
© Roberto Imaz Gutiérrez. Este capítulo se publica bajo Licencia [Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)

Capítulo 2. FUNDAMENTOS EXPERIMENTALES DE LA RESISTENCIA DE MATERIALES (Propiedades mecánicas de los materiales)

2.1 NOCIÓN DE CUERPO ELÁSTICO

Como dijimos en el apartado 1.1 “Todo cuerpo real sobre el que actúa un sistema cualquiera de fuerzas exteriores se deforma, apareciendo unas fuerzas interiores o tensiones que se oponen a esta deformación, la cual continua, hasta que se establece un equilibrio entre las fuerzas exteriores y las interiores.

Si después disminuimos gradualmente las fuerzas exteriores que produjeron la deformación del cuerpo hasta que tomen todas el valor cero, puede ocurrir que las deformaciones desaparezcan totalmente, recuperando el cuerpo su forma primitiva. Esta propiedad la designaremos por elasticidad y el cuerpo será perfectamente elástico o simplemente elástico. Si las deformaciones – al dejar de actuar el sistema de fuerzas – solo son reversibles parcialmente, el cuerpo se llama parcialmente elástico. En este caso, la parte de la deformación que se recupera se llama deformación elástica y la que subsiste después de desaparecer la sollicitación, es la deformación permanente (plástica).

Las deformaciones producidas por las fuerzas exteriores, motivan unos recorridos de sus puntos de aplicación, realizando, por tanto, aquellas un trabajo que, total o parcialmente, se almacena en el cuerpo en forma de energía potencial. En el caso de un cuerpo perfectamente elástico, el trabajo efectuado por las fuerzas exteriores se transformará totalmente en energía potencial interna, (ya que el trabajo realizado por el sistema de fuerzas exteriores cuando éstas aumentan, gradualmente, de cero, hasta el valor final, es exactamente igual, y de signo contrario, al realizado por dichas fuerzas cuando disminuyen gradualmente hasta hacerse cero).

En el caso de un cuerpo parcialmente elástico, parte de trabajo, efectuado por las fuerzas exteriores, se almacena en forma de energía potencial interna, y el resto, se disipa en forma de calor, que se desarrolla en el cuerpo al producirse las deformaciones no elásticas.

2.2 LEY DE HOOKE.

Experimentalmente se comprueba que los desplazamientos de un punto A de un cuerpo elástico por efecto de una fuerza P que crece gradualmente, crecen – hasta cierto límite – proporcionalmente con el valor de la fuerza (fig. 2.1 a) y b). Pasado este límite las deformaciones crecen más deprisa que P. Esta variación de δ con P se representa gráficamente en la figura 2.1 a).

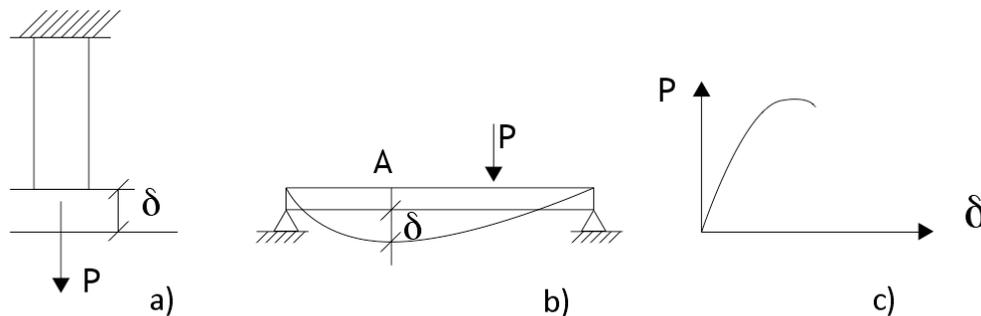


Figura 2.1

Lo mismo puede comprobarse para el giro de una cierta sección A, por ejemplo, de la viga de la figura 2.1 b).

Todos estos resultados experimentales se recogen en la famosa LEY DE HOOKE que dice:

“Si no se pasa de un cierto límite, llamado límite de proporcionalidad, LA DEFORMACIÓN EN GENERAL PRODUCIDA EN CUALQUIER PUNTO O SECCIÓN DE UN CUERPO – ELÁSTICO ES PROPORCIONAL A LA FUERZA P QUE LA PRODUCE”.

La ley acabada de enunciar constituye la base fundamental de la Resistencia de Materiales.

Como veremos después, los límites de elasticidad y proporcionalidad no coinciden en general. El límite de elasticidad es la deformación máxima que produce soportar un cuerpo

elástico, siendo ésta totalmente recuperable, al cesar de actuar la fuerza o fuerzas que la produjeron.

2.3 PRINCIPIO DE LA SUPERPOSICIÓN DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS POR VARIAS FUERZAS.

Las fuerzas aplicadas a una estructura producen dos clases de efectos que podemos clasificar en dos categorías;

- b) Efectos mecánicos: las reacciones de los apoyos, los elementos de reducción, en una sección recta, de una viga que hemos llamado N , M , T , C ; las tensiones en puntos variables según la orientación del plano que se considera.
- b) Efectos geométricos: Los desplazamientos de los diversos puntos, rotaciones y deformaciones en general.

Hecha esta aclaración, la ley del epígrafe puede enunciarse como sigue.

“Los efectos producidos en cualquier punto de un cuerpo elástico, por un sistema cualquiera de fuerzas, es igual a la suma de los efectos que producirán, en ese mismo punto, cada una de las fuerzas al actual aisladamente”.

Este principio tiene una demostración rigurosa – que dejaremos por ahora – y que haremos primero para los cuerpos o estructuras isostáticas y después para las hiperestáticas.

Se comprende que este principio sea de gran utilidad, pues si queremos estudiar los efectos producidos por un sistema completo de fuerzas, junto a otras sollicitaciones, podemos abordar el problema estudiando por separado el efecto de retracción, descenso de un apoyo. Es decir, reduciendo el problema al estudio de varios, mucho más sencillos.

En ciertos casos – en que no se puede aplicar el principio fundamental enunciado en 1.5 - no es aplicable la anterior ley. Un ejemplo típico de este caso, es el representado en la figura 2.3 por las flechas producidas por P , hacen que el par de fuerzas Q , no solo se produzca esfuerzo axial, sino también momento flector, que agrava la posibilidad de que pandee la fuerza. El “pandeo” no lo estudiaremos en este curso, pero conviene saber su existencia.

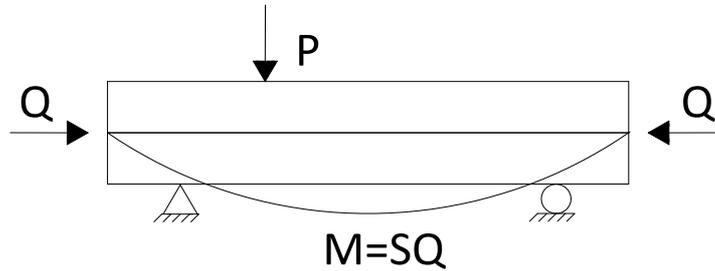


Figura 2.3

La viga anterior puede destruirse de repente y espectacularmente por sólo la acción de las dos fuerzas Q , si la pieza es esbelta, bastante antes de que se alcance la tensión de agotamiento. Este fenómeno y otros similares son los que se conocen con el nombre de “pandeo” y se estudiarán ampliamente en el curso de Estructuras Metálicas, donde se dan con gran frecuencia las piezas muy esbeltas y chapas muy finas.

2.4 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN ENTRE TENSIONES Y DEFORMACIONES.

Los estudios se hacen midiendo en una probeta cilíndrica, sometida a una tracción homogénea y coaxial con su eje, las deformaciones longitudinales producidas en la parte central de la probeta.

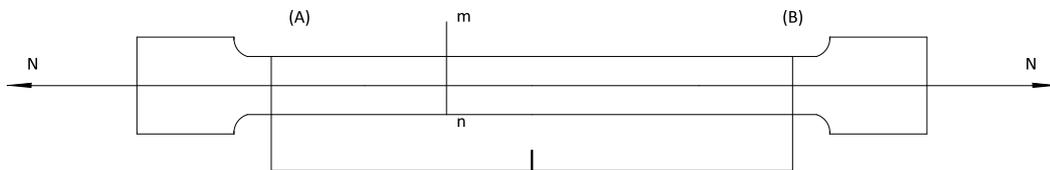


Figura 2.4

2.4.1 Ensayo a tracción de una probeta de acero dulce.

a) Ejerzamos mediante dos mandíbulas, de un aparato de tracción que se adaptan a las cabezas de las probetas, dos fuerzas iguales y opuestas y perfectamente coaxiales con el eje de la probeta (eje del cilindro central), de forma que la pieza esté sometida a un esfuerzo de tracción simple, con ausencia de toda flexión.

Por consideraciones de simetría se demuestra que las secciones rectas m.n., permanecen planas y perpendiculares al eje de la pieza. Se puede en consecuencia afirmar que todas las fibras longitudinales del cilindro experimentan, durante la deformación iguales alargamientos.

Considerando el equilibrio de la parte (A) de la probeta vemos que la resultante de las acciones de la parte (B) sobre (A) es una fuerza N centrada en la sección. Como todas las fibras experimentan igual alargamiento, y se ve que de algún modo la tensión debe depender del alargamiento, se puede concluir que la repartición de tensiones sobre la sección m.n. es uniforme, pudiendo escribir, si Ω es el área de la sección m.n. y δ la tensión que actúa sobre ésta;

$$\sigma = \frac{N}{\Omega} \quad (2.1)$$

Si δ es el alargamiento que experimenta la parte central de la barra de longitud L de la figura 2.4, el alargamiento específico ε (por unidad de longitud) es:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.2)$$

En este ensayo se trata de ver experimentalmente, la gráfica de la relación ε y σ .

En un material elástico, como el acero dulce, para valores de N que no pasan de un círculo de límites, se comprueba que las deformaciones ε , crecen proporcionalmente a σ . Esto, no es sino la comprobación experimental, de un caso sencillo de la ley de Hooke, enunciada con más generalidad en el apartado 2.3

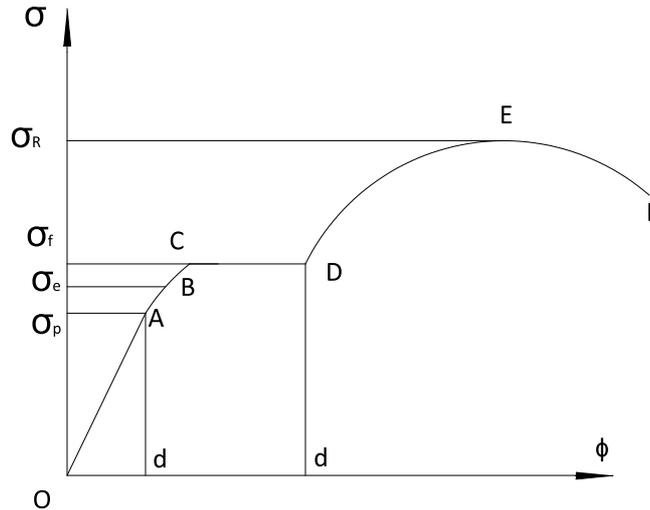
Se puede pues escribir:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.5)$$

Esta relación se conoce en muchos tratados con el nombre de ley de Hooke, ya que parece que así (bajo este aspecto más restringido) la enunció el investigador inglés en 1678.

El coeficiente de proporcionalidad E se llama módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young. Como E no tiene dimensión (ya que es cociente de dos longitudes) E tiene la misma dimensión que σ , o sea FL^{-2} . En los aceros es del orden de $2,1 \times 10^6 \text{ kgs/cm}^2$.

Las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3), pueden utilizarse también en el caso de compresión. ε será entonces el acortamiento específico y σ la tensión de compresión. El coeficiente E suele ser el mismo para esfuerzos de tracción o de compresión. En este caso $\varepsilon y \sigma$ se consideran negativas.



Representando sobre una gráfica cartesiana la relación, entre $\varepsilon y \sigma$ obtendremos un primer tramo recto OA, imagen de la ecuación (2.3). La ordenada del punto A se llama límite de proporcionalidad (σ_p) y su valor es aproximadamente 2.400 kg/cm^2 , para el acero dulce.

Mientras σ se mantenga por debajo de σ_p existe proporcionalidad entre tensiones y deformaciones y éstas últimas – por la definición misma de material elástico – son reversibles, es decir, desaparecen tan pronto deja de actuar $N = \Omega \cdot \sigma$

A partir del límite de proporcionalidad (punto A) el diagrama se separa de la recta OA, (y no cumple por tanto la ley de Hooke), pero el fenómeno sigue siendo reversible hasta un cierto punto B. cuya σ_e será el límite de elasticidad, de acuerdo con la definición dada – en 2.1- de cuerpo elástico.

Si se continúa aumentando N – y por tanto σ - entramos en la zona de las deformaciones no reversibles, es decir, permanentes. Al llegar al punto C se produce un alargamiento repentino de la barra, sin aumento, apreciable de la tensión.

La tensión σ_f correspondiente a este punto C, se conoce con el nombre de límite de fluencia.

El tramo OH de la curva se llama dominio elástico y el tramo BO dominio plástico.

Dentro del primero se distingue el tramo recto OA en que se cumple la ley de Hooke.

Conviene tener claros estos conceptos y saber diferenciación que existe entre σ_p, σ_e y σ_f , acabados de definir, pero en la práctica se suele tomar $\sigma_p = \sigma_e = \sigma_f$ y la curva (para los materiales como el acero dulce que tienen un tramo horizontal bien definido) se sustituye por la de la figura 2.5 b), compuesta por dos tramos rectos. Para el acero dulce el alargamiento plástico \overline{Od} es aproximadamente 20 veces el alargamiento \overline{Oa} o el elástico \overline{Ob} , que difiere muy poco de \overline{Oa} .

Más allá de la zona plástica, un ligero aumento de la tensión produce un alargamiento hasta llegar a un máximo E que corresponde a la tensión de rotura (σ_r). Este término – en cierto modo – es impropio pues la rotura no se produce hasta el punto F.

Al llegar al punto C, aparece el fenómeno de la estricción; la deformación deja de ser homogénea en las proximidades de una región que experimenta grandes alargamientos, disminuyendo rápidamente el área de su sección recta. A partir del punto E viene el tramo decreciente EF hasta que en F se produce la verdadera rotura de la probeta (división de dos partes). El tramo EF, decreciente de la curva, aparentemente – paradójica se justifica por estar calculada la tensión – convencionalmente – pro la fórmula 2.1, suponiendo Ω constante es decir igual a la sección inicial de la probeta. Si se con la sección real la curva seguirá creciente hasta F. El alargamiento total después de la rotura es del orden de 25% que es unas 200 veces el alargamiento elástico.

- b) Al llegar al límite de fluencia – muy visible en el acero dulce – aparecen unas rayas, que forman un ángulo de 45° con el eje de la probeta, que son debidas a un comienzo de deslizamiento de los cristales del material de ésta. Estas líneas llamadas líneas de Lüders o de Hartman indican en una probeta o estructura las zonas en que ha sido alcanzado el límite elástico.

El límite de fluencia, se toma en la Resistencia de Materiales como la tensión, que dividida por un cierto coeficiente de seguridad, no se puede sobrepasar en el proyecto o diseño de una estructura.

La importancia de las deformaciones plásticas al llegar al límite de fluencia tiene capital importancia en el comportamiento de una estructura cargada: las zonas que han alcanzado este límite el material fluye, sin destruirse, y manteniéndose la tensión constante, igual a σ_p .

Esto hace que se verifique una adaptación de la estructura: las zonas más cargadas en que fluye el material, grandes deformaciones, que hacen que se carguen más (es decir, aumentan los antes (N, M y T) en las zonas más descargadas.

La técnica que calcula las estructuras teniendo en cuenta este fenómeno de adaptación – por lo que se aprovecha mejor el material – se llama Plasticidad.

La zona horizontal de fluencia – muy acusado en el acero dulce normal de construcción – es menor perceptible en acero más duros que contienen mayor cantidad de carbono. Entonces para definir σ_e ha sido preciso definir un límite elástico convencional, que es la tensión que produce una deformación permanente de 0,2%.

2.4.2 Estudio de las deformaciones permanentes: Batido.

Supongamos ahora que ha efectuado el ensayo de tracción hasta un punto que pasa del límite de fluencia, y que se descarga después lentamente. La gráfica (σ, e) sigue la recta MM' paralela a OA acortándose la barra y quedando una deformación permanente OM' .

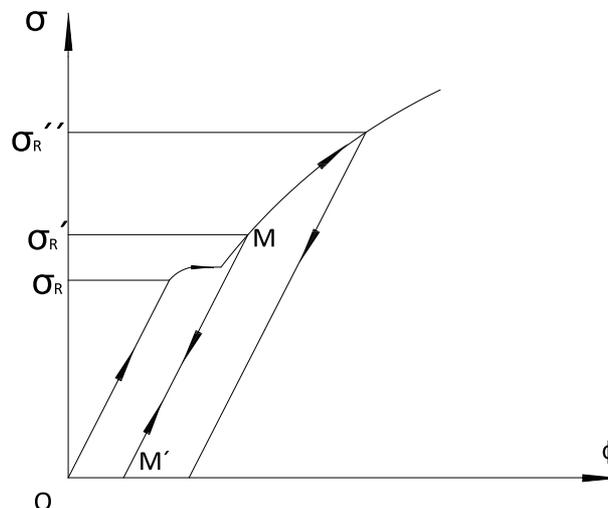


Figura 2.6

Si se vuelve a cargar, la curva representativa es la M'M. Todo pasa como si ensayásemos un nuevo material de límite elástico más elevado, y de igual módulo de Young.

Se dice entonces que se ha producido un batido o estirado en frío del material. Rebasando el límite elástico se puede obtener un batido más avanzado.

Ya hemos visto que al pasar el límite elástico y entrar en el dominio plástico, se produce un reajuste de los cristales que motiva un aumento de σ_e . Si después de haber rebasado aquel límite, ensayamos la probeta a compresión, como las tensiones de compresión tienden a producir una disposición distinta de los cristales, se produce una disminución del límite elástico en compresión. Esto nos indica que es peligroso el empleo de aceros estirados en frío que deban someterse a esfuerzos alternados.

El batido por torsión produce una elevación del límite elástico del acero, tanto para esfuerzos de tracción como de compresión. Tales son las barras Tor de hormigón armado con un límite elástico del 4000 a 5000 kg/cm^2 .

2.4.3. Ensayo de compresión en un hormigón.

En la figura 2.7 se representa la curva de tensión – deformaciones de una probeta de hormigón sometida a un esfuerzo de compresión, hasta llegar a su rotura.

Al principio la deformación es proporcional a la tensión aumentando después rápidamente a partir de una tensión igual al 80% de la rotura. En las proximidades de esta última las deformaciones son plásticas.

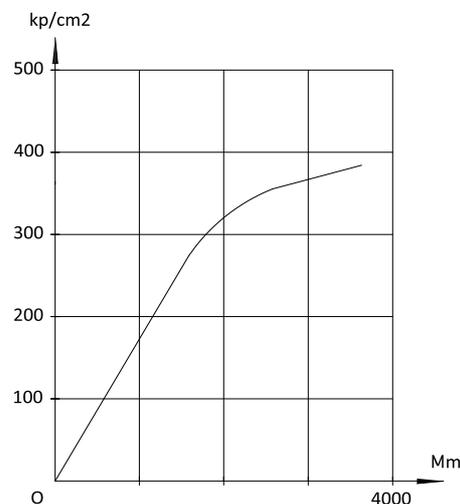


Figura 2.7

A tensión constante hay una deformación instantánea plástica, y otra que prosigue lentamente, con velocidad decreciente, a lo largo de un período de varios años hasta alcanzar su valor límite.

Esta deformación diferida del hormigón se conoce con el nombre de fluencia, pero notemos, que aunque desgraciadamente se designa con la misma palabra que se emplea para el límite de fluencia del acero dulce, se trata de fenómenos completamente distintos.

La deformación por fluencia en el hormigón (según la acabamos de definir) es del mismo orden que la deformación sistemática o elástica. En los aceros también existe este segundo fenómeno de deformación por fluencia que para evitar confusiones se llama relajamiento.