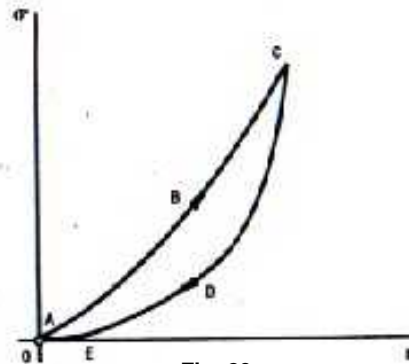


Fig. 20

De estas consideraciones se desprende que para definir elásticamente un cuerpo se lo debe hacer en función de una tensión y del tiempo.

Veamos un ejemplo: si se estira en forma paulatina una probeta de goma (Fig. 20) se observa que una vez cesada la sollicitación, que se ha verificado según la curva ABC, la probeta no recupera inmediatamente su longitud primitiva. La descarga sigue la curva CDE, quedando una deformación EA que disminuye gradualmente; es decir que el material manifiesta un efecto elástico posterior o posefecto elástico. De esta experiencia se deduce que la deformación ha sido elástica retardada, pues ha desaparecido con el tiempo.

Teniendo en cuenta lo dicho, podemos definir la deformación elástica del siguiente modo:

Una deformación es elástica, en general, cuando desaparece completamente una vez que cesa la causa que la produjo, independientemente del tiempo.

Dentro de esta definición están implícitamente contenidas las dos siguientes:

- deformación elástica instantánea o ideal (o recuperación elástica instantánea) es la que se manifiesta (o desaparece) simultáneamente con aplicación (o supresión) del esfuerzo;
- deformación elástica retardada (o recuperación elástica retardada) es la que crece (o se anula) en función del tiempo para un esfuerzo constante.

En los materiales que emplea la ingeniería se manifiestan los dos tipos de deformación elástica superpuestos, ya que muy raras veces se presenta la deformación elástica instantánea aisladamente, salvo en algunos casos, como el de las oscilaciones de alta frecuencia de cristales de cuarzo, por ejemplo, donde la deformación se produce en un tiempo sumamente pequeño. En cambio, en los casos más comunes de sollicitación, el factor tiempo no es despreciable; teniendo en cuenta, además, que la mayoría de los materiales sólidos son policristalinos, la influencia del tiempo es más notable aún.

Posefecto elástico

El posefecto elástico se manifiesta en los materiales en forma de una recuperación de su configuración primitiva luego de una deformación. Esa recuperación es función del tiempo y, además, de la tensión máxima a que ha sido sometido el material.

De acuerdo con eso, el posefecto elástico es una manifestación de la elasticidad retardada con signo contrario.

Elasticidad

En la Fig. 21 se ha representado una curva OABC que corresponde a un ensayo de tracción de un cierto material, en la que a un tramo recto OA sigue uno curvo formado por una rama ascendente AB y otra descendente BC, con una tangente común en el punto B.

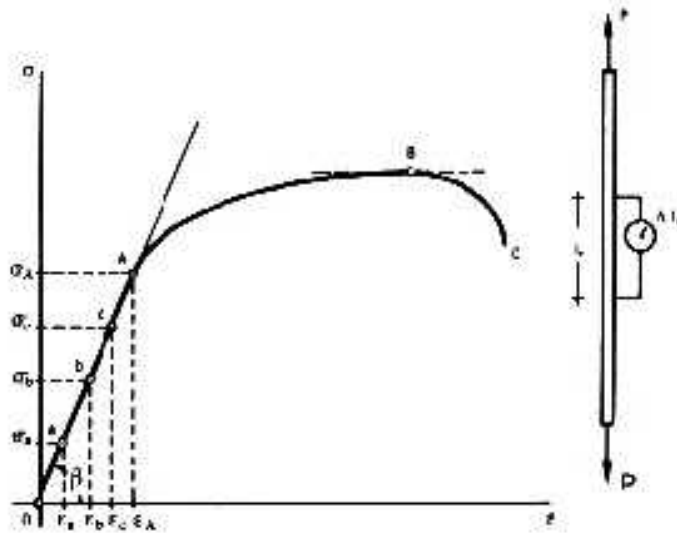


Fig. 21. Curva de un ensayo de tracción

La curva así trazada refleja el hecho de que el material ha sido sometido a tensiones constantemente crecientes hasta el punto B. En esas condiciones se cumple que $\sigma = P/S_0$, donde S_0 es la sección original de la barra antes de iniciar el ensayo y P la carga actuante. ϵ es $\Delta l/l_0$, siendo l_0 la base de medida del extensómetro y Δl su variación por efecto de las cargas P .

En el tramo recto OA se verifica que para cualquier punto intermedio la elongación es directamente proporcional a la tensión σ , ya que se cumple

$$\frac{\sigma_a}{\epsilon_a} = \frac{\sigma_b}{\epsilon_b} = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \text{constante} = \frac{\sigma_A}{\epsilon_A} = E$$

La constancia de esa relación entre tensiones y deformaciones específicas se designa con la letra E y se denomina módulo de Young.

El valor E es característico para cada material, ya que la inclinación β de la recta OA con respecto al eje horizontal del diagrama varía con la relación σ/ϵ , o sea con la mayor o menor velocidad de incrementación de σ frente a ϵ .

La relación $E = \sigma/\epsilon$ constituye la expresión analítica de la ley de Hooke, cuyo enunciado dice que las tensiones son proporcionales a las elongaciones.

Se considera que los materiales que responden a esa ley son perfectamente elásticos en el período abarcado por la recta OA. En efecto, se comprueba que al suprimir la carga exterior en cualquiera de los puntos a, b, c, etc., hasta A, el material recupera su longitud inicial.

La razón de ese comportamiento se debe buscar en la constitución misma de esos materiales. En realidad, por la naturaleza atómica de la materia sabemos que al aplicar una carga a un material el estado de tensión engendrado resulta energéticamente inestable, por cuanto en las condiciones de equilibrio de los átomos a la red característica de los mismos le corresponde una agrupación tal que la energía de los átomos es mínima. Toda desviación de los átomos de ese estado conduce a una situación en que la energía interna es mayor y, por lo tanto, menos estable. Al cesar la sollicitación, los átomos tienden a retomar su ubicación primitiva, tal como se ilustra en la Fig. 22.

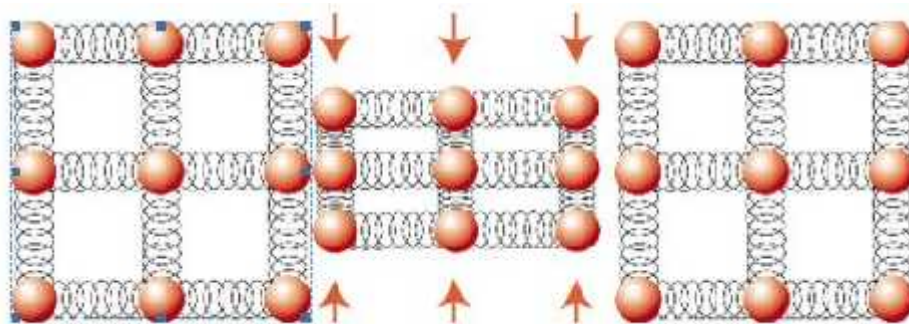


Fig. 22

En ésta se representaron dos alineaciones de átomos, a b c d ... y a' b' c' d' ... Una desviación de la segunda alineación con respecto a la primera da las nuevas ubicaciones a'' b'' c'' d''. Podemos imaginar un modelo mecánico para ese agrupamiento, en el cual los átomos de una alineación están vinculados con los de la siguiente mediante resortes elásticos r . Al producirse la desviación dichos resortes ocuparán la posición r' , para lo cual habrán sufrido un cierto alargamiento.

Al cesar la causa que provocó la desviación, los resortes se acortarán hasta volver a la posición primitiva r , siempre y cuando su estiramiento no haya sobrepasado la capacidad de deformación elástica de los resortes.

Plasticidad

Una vez que el material ha sido estirado más allá del punto A del diagrama de la figura 6, los incrementos de la deformación ϵ se hacen más rápidos que los incrementos de la tensión (Fig. 23). En esas condiciones se comprueba que al descargar la barra en un punto, por ejemplo el D, la misma no recupera más su longitud primitiva sino que sobreviene una deformación remanente específica $\epsilon_p = \Delta/p//o$, que por ser irreversible se denomina *deformación plástica o deformación permanente*.

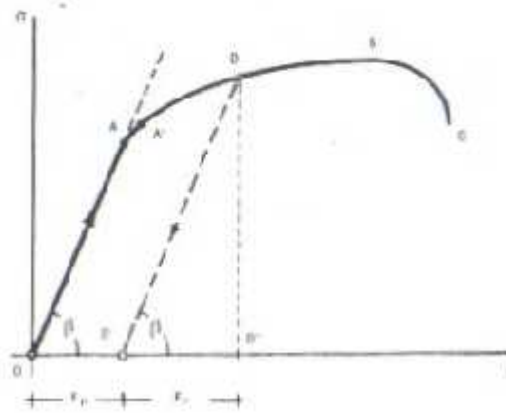


Fig. 23

Volviendo al modelo de la figura 6, podemos decir que la alineación de átomos a' b' c' d' ..., se ha desplazado en una magnitud tal con respecto a la alineación a b c d. .. que los resortes quedan estirados más allá de su capacidad de deformación elástica y, por lo tanto, no vuelven a su posición inicial.

Conforme sea la ubicación relativa del punto de descarga D, más allá del límite de proporcionalidad o de la perfecta elasticidad A, la deformación plástica será mayor o menor. Ello se traduce en el símil mecánico en que la ubicación a" de un átomo a' ya no quedará más comprendida entre los átomos a y b sino que invadirá el dominio siguiente, de modo tal que no subsistirá el enlace del átomo a' con los átomos a y b sino con los átomos b y c. En ese caso, ya no se trata de un alejamiento temporal de átomos (elasticidad) sino de un cambio de posiciones relativas. Como consecuencia de esa deformación plástica, durante el proceso de descarga de la barra a partir de un punto tal como el D, se verifica que el camino recorrido en el diagrama DD', es paralelo a la recta OA, también llamada *recta de Hooke*.

Es evidente que cuanto mayor sea la deformación plástica,, tanto mayor será la destrucción de los enlaces atómicos, lo que por ser un proceso irreversible llegará a la culminación con la rotura del material, punto C del diagrama, no sin antes haber alcanzado su tensión máxima en el punto B.

Conviene destacar el hecho de que a partir del punto A (comienzo de la zona plástica), el material sigue tomando más carga antes de llegar a la rotura. Esto se debe a que los corrimientos relativos entre átomos, que se efectúan a lo largo de planos cristalográficos, hay una oposición al deslizamiento de los cristales, produciendo el endurecimiento mecánico del material. Debido al endurecimiento alcanzado, si el proceso de carga se interrumpe en cualquier punto D del diagrama ubicado entre A y B, al volver a carga el material, el punto D se convierte en el nuevo límite de elasticidad y el punto D' pasa a ser el origen de coordenadas del nuevo diagrama característico del material endurecido. Una vez que se alcanza el punto B, el material entra en el período de colapso

Otras consideraciones relativas al diagrama $\sigma - \epsilon$

Los diagramas $\sigma - \epsilon$ vistos hasta ahora corresponden a un diagrama teórico al que se aproximan algunos metales, tales como el acero. Pero en general se presentan otros fenómenos.

El límite de proporcionalidad A varía para cada material hasta llegar a anularse completamente en las fundiciones o en los hormigones que, no obstante, se dimensionan para trabajar en régimen elástico.

Otra fuente de variación para la ubicación del límite de proporcionalidad esta en la precisión del aparato de medida que se utilice durante la medición de los alargamientos. De todos modos, el tramo recto OA o la tangente a la curva $\sigma - \epsilon$ en el origen O de coordenadas recibe, como hemos señalado, el nombre de recta de Hooke, y la tangente del ángulo β es el módulo de elasticidad E o módulo de Young.

Consideremos ahora la figura 8, donde se ha trazado un diagrama de carga OAD seguido de la descarga a partir del punto D.

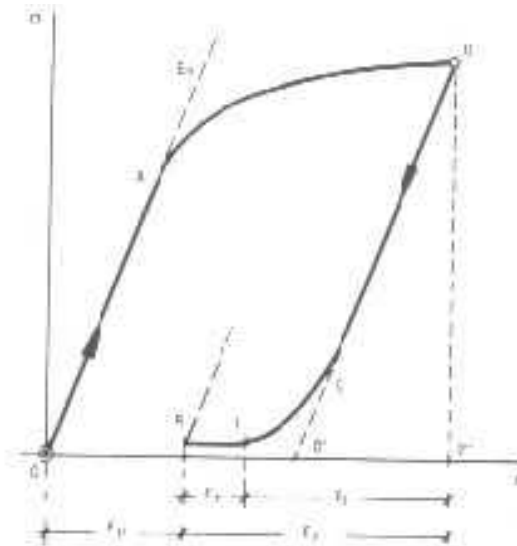


Fig. 24

La curva de descarga a partir de D sigue un camino paralelo a la tangente al origen E_o , es decir que $DC // OA$ (E_o), y cuando la tensión se va aproximando a cero la rama de descarga describe una curva que se detiene en I para luego continuar asintóticamente hasta R. El punto I indica la recuperación elástica instantánea mientras que el punto R marca la posición final del proceso de descarga.

En el diagrama de carga, la deformación total en el punto D está formada por la suma de dos deformaciones: una elástica, delimitada por el punto A, y otra plástica entre A y D. Al descargar la pieza se produce en el material una recuperación elástica instantánea ϵ_i y otra recuperación elástica retardada o diferida ϵ_r y que se manifiesta en un tiempo más o menos largo. De esa manera la recuperación elástica total es $\epsilon_e = \epsilon_i + \epsilon_r$, subsistiendo una deformación permanente o plástica ϵ_p . Mientras ϵ_e constituye una *deformación reversible*, ϵ_p , por el contrario, es *irreversible*.

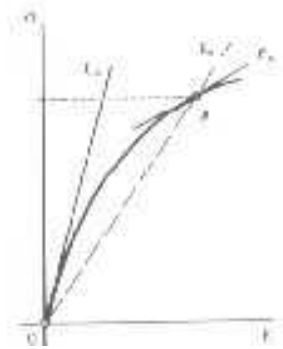


Fig. 25

El caso expuesto indica que la fijación del módulo de elasticidad no es tan simple. Ante todo es necesario destacar que la rama de la descarga es más indicativa de la elasticidad ya que, como se señaló, muchos materiales no poseen una zona en carga que responda a la definición de proporcionalidad, o bien responden a diagramas del tipo indicado en la Fig. 26.

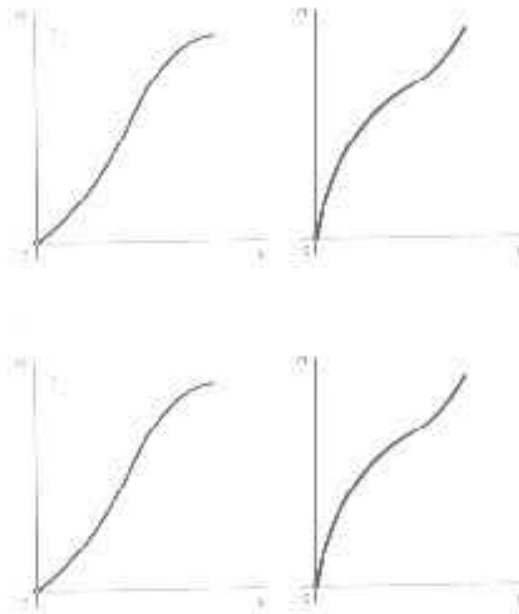


Fig. 26

En cambio, la rama de descarga, siempre exhibe un tramo recto y sensiblemente paralelo a la tangente al origen de la curva; razón por la cual se adopta en muchos casos la pendiente de dicha recta como valor del módulo de elasticidad.

Pero la existencia de una elasticidad instantánea y otra retardada en el periodo de descarga plantea también una situación de duda.

En los materiales que no poseen recta de proporcionalidad se pueden trazar dos curvas de tensiones-deformaciones específicas: una sobre la base de ϵ_i y otra sobre la base de ϵ_r . Como en la mayoría de los casos ϵ_r suele ser despreciable frente a ϵ_i , las posibilidades se reducen a una sola. Una vez trazada la curva elástica ($\sigma - \epsilon\epsilon$), que puede ser también una curva trazada tomando en cuenta el

tiempo de carga, de mantenimiento de la carga, de descarga y de reposo, se definen tres módulos de elasticidad, cuya aplicación práctica se discierne en cada caso particular (Fig. 25):

1. módulo de elasticidad inicial E_0 es la pendiente de la recta tangente en el origen de la curva $\sigma - \epsilon$;
2. módulo de elasticidad secante. E_s , es la pendiente de la recta que une el origen con un punto A de la curva al que se refiere la sollicitación σ_a ;
3. módulo de elasticidad tangente, E_A , es la tangente a la curva en un punto A considerado, en que la tensión es σ_a , o sea

$$\frac{d\sigma_a}{d\epsilon_a} = E_A$$

Se verifica que $E_0 > E_s > E_A$, lo que en muchos casos puede significar un estado de indefinición. Por esta razón es conveniente hallar un procedimiento que tenga un justificativo desde el punto de vista físico y que sea general en todos los casos. Ello se verá al tratar la histéresis.

Histéresis elástica

Este fenómeno se manifiesta en los materiales sólidos en los que la curva de tensiones-deformaciones para el proceso de carga es diferente de la que corresponde al proceso de descarga, es decir, que σ toma distintos valores para un mismo valor de ϵ . Hay histéresis cuando el efecto ϵ depende no sólo de la causa σ que obra en un instante dado sino también de los valores anteriores de ϵ .

Cuando ambas las curvas de carga y descarga forman un lazo cerrado, que se reproduce con la repetición del ciclo carga-descarga, se dice que el material presenta histéresis elástica.

La histéresis elástica tiene su origen en varias causas a la vez, siendo las principales las siguientes:

1. La estructura del material. La histéresis elástica es más notoria en los materiales de estructura granular poco compacta, como las areniscas, hormigones, fundición de hierro, etc.
2. las imperfecciones en el enrejado cristalino, ya sea en la unión de los átomos, en la superficie de los granos o bien en las zonas fronterizas entre cristales, lo cual da lugar a los deslizamientos relativos de los granos cristalinos o de los agregados de los granos a lo largo de fallas internas.
3. el tamaño relativo de los granos cristalinos y su distribución.
4. el tiempo; es decir, la persistencia de la causa en el tiempo.

Se ve, por lo tanto, que en la histéresis elástica concurren más de una causa, y que todas ellas obedecen a la imperfección de los materiales, ya sea por efecto de inclusiones blandas -por ejemplo, el grafito en la fundición de hierro gris-, por diminutas fallas o bien por una sustancia intercrystalina débil, por ejemplo, el cemento calcáreo de las areniscas.

El efecto del tiempo es también muy apreciable, desde que se ha comprobado que aun en el caso ideal de un espécimen monocristalino se puede presentar el efecto de histéresis debido a la distorsión del enrejado atómico y al resbalamiento relativo de las distintas capas del cristal a lo largo de los planos cristalográficos. En este caso, para evitar el efecto de la histéresis es necesario que el proceso de carga y descarga se realice rápidamente, de manera tal que no haya un intercambio apreciable de calor. Donde mejor se observa el efecto del tiempo es en los materiales policristalinos

El área encerrada por el lazo de histéresis mide el trabajo perdido en forma de calor durante el ciclo de carga-descarga, debido a la fricción entre los distintos componentes del material y también dentro de los componentes mismos, de acuerdo con lo señalado anteriormente. Dicha superficie depende del material y de la magnitud de la tensión aplicada, pero existe también una relación directa con la curvatura de la rama de carga (a mayor curvatura mayor área para una misma tensión) y con la porosidad del material.

Modulo de Elasticidad

En la mayoría de los materiales se verifica la existencia de los tres módulos EO, ES y EA; por lo cual, a los efectos del cálculo de las estructuras, se plantea a veces un estado de indefinición. No obstante, se comprueba que si después de haber cargado un material compacto hasta una tensión σ_a se lo descarga para volverlo a cargar, y así sucesivamente, se obtiene un diagrama de carga-descarga que forma un lazo cerrado después de algunas repeticiones de la operación. Dichos lazos, cuyo ancho se va reduciendo a medida que se repite el ciclo un cierto número de veces, se puede confundir con una recta cuya pendiente es la misma que la de la recta Eo. Puede decirse que después de la estabilización del ciclo, en cuyo caso el ancho del lazo adquiere su valor mínimo, el módulo de elasticidad tiene el valor del módulo inicial.

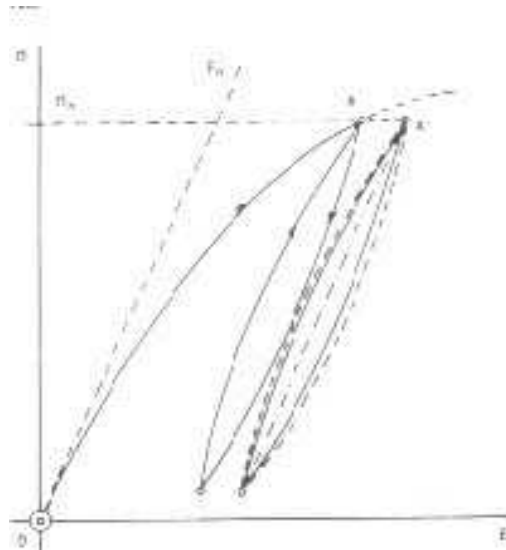


Fig. 27

La manera como se ha obtenido dicho módulo de elasticidad coincide en la práctica con la determinación del módulo dinámico E_d , la que se realiza precisamente en un ensayo dinámico, donde se somete al material a un ciclo de cargas repetidas entre valores extremos bien determinado. En la mayoría de los materiales sólidos se comprueba que, efectivamente, $E_d = E_o$. Por lo cual, en los materiales que no exhiben elasticidad completa, y menos aún elasticidad ideal, la obtención del módulo de elasticidad inicial se puede efectuar mediante un ensayo dinámico o bien mediante la determinación del lazo llamado de histéresis en un ensayo estático.

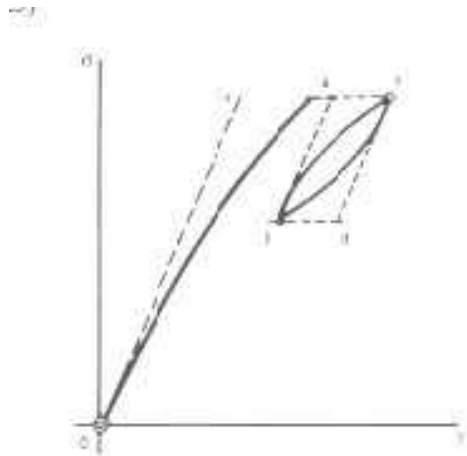


Fig. 28

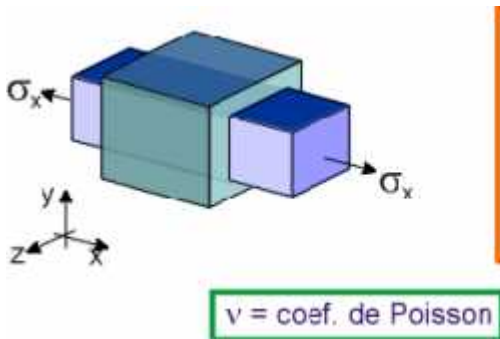
Anelasticidad

En muchos materiales de ingeniería, existe una componente de la deformación elástica que depende del tiempo, es decir, la deformación elástica continúa aumentando después de aplicar la carga, y al retirar la carga se requiere que transcurra algún tiempo para que el material se recupere completamente. Este comportamiento elástico dependiente del tiempo se denomina **anelasticidad**, y es causado por la dependencia del tiempo de los mecanismos microscópicos que tienen lugar cuando el material se deforma. En los metales, la componente anelástica es normalmente pequeña y, a menudo, despreciable. Sin embargo, en algunos materiales polímeros su magnitud es importante; en este caso se denomina comportamiento viscoelástico.

Propiedades Elásticas de los Materiales

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

$$\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$$



$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} \\ \epsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} \\ \epsilon_z &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} \end{aligned}$$

Fig. 29: Alargamiento axial (x) (deformación positiva) y contracciones laterales ("y" y "z") en respuesta a una tracción aplicada. Las líneas continuas representan las dimensiones después de la aplicación de la carga; las líneas discontinuas, antes.

El signo negativo se incluye en la expresión para que ν sea siempre positivo, puesto que ϵ_y y ϵ_z siempre son de signo opuesto. Teóricamente el coeficiente de Poisson para sólidos isotrópicos debería ser $1/4$; 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 $0,35$. De tablas se pueden extraer los valores de ν para los distintos materiales.

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

$$E = 2.G.(1 + \nu)$$

En muchos metales G tiene un valor igual $0,4 E$; por consiguiente, cuando un módulo es conocido los otros pueden ser calculados de forma aproximada.

Muchos materiales son anisotrópicos desde el punto de vista elástico; es decir, el comportamiento elástico (o sea, la magnitud de E) varía según la dirección cristalográfica. En estos materiales las propiedades elásticas están completamente caracterizadas sólo mediante la especificación de varias constantes elásticas, y su número depende de las características de la estructura cristalina. Aun el caso de materiales isotrópicos, para la caracterización completa de las propiedades elásticas, por lo menos deben conocerse dos constantes. Puesto que la orientación de los granos en un policristal es al azar, éste puede ser considerado isotrópico; los vidrios inorgánicos cerámicos también son isotrópicos. El resto de la discusión de las propiedades mecánicas presupone isotropía y policristalinidad puesto que así son la mayoría de los materiales de ingeniería.