

Capítulo 1

Ensayo de Tracción

Para conocer las cargas que pueden soportar los materiales, se efectúan ensayos para medir su comportamiento en distintas situaciones. El ensayo destructivo más importante es el ensayo de tracción, en donde se coloca una probeta en una máquina de ensayo consistente de dos mordazas, una fija y otra móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil. Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la figura 1.1

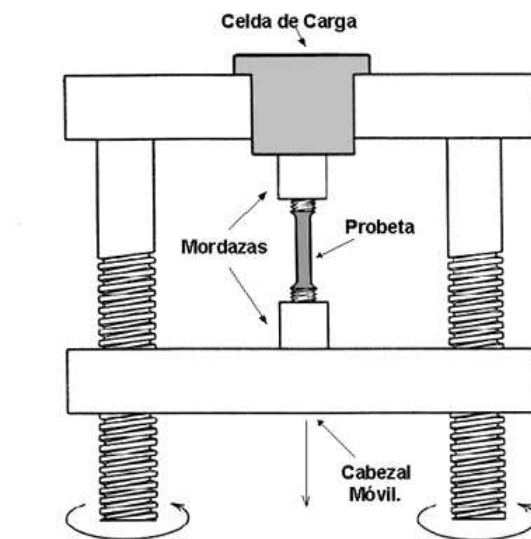


Figura 1.1: Máquina de Ensayo de Tracción.

La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas poseen un plotter que grafica en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída. La figura 1.2 muestra el gráfico obtenido en una máquina de ensayo de tracción para un acero.

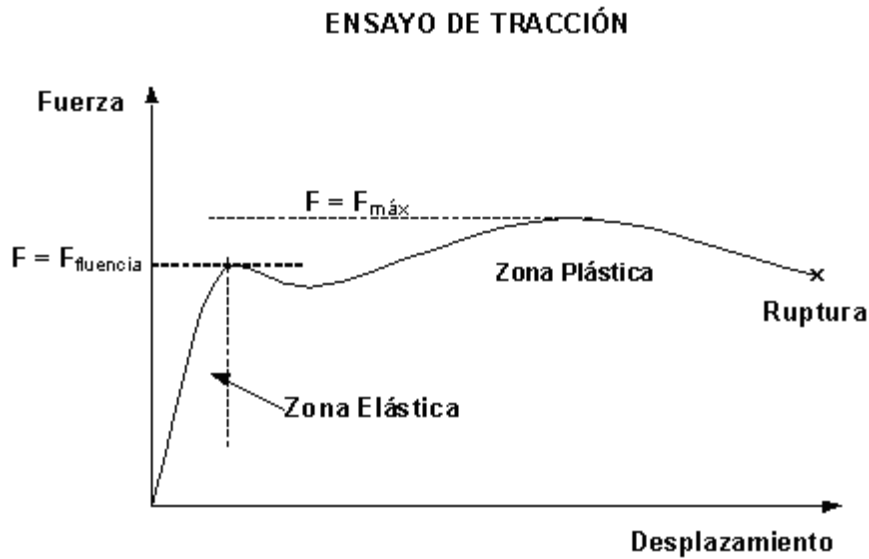


Figura 1.2: Curva Fuerza-Deformación de un Acero.

Las curvas tienen una primera parte lineal llamada zona elástica, en donde la probeta se comporta como un resorte: si se quita la carga en esa zona, la probeta regresa a su longitud inicial. Se tiene entonces que en la zona elástica se cumple que:

$$F = K(l_i - l_0) \quad (1.1)$$

Donde:

- F : fuerza
- K : cte. del resorte
- l_i : longitud instantánea bajo carga
- l_0 : longitud inicial

Cuando la curva se desvía de la recta inicial, el material alcanza el punto de fluencia, desde aquí el material comienza a adquirir una deformación permanente. A partir de este punto, si se quita la carga la probeta quedaría más larga que al principio. Deja de ser válida nuestra ecuación 1.1 y se define que ha comenzado la zona plástica del ensayo de tracción. El valor límite entre la zona elástica y la zona plástica es el punto de fluencia (yield point) y la fuerza que lo produjo la designamos como límite de fluencia (LF).

Luego de la fluencia sigue una parte inestable, que depende de cada acero, para llegar a un máximo en F_{max} . Entre F_{LF} y F_{max} la probeta se alarga en forma permanente y repartida, a lo largo de toda su longitud. En F_{max} la probeta muestra su punto débil, concentrando la deformación en una zona en la cual se forma un cuello.

La deformación se concentra en la zona del cuello, provocando que la carga deje de subir. Al adelgazarse la probeta la carga queda aplicada en menor área, provocando la ruptura. La figura 1.3 muestra la forma de la probeta al inicio, al momento de llegar a la carga máxima y luego de la ruptura.

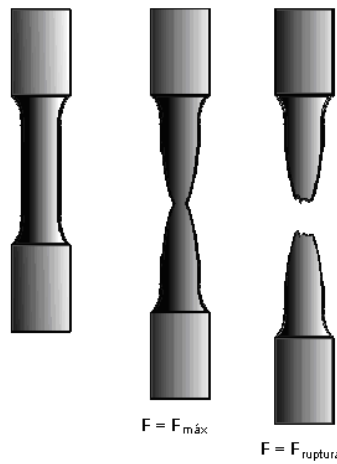


Figura 1.3: Formación del cuello y ruptura.

Para expresar la resistencia en términos independientes del tamaño de la probeta, se dividen las cargas por la sección transversal inicial A_0 , obteniéndose la resistencia a la fluencia en la ecuación 1.2 y la resistencia máxima a la tracción en la ecuación 1.3.

$$\sigma_{LF} \text{ o } \sigma_y = \frac{F_{LF}}{A_0} \quad (1.2)$$

$$\sigma_{RMT} \text{ o } \sigma_{UTS} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (1.3)$$

Las unidades de estas medidas pueden ser kg/mm^2 , MPa o kpsi. En particular nosotros usaremos la del sistema internacional, es decir en MPa.

La figura 1.4 se ilustra una probeta al inicio del ensayo indicando las medidas iniciales necesarias.

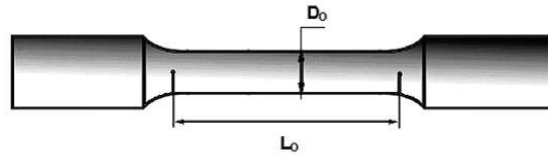


Figura 1.4: Medidas iniciales.

Analizando las probetas después de rotas, es posible medir dos parámetros: El alargamiento final L_f figura 1.5 y el diámetro final D_f , que nos dará el área final A_f .

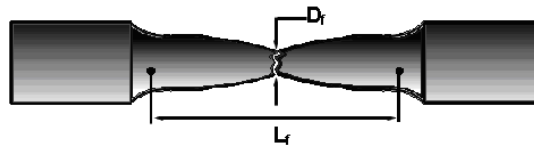


Figura 1.5: Medidas después de la rotura.

Estos parámetros se expresan como porcentaje de variación de área y porcentaje de alargamiento entre marcas, y se calculan según las ecuaciones 1.4.

$$\Delta A = \frac{A_f - A_0}{A_0} , \quad \Delta l = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (1.4)$$

Ambos parámetros son las medidas normalizadas que definen la ductilidad del material, que es la capacidad para fluir, es decir, la capacidad para alcanzar grandes deformaciones sin romperse. La fragilidad se define como la negación de la ductilidad. Un material poco dúctil es frágil. La figura 1.6 permite visualizar estos dos conceptos gráficamente.

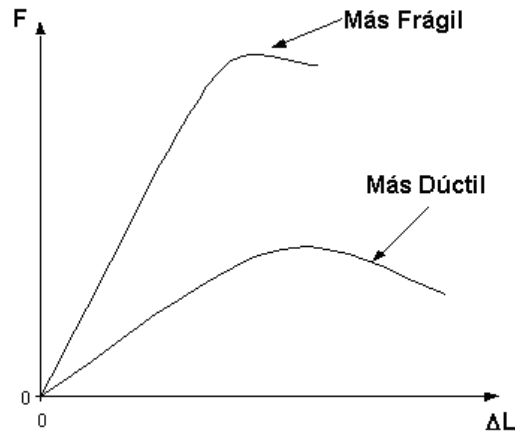


Figura 1.6: Curvas típicas dúctil y frágil.

El área bajo la curva fuerza-desplazamiento (f-d) representa la energía disipada durante el ensayo, es decir la cantidad de energía que la probeta alcanzó a resistir. A mayor energía, se dice que el material es más tenaz a la fractura. A partir de los valores obtenidos en el gráfico fuerza-desplazamiento, se puede obtener la curva esfuerzo-deformación ingenieríl ($\sigma_I - \epsilon_I$). El esfuerzo ingenieríl σ_I , que tiene unidades de fuerza partido por área y la deformación ingenieríl ϵ_I , se definen como se muestra en la ecuación 1.5.

$$\sigma_I = \frac{F}{A_0} , \quad \epsilon_I = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (1.5)$$

A partir de estos valores se calculan los parámetros de esfuerzo y deformación real ($\sigma_R - \epsilon_R$), que se definen en las ecuaciones 1.6. Esto se hace considerando que la probeta va disminuyendo su área mientras se estira, pasado su límite elástico.

$$\sigma_R = \sigma_I(\epsilon_I + 1) , \quad \epsilon_R = \ln(\epsilon_I + 1) \quad (1.6)$$

Vale la pena recalcar, que los valores ingenieríles y reales son idénticos hasta el punto de fluencia, y a continuación de este el esfuerzo real es siempre superior al ingenieríl y por el contrario la deformación real es siempre menor que el valor ingenieríl.

Estas correlaciones anteriores son validas solo antes que empieza la formación del cuello, ya que se calcularon teniendo en cuenta que el volumen era conservativo. Las condiciones anteriores nos permiten definir una correlación que sólo se cumple cuando el material es poco sensible a la velocidad de deformación, mediante la Ecuación de Ludwik (ecuación 1.7), en la zona de alargamiento homogéneo, mediante la siguiente correlación.

$$\sigma_R = K \cdot \epsilon_R^n \quad (1.7)$$

(3.10) Donde K es el coeficiente de resistencia y n es el índice de endurecimiento por deformación o índice de acritud. Estos dos valores son constantes características que dependen del material y de las condiciones del ensayo.

Comúnmente solo se grafica la curva de esfuerzo-deformación ingenieril, ya que esta permite obtener, como lo mencionamos anteriormente, la resistencia máxima a la fractura, que es menor a el dato real. Esto permite tener un factor de seguridad debido a que pueden influir factores externos que fracturen la pieza antes de lo esperado, y con esta diferencia se asegura que el material no se fractura.

La constante que correlaciona estas dos variables ($\sigma - \epsilon$) a lo largo de la zona elástica se denomina módulo de Young (E) mediante la Ley de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$). El módulo de Young es un indicador de la rigidez del material (si aumentamos E aumentaremos también la rigidez). Mide la resistencia de los enlaces interatómicos del material E se mantiene más o menos constante cuando el material se encuentra aleado, ya que el valor del módulo de Young no depende de la fase, de si el material está aleado, recocido, etc. Lo que realmente afecta al módulo de Young es la temperatura. El módulo de Young es igual para cálculos de resistencia a compresión como a tracción. Por convenio, en el ensayo de compresión se tomarán como negativos los valores de las fuerzas y deformaciones.

En la figura 1.7 se presenta un ejemplo del gráfico esfuerzo-deformación de un acero.

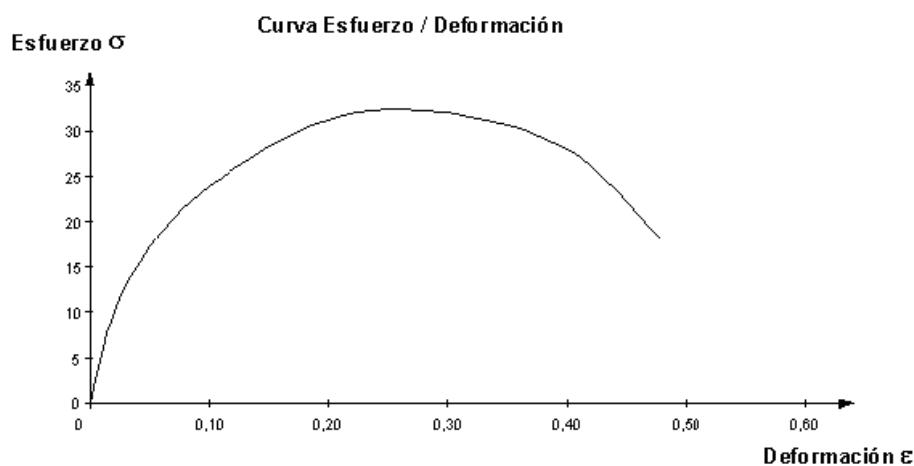


Figura 1.7: Gráfico esfuerzo v/s deformación típico de un acero.

En los siguientes ejemplos de curvas $\sigma - \epsilon$ se puede observar las características de cada material.

El hule muestra una gran ductilidad al alcanzar una gran deformación ante cargas pequeñas. El yeso y el carburo de tungsteno muestran poca ductilidad, ambos no tienen una zona plástica, es decir, se rompen con valores bajos de elongación, por lo tanto son materiales frágiles. La única diferencia entre ellos es la resistencia que alcanzan.

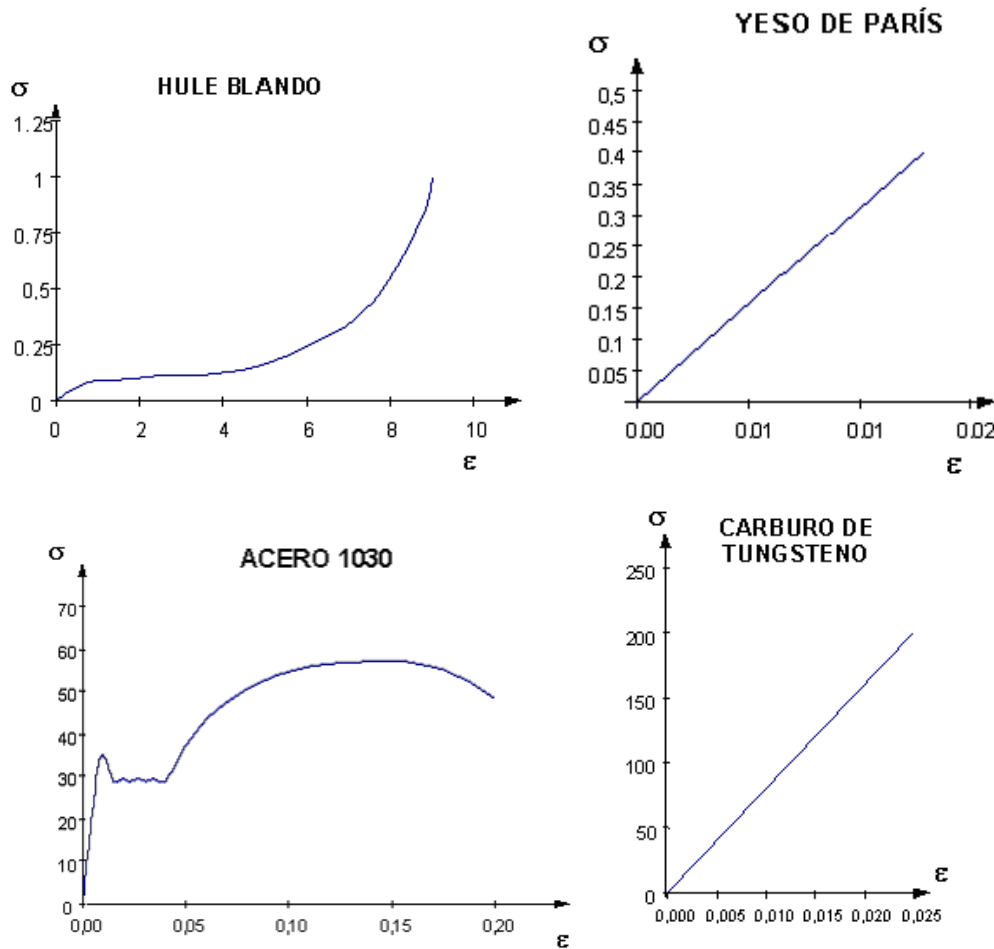


Figura 1.8: Distintas curvas $\sigma - \epsilon$ en $[\text{klb}/\text{pulg}^2]$.

Los diagramas esfuerzo-deformación de diversos materiales varían ampliamente y diferentes ensayos de tensión con el mismo material pueden producir resultados diferentes de acuerdo con la temperatura de la probeta y la velocidad de carga. Sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes a los diagramas de varios grupos de materiales y dividirlos en dos amplias categorías: materiales dúctiles y materiales frágiles, conceptos definidos anteriormente.

Durante el ensayo de tracción, si se descarga la probeta, luego de alcanzar la zona plástica, pero

antes de producirse la ruptura, la curva de tracción cambia de forma. La longitud de la probeta tiende a recuperarse, pero no alcanza la longitud inicial, quedando con una longitud mayor, que se denomina deformación permanente. A nivel gráfico, la curva se devuelve con la pendiente de la zona elástica (figura 1.9).

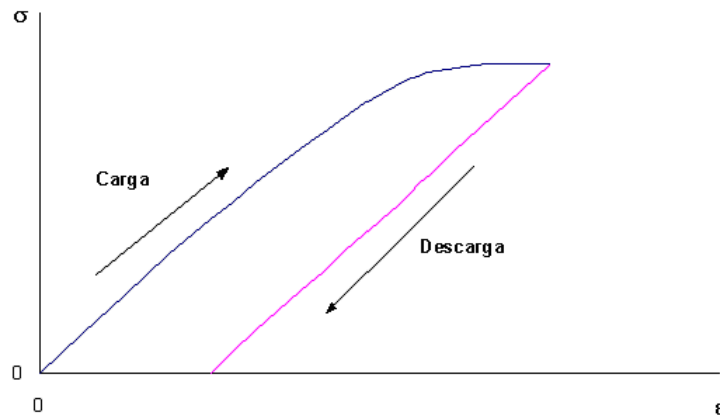


Figura 1.9: Recuperación en el rango plástico de una probeta traccionada.

Finalmente, si la curva de tracción del material no presenta claramente dónde termina la zona elástica y comienza la zona plástica, se define como punto de fluencia al correspondiente a una deformación permanente del 0,2%. La figura 1.10 ilustra lo anterior, mostrando el diagrama de esfuerzo contra deformación para cobre policristalino.

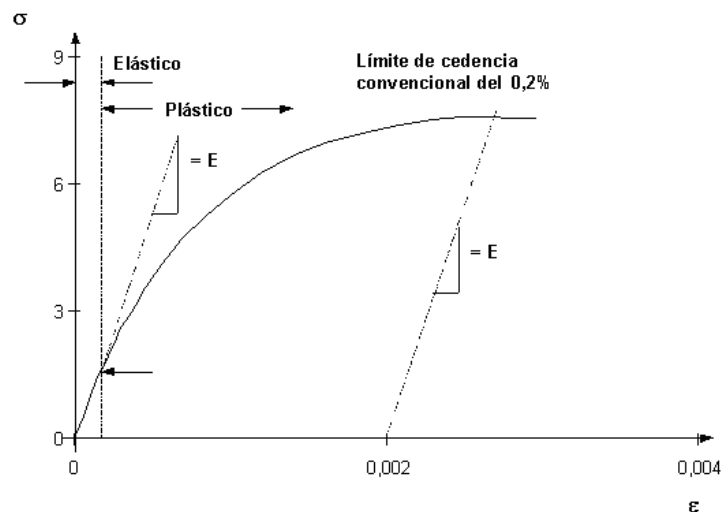


Figura 1.10: Curva que muestra el límite de fluencia para una deformación permanente del 0,2%.

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 frágiles se ilustra esquemáticamente en la figura 1.11.

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

$$\%EL = \frac{l_f - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (1.8)$$

Donde l_f es la longitud en el momento de la fractura, y l_0 es la longitud original de la probeta. El valor de %EL dependerá del largo original de la probeta, por lo que éste se debe especificar al mencionar el alargamiento relativo.

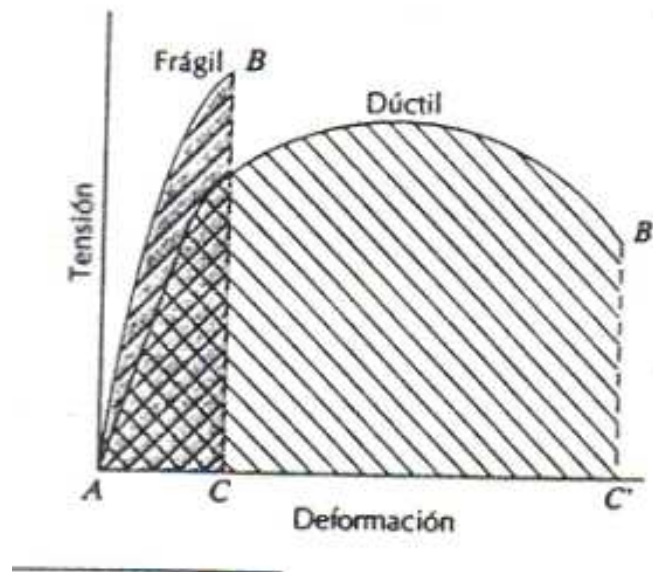


Figura 1.11: Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura.

El porcentaje de reducción de área %AR se define como

$$\%AR = \frac{A_f - A_0}{A_0} \cdot 100 \quad (1.9)$$

donde A_0 es el área de la sección inicial y A_f es el área de la sección en el momento de la fractura. Los valores del porcentaje de reducción de área son independientes de l_0 y A_0 . Además,

para un determinado material los valores de %EL y %AR son en general diferentes. La mayoría de los metales tienen al menos un pequeño grado de ductilidad a temperatura ambiente; sin embargo, algunos se hacen frágiles a medida que disminuye la temperatura.

El conocimiento de la ductilidad de un material es importante, ya que permite conocer el grado en que una estructura se puede deformar antes de producirse la rotura (o bien el grado de deformación que se puede permitir durante las operaciones de conformación). Como materiales frágiles se consideran aquellos que tienen una deformación a la fractura menor que un 5 % (aproximadamente). En la tabla 1.1 se muestran valores típicos a temperatura ambiente del límite elástico, resistencia a la tracción y ductilidad de algunos metales, los cuales han sido tratados térmicamente para que tengan baja resistencia. Estas propiedades son sensibles a la deformación previa, presencia de impurezas y tratamientos térmicos a los cuales haya sido sometido el material. El módulo de elasticidad es un parámetro mecánico que es insensible a estos tratamientos.

Tabla 1.1: Propiedades mecánicas típicas de varios metales en el estado recocido y de pureza comercial.

Material	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	35000 (240)	48000 (330)	30
Molibdeno	82000 (565)	95000 (655)	35