

2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Por: Jhonatan Alexander Becerra Duitama
Fundación Universitaria Juan de Castellanos

2.1 INTRODUCCIÓN

Entender el comportamiento de los materiales bajo la acción de estímulos externos, es fundamental para las diferentes ramas de la ingeniería. Los diferentes tipos de materiales se clasifican e implementan en la industria según sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, térmicas, eléctricas, acústicas y ópticas. El acero utilizado en obras civiles debe tener una alta resistencia mecánica, mientras que el acero empleado en maquinaria debe tener alta dureza y resistencia al desgaste. Los materiales cerámicos son excelentes aislantes térmicos, pero tienen una baja resistencia al impacto. Los polímeros no son buenos conductores eléctricos, pero sus propiedades elásticas son notorias. Dichas propiedades se establecen mediante ensayos o pruebas en el laboratorio, realizadas bajo la normativa correspondiente. Para los diferentes ensayos, existen condiciones iniciales que se deben cumplir, ya que la respuesta al estímulo depende del tipo de material, de la magnitud y tipo de carga, y de la geometría del espécimen.

2.2 CONCEPTOS BÁSICOS

2.2.1 Anisotropía:

propiedad de la materia que, según como se midan sus propiedades, dan como resultado diferentes características, tales como: elasticidad, temperatura, conductividad, entre otras. Estas varían según la dirección en que son examinadas.

2.2.2 ASTM:

American Society of Testing Materials (Asociación Americana de Ensayo de Materiales). Esta organización radicada en Estados Unidos, se encarga de medir las propiedades de los materiales, con el fin de conocer el comportamiento de los mismos y su posible implementación en la construcción de bienes.

2.2.3 Ductilidad:

Capacidad de un material que permite la deformación sostenida sin romperse, bajo la acción de una fuerza de gran magnitud.

2.2.4 Esfuerzo: Resistencia interna ofrecida por una unidad de área, del material del cual está elaborado un elemento, a una fuerza externa aplicada. Existen esfuerzos a tracción o tensión, a compresión, a flexión, a torsión y a cortante. La unidad de esfuerzo, para el sistema internacional, es el pascal (Pa); y, en el sistema inglés, es libra fuerza por pulgada cuadrada (psi).

2.2.5 Máquina universal: Máquina con la cual se pueden realizar ensayos a tracción, compresión, flexión y, en algunos casos, a torsión de algunos materiales. La máquina está constituida por dos cabezales, en la parte interior de estos se encuentran las mordazas, cuya función es agarrar las probetas para fallarlas. El cabezal superior es fijo, allí se encuentran las celdas de carga, y el cabezal inferior es móvil y es el encargado de producir la elongación de las probetas (figura 14). Además, cuenta con una pantalla, en donde se puede apreciar, en tiempo real, el diagrama esfuerzo-deformación del material fallado.

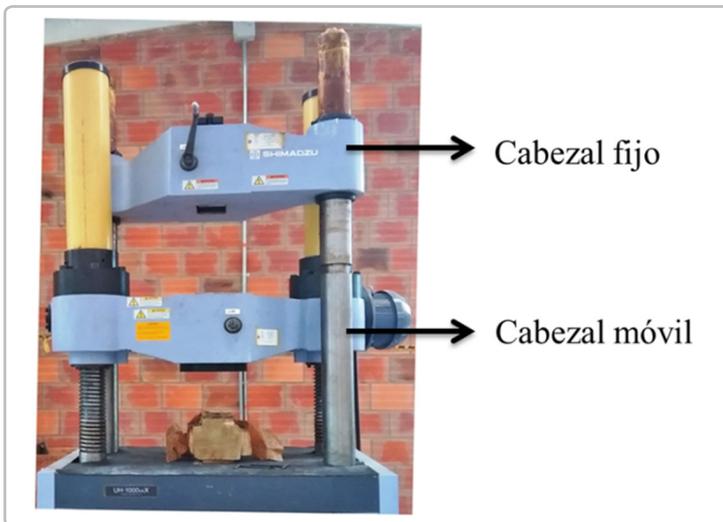


Figura 14. Máquina universal.

Fuente: elaboración propia.

2.2.6 Módulo de elasticidad o de Young: Es un parámetro mecánico que permite determinar la naturaleza elástica de los materiales. Los materiales con módulo de elasticidad alto, son rígidos y no se deforman con facilidad. El módulo de Young es una constante; es decir, que no cambia con el incremento del esfuerzo. Además, el valor varía dependiendo del tipo de material. Las unidades de medida son las mismas que para el esfuerzo.

2.2.7 Módulo de rigidez: Constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes.

2.2.8 Módulo de ruptura: Resistencia máxima determinada en un ensayo de flexión o torsión. En un ensayo de flexión, el módulo de rotura es el esfuerzo máximo en la fibra extrema cuando se produce el fallo. En un ensayo de torsión, el módulo de rotura es el esfuerzo cortante máximo de la fibra extrema de un miembro, con sección transversal (circular, cuadrada, entre otras), cuando se produce el fallo.

2.2.9 Resistencia a la fluencia o cedencia: Es el esfuerzo en donde el material muestra una deformación plástica significativa; es decir, una deformación permanente.

2.2.10 Tenacidad: es la energía de deformación que absorbe o almacena un material antes de alcanzar la falla en condiciones de impacto.

2.3 PRUEBAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

2.3.1 Ensayo de tracción

El ensayo más común para medir las propiedades mecánicas de los materiales, es el ensayo a tracción. Esta prueba suministra información sobre algunas propiedades fundamentales de los materiales para el diseño en ingeniería. Principalmente, es aplicado a materiales dúctiles como los materiales metálicos y poliméricos.

Generalmente, las probetas se llevan hasta la rotura mientras se le aplica una carga uniaxial (a través del eje de la probeta) a tensión, que va aumentando gradualmente. Estas probetas deben cumplir con los requisitos establecidos por la norma internacional. La norma ASTM E-8 es la que rige el ensayo a tracción, la cual recomienda utilizar probetas cilíndricas como la mostrada en la figura 15A, aunque también se pueden fallar probetas con sección transversal rectangular (figura 15B).



Figura 15. Probetas para el ensayo a tracción: A: cilíndrica y B: sección rectangular.

Fuente: elaboración propia.

Los elementos a fallar se colocan dentro de las mordazas de sujeción, ubicadas en los cabezales de la máquina universal. El cabezal inferior se desplaza hacia abajo a una velocidad constante hasta fallar la probeta; de manera simultánea, en una pantalla se va mostrando la gráfica esfuerzo-deformación en tiempo real de la pieza fallada. El objetivo de realizar este ensayo, es establecer si el material es dúctil o frágil. Los materiales dúctiles tienen la capacidad de deformarse plásticamente de manera sostenida sin romperse; es decir, que la relación entre el alargamiento longitudinal y la disminución transversal es muy elevada. En contraste, los materiales frágiles no presentan deformación antes de la falla. Si el material es deformado y vuelve a sus dimensiones iniciales cuando la fuerza se ha dejado de aplicar, el material ha experimentado una deformación elástica; por otra parte, si el material sufre una deformación permanente en la cual no recupere sus dimensiones originales, este ha experimentado una deformación plástica.

La deformación unitaria de un material, es el cociente del cambio de longitud de la muestra en la dirección de la fuerza dividida entre la longitud original considerada:

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

Donde,

l_0 , es la longitud inicial de la muestra (mm o in), y

l , es la longitud después de aplicar la fuerza uniaxial (mm o in).

El esfuerzo está dado por el cociente entre la fuerza a tensión uniaxial y la sección transversal inicial de la varilla:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Además de la ductilidad, el ensayo a tracción puede determinar la resistencia a la fluencia, el módulo de elasticidad y la tenacidad, propiedades que indican las posibles aplicaciones de los materiales en las diferentes áreas de la ingeniería.

2.3.2 Ensayo de compresión

Este ensayo mide la deformación y el esfuerzo normal a compresión que puede soportar un material ante una carga de aplastamiento. El ensayo de compresión se caracteriza porque, la probeta sufre una reducción en su longitud y una disminución en su volumen. Para calcular el esfuerzo a compresión del espécimen, se deben dividir la carga aplicada durante el ensayo y la sección

transversal. Las dimensiones de las probetas van a depender del tipo de material que se vaya a fallar. Generalmente, es aplicado a materiales frágiles como el concreto y la madera. Para este ensayo, el elemento a fallar se coloca entre el cabezal móvil y la mesa de la máquina universal. El cabezal móvil desciende con velocidad constante comprimiendo la probeta hasta llevarla a la rotura. De forma simultánea, el diagrama esfuerzo-deformación va apareciendo en una pantalla anexa a la máquina universal. La figura 16 muestra el montaje para realizar el ensayo a compresión.

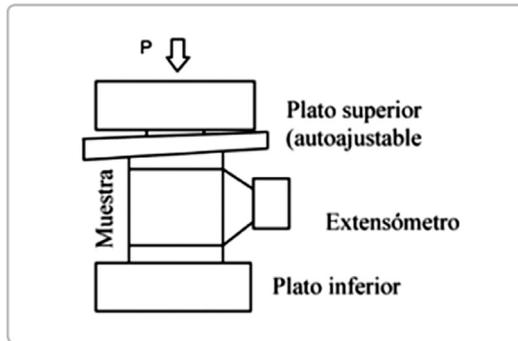


Figura 16. Montaje para el ensayo a compresión.

Fuente: elaboración propia.

2.3.3 Ensayo de flexión

El objetivo de este ensayo es medir la resistencia y el comportamiento esfuerzo-deformación a la flexión de un material. Generalmente, la resistencia a la flexión y la deflexión (deformación vertical), es evaluada en elementos horizontales. Para realizarlo, se ubica la probeta de tal manera que la carga actúe en tres puntos causando flexión (ver figura 17). La fractura iniciará en este sitio. Cabe resaltar que, la flexión crea esfuerzo a compresión en la fibra superior y esfuerzo de tracción en la fibra inferior de la probeta. La resistencia a la flexión o módulo de ruptura describe la resistencia máxima del material:

$$\sigma = \frac{3FL}{2wh^2}$$

Donde,

F, es la carga última aplicada (N o lb),

L, la distancia entre los dos puntos de apoyo (mm o in),

w, es el ancho de la probeta (mm o in), y

h, su altura (mm o in).

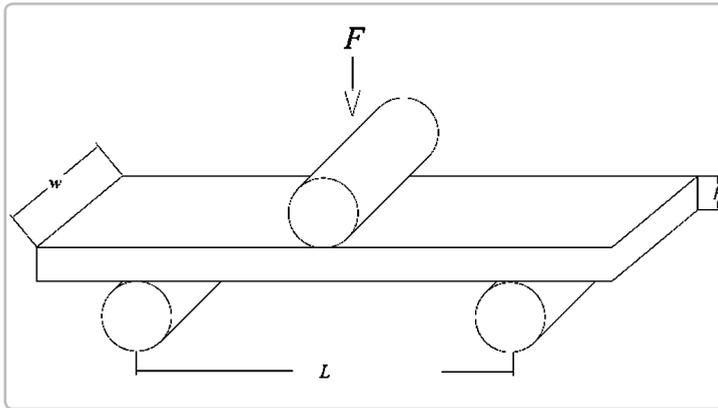


Figura 17. Ensayo de flexión con tres puntos de carga.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la prueba de flexión son similares a la curva esfuerzo-deformación; sin embargo, el esfuerzo se grafica en función de deflexiones, en vez de en función de deformaciones. La figura 18 muestra la deflexión vertical sufrida en un ensayo a flexión.

El módulo de elasticidad a flexión o módulo de flexión, está dado por:

$$E = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta}$$

Donde,

δ d, es la deflexión (mm o in) de la probeta al aplicarse la carga última aplicada F.

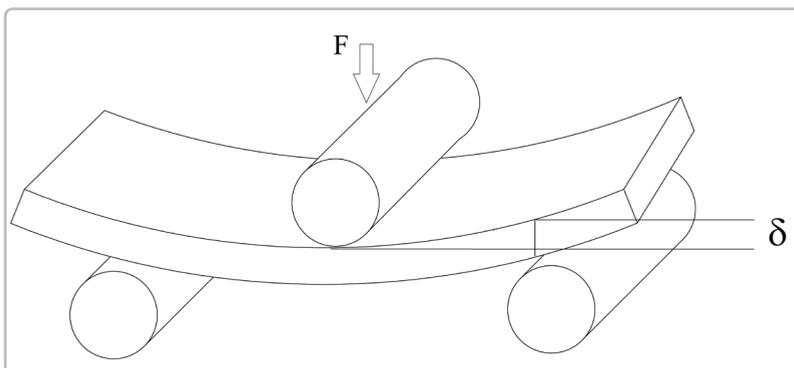


Figura 18. Deflexión durante el ensayo de flexión con tres puntos de carga.

Fuente: elaboración propia.

2.3.4 Ensayo de torsión

Este ensayo es útil para determinar propiedades como: el módulo de rigidez, el esfuerzo de fluencia torsional y el módulo de ruptura, en diferentes materiales. Generalmente, se efectúa en componentes que soportan esfuerzo cortante a torsión, como lo son los ejes o las brocas de los taladros; además, se implementa para evaluar la fragilidad de los metales que serán usados como herramientas. La máquina de torsión consta de un cabezal giratorio que permite el desplazamiento angular de la pieza, generalmente de sección transversal circular; además, contiene un cabezal fijo, que sirve para sujetar el elemento a fallar, en donde se encuentra la celda de carga para realizar las mediciones de par de torsión y deformación angular.

El esfuerzo de torsión al que se somete una pieza cilíndrica maciza, está dado por:

$$\tau = \frac{M \cdot c}{J}$$

Donde,

τ , es el esfuerzo a torsión (Pa o psi),

M , es el momento o par máximo (N.mm o lb.in),

c , la máxima distancia medida desde el eje neutro de la sección transversal (mm o in), y

J , el momento polar de inercia (mm⁴ o in⁴).

La deformación angular de la probeta se define como:

$$\gamma = \frac{r\theta}{L}$$

Donde,

γ , es la deformación angular por torsión (radianes),

θ , es el ángulo de giro (radianes),

r , el radio de la sección transversal (mm o in), y

L , la longitud de la barra (mm o in).

La relación entre el esfuerzo a torsión y la deformación angular, se conoce como el módulo de rigidez, y está dado por:

$$G = \frac{\tau_{\text{máx}}}{\gamma} = \frac{TL}{J\theta}$$

El comportamiento del material a torsión, se puede representar bajo la curva esfuerzo-deformación angular. Esta curva es similar al diagrama esfuerzo-deformación obtenido mediante el ensayo de tracción. A partir de dicha gráfica, se puede establecer el campo de aplicación de cada material.

2.3.5 Ensayo de dureza

La dureza es la resistencia de un material de ser penetrado (deformación plástica permanente) o rayado. El ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a ser penetrado sin alterar significativamente el material, es decir, es un ensayo no destructivo. Los ensayos más implementados son los ensayos Brinell y Rockwell.

2.3.5.1 Ensayo de dureza Brinell:

Consiste en realizar una muesca sobre la superficie de un material con una bola de acero de 10 mm de diámetro. La bola genera una impresión sobre la superficie del material, se mide el diámetro de la impresión y se calcula el número de la dureza o índice de dureza Brinell (se puede abreviar como HB o BHN), a partir de la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{F}{\frac{\pi}{2}D \left(D - \sqrt{D^2 - D_i^2} \right)}$$

Donde,

F, es la carga aplicada en kilogramos,

D, es el diámetro del penetrador en mm, y

Di, es el diámetro de la impresión en mm.

Las unidades de la dureza Brinell vienen expresadas en kilogramos por milímetro cuadrado ($1 \text{ kgf/mm}^2 = 9.8 \text{ MPa}$). Dependiendo del tipo de material, se pueden utilizar bolas de indentación desde 500 kg hasta 3000 kg de masa, generalmente la carga se aplica durante 30 segundos.

2.3.5.2 Ensayo de dureza Rockwell:

para este ensayo, se utiliza una pequeña bola de acero para materiales blandos y un cono de diamante para materiales más duros. La profundidad de penetración es medida directamente por el aparato de medida (durómetro) y se convierte en índice de dureza Rockwell (HR), por esta razón es un método ampliamente usado, por su efectividad, rapidez y precisión. Cabe aclarar que el valor de la dureza es un valor relativo que sirve de comparación con los valores obtenidos para los distintos tipos de materiales.

2.3.6 Ensayo de impacto

El ensayo de impacto mide la fragilidad de un material bajo la condición de un golpe súbito e intenso, en el cual, la velocidad de aplicación del esfuerzo es extremadamente grande. Este ensayo, además, evalúa la energía que absorbe un material al recibir un impacto, el valor de dicha energía es una medida de la tenacidad del material. Existen dos procedimientos para realizar esta prueba, el ensayo Charpy y el ensayo Izod, este último generalmente se utiliza para materiales no metálicos.

El ensayo consiste de un péndulo, el cual se deja caer de una altura definida previamente, golpea la probeta que se sitúa en la parte inferior, y luego se mide la altura final a la que llega el péndulo después de impactar la probeta. Con la diferencia de alturas, se puede calcular la energía potencial. Esta energía es la energía de impacto absorbida durante la ruptura del espécimen. Si el material absorbe más energía, su comportamiento es de un material dúctil. La Figura 24 muestra las diferencias y similitudes entre el ensayo Charpy y el ensayo Izod.

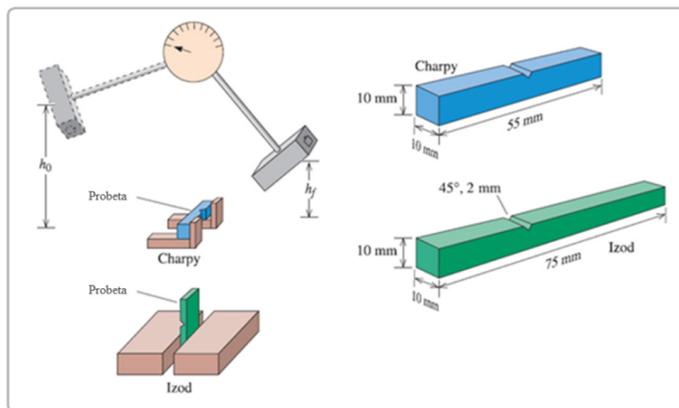


Figura 19. Ensayo tipo Charpy y tipo Izod con sus respectivas probetas.

Fuente: Askeland, 2010, p.227

2.4 ENSAYOS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Como se indicó anteriormente, existen diferentes tipos de ensayo, que, al realizarlos, establecen el comportamiento de los materiales para diferentes tipos de cargas. La manera como se aplican las fuerzas, determina las propiedades que posee cada material; por tal razón, se recomienda seguir la normativa establecida para realizar cada ensayo. Todos los materiales no poseen todas las características juntas, por ejemplo, el acero es un material dúctil a tracción, pero cuando sufre un esfuerzo a compresión se considera un material frágil; los materiales cerámicos tienen poca resistencia al impacto (baja tenacidad), pero tienen un alto índice

de dureza. Debido a esto, a cada material se le realizan ensayos específicos para determinar su aplicación en las diferentes áreas de la ingeniería.

2.4.1 Acero

El acero es una aleación compuesta, en mayor parte, por hierro y carbono. Es el material metálico más utilizado en la mayoría de áreas de la ingeniería. El contenido de carbono afecta en sus propiedades mecánicas. Por ejemplo, en el área de la construcción, se manejan aceros con bajo contenido de carbono (menores o iguales a 0.3 %) por las características que ofrece (ductilidad, resiliencia, tenacidad, entre otras). Mientras que, en el área de la industria, se implementan aceros con alto contenido de carbono (0.5 % - 4 %), en los ejes de transmisión de potencia o en elementos de maquinaria por su alta resistencia a la torsión.

2.4.1.1 Ensayo de tracción:

Esta prueba se realiza para determinar la resistencia de fluencia, el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción, la deformación y la reducción de la sección transversal. La norma internacional que rige este tipo de ensayos es la ASTM E8, la norma técnica colombiana que rige este tipo de ensayos es la NTC 2. En el capítulo 3.1 se explica brevemente cómo se realiza este ensayo. La curva esfuerzo-deformación es el resultado de esta prueba, en este se pueden distinguir los diferentes comportamientos de la probeta de acero a medida que se va realizando el ensayo. La figura 20 muestra el diagrama esfuerzo-deformación para una probeta cilíndrica estándar. Como se ilustra, esta curva tiene dos comportamientos fácilmente diferenciables, uno elástico y otro plástico.

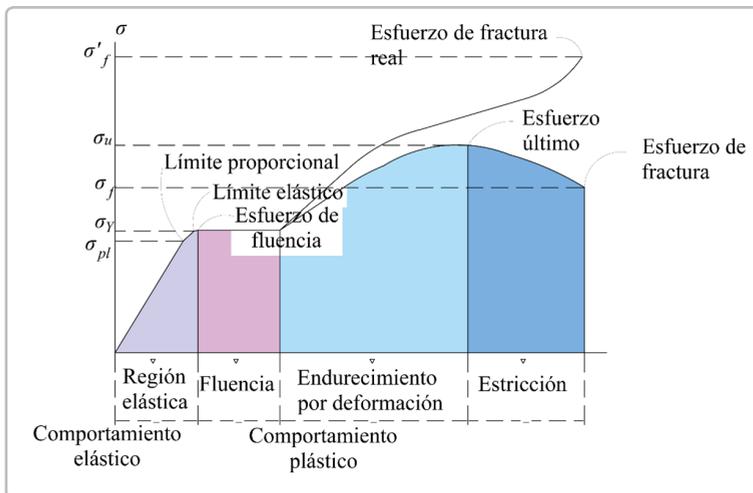


Figura 20. Diagrama esfuerzo-deformación
Fuente: ASTM, 2009.

- **Región elástica:** en esta primera región del diagrama, se puede relacionar con la ley de Hooke, la cual se define como:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Donde,

σ , es el esfuerzo a tracción (Pa o psi),

E, el módulo de elasticidad (Pa o psi), y

ε , la deformación unitaria.

Se puede ver que la ley de Hooke se asemeja a la ecuación de una recta, en donde el módulo de elasticidad se supone como la pendiente de la función. Lo anterior indica, que, el esfuerzo a tensión es proporcional a la deformación. El límite superior del esfuerzo para esta relación se denomina el límite de proporcionalidad, σ_{pl} . Si el esfuerzo excede ligeramente este límite, la curva tiende a doblarse y aplanarse, esto continúa hasta que el esfuerzo alcanza el límite elástico. Esta región es muy importante para el diseño de elementos estructurales y de maquinaria, ya que, dentro de esta zona, el material se deforma elásticamente; es decir, siempre recuperará su forma inicial una vez se haya dejado de aplicar la carga.

- **Fluencia o cedencia:** si se excede el límite elástico, ocurrirá un rompimiento del material y ocasionará que este se deforme de manera permanente (deformación plástica), estas deformaciones plásticas provocarán un incremento de la resistencia a la fluencia y una reducción en la ductilidad. El esfuerzo que genera la cedencia o fluencia, se denomina esfuerzo de fluencia, σ_y , y la deformación que se produce se denomina deformación plástica.
- **Endurecimiento por deformación:** cuando finaliza la fluencia, la probeta puede soportar un aumento en la carga, lo que resulta en una curva que asciende continuamente, pero que se vuelve más plana hasta llegar a un esfuerzo máximo, conocido como esfuerzo último, σ_u .
- **Estricción:** mientras la probeta se alarga hasta llegar al esfuerzo último, su sección transversal se reduce; justo después del esfuerzo máximo, el área de la sección transversal comenzará a disminuir hasta formar un “cuello”, aquí el diagrama se curva hacia abajo hasta que la probeta falla, llegando al esfuerzo de fractura, σ_f .

Los diagramas esfuerzo-deformación del acero varían en forma considerable, por lo que diferentes ensayos de tracción llevados a cabo sobre el mismo material pueden arrojar diferentes resultados, dependiendo de la temperatura de la probeta, imperfecciones microscópicas, los tratamientos térmicos aplicados al material en su fabricación, la rapidez con la que se aplica la carga y la temperatura durante la realización del ensayo. Pero, la variable que afecta en mayor medida el

diagrama-esfuerzo deformación, es el contenido de carbono en el acero, ya que, la ductilidad y el esfuerzo de fluencia dependen del porcentaje de carbono en el acero; sin embargo, el módulo de elasticidad permanece constante, ya que es una característica propia del acero.

2.4.1.2 Ensayo de torsión:

Este ensayo se realiza para determinar el módulo de rigidez del acero. La norma internacional que rige este tipo de ensayo es la ASTM E143, la norma técnica colombiana que rige este tipo de ensayos es la NTC 3995. Durante la prueba, se mide la intensidad del par aplicado y el ángulo de giro debido a la torsión. La figura 21 muestra el diagrama esfuerzo-deformación para torsión del acero. El módulo de rigidez es la relación entre el esfuerzo máximo de torsión y la deformación angular de torsión por debajo del límite de proporcionalidad del material, que será la pendiente de la línea recta entre R (un esfuerzo pre-par) y P (el límite de proporcionalidad).

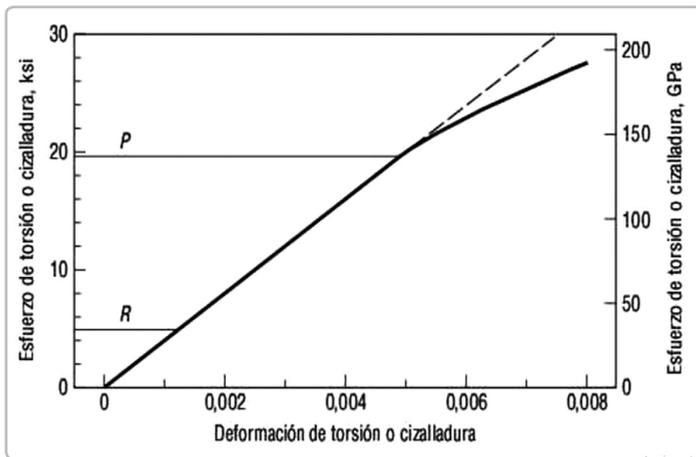


Figura 21. Diagrama esfuerzo-deformación para torsión del acero.

Fuente: ASTM, 2013.

2.4.1.3 Ensayo de impacto con péndulo Charpy:

Este ensayo mide la tenacidad o la energía requerida para fracturar una probeta de acero con una muesca en V y un único punto de soporte. El ensayo se realiza para aceros estructurales de elementos sometidos a tensión. La norma internacional que rige este tipo de ensayo es la ASTM E23, la norma técnica colombiana que rige este tipo de ensayos es la NTC 20. La probeta tiene dimensiones de 55 x 10 x 10 mm con una muesca en V en el centro, la probeta se muestra en la figura 19. La probeta se ubica en el péndulo Charpy, mediante unas pinzas agarradoras. La probeta se fractura cuando el brazo rotatorio se libera e impacta con la misma.

2.4.1.4 Ensayo de flexión:

Este ensayo evalúa el comportamiento del acero, de no presentar fisuras durante la flexión. La norma internacional que rige este tipo de ensayo, es la ASTM E290. El ensayo se efectúa flexionando el espécimen un ángulo determinado y con un radio de curvatura interior especificado. La probeta falla cuando se fractura, si no ocurre lo anterior, se cuentan el número y el tamaño de las fisuras que aparecen en la superficie de tensionado de la probeta. El ensayo de flexión se efectúa aplicando una fuerza perpendicular al eje axial de la probeta a fallar, generalmente en su centro. El ensayo se puede desarrollar de tres formas distintas, figura 22. Primero, se fija la probeta en un extremo dejando el otro libre y, en este, se aplica una carga que genera el esfuerzo a flexión, figura 22 (a). Segundo, la probeta se fija en un extremo y se utiliza un dispositivo rotatorio que dobla la probeta, figura 22 (b). Por último, se soporta la probeta en dos puntos y se aplica una carga en la parte central hacia abajo para producir la falla, figura 22 (c).

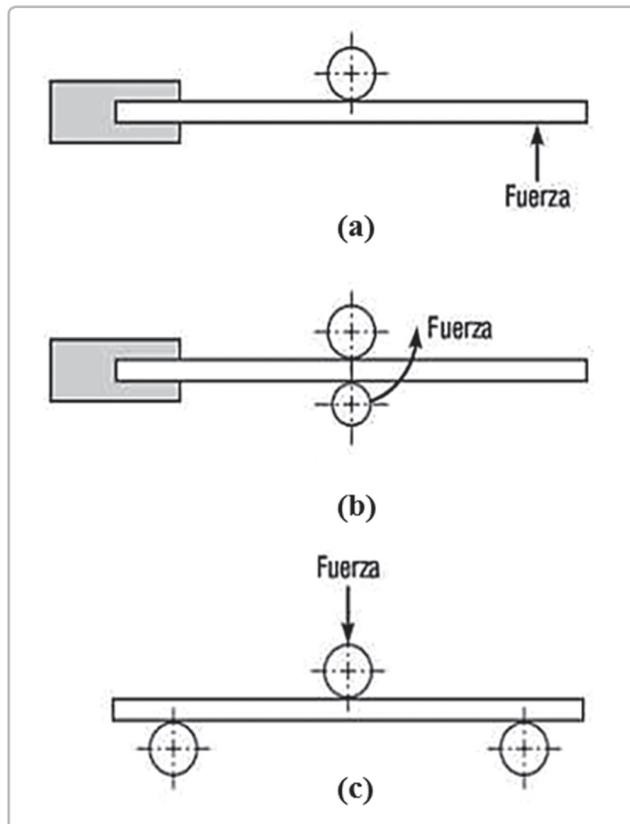


Figura 22. Esquemas para pruebas de flexión.

Fuente: ASTM, 2014.

2.4.1.5 Ensayo de dureza:

Este ensayo permite conocer la dureza de un material mediante la introducción de un indentador en la superficie del material, en condiciones específicas de velocidad y de carga. La profundidad de la penetración se mide y se relaciona con un número que establece el índice de dureza. A menor profundidad de indentación, mayor índice de dureza. El ensayo de dureza de Rockwell es el ensayo mayormente utilizado, la norma internacional que rige este tipo de ensayo es la ASTM E18. El ensayo de dureza es un ensayo no destructivo, económico y fácil de realizar; además, mediante el índice de dureza, se puede determinar la resistencia a la tracción del mismo material.

2.4.2 Concreto

2.4.2.1 Ensayo de compresión:

Es la prueba que más se efectúa con el concreto endurecido. La resistencia a la compresión es un requisito fundamental para el diseño de estructuras, ya que se debe conocer si soportará la carga o no. La resistencia a la compresión del concreto, se encuentra entre 20 MPa y 40 MPa (3000 psi y 6000 psi). La norma internacional que rige este ensayo es la ASTM C39. La norma técnica colombiana que rige este ensayo es la NTC 673. El tamaño estándar de las probetas es de 150 mm de diámetro y de 300 mm de altura, aunque se pueden utilizar otros tamaños que tengan una relación diámetro-altura igual a dos; esto debido a que se debe eliminar el efecto terminal debido a la fricción entre las cabezas de carga y la probeta. Mediante la máquina universal, las probetas se fallan hasta la rotura aplicando una carga axial a una velocidad específica.

Normalmente, se prueban tres o más probetas para cada edad del concreto y para cada condición de carga. El concreto se falla a los 7 y 28 días de fabricadas. La resistencia se determina dividiendo el valor de la fuerza aplicada entre la sección transversal. La granulometría de los agregados, la cantidad de agua y la calidad de los materiales, afecta el resultado de la resistencia del material. La figura 23 muestra los patrones de fractura típicos en probetas de concreto al ser falladas a compresión (Tipos 1 a 4). Si la máquina universal no posee cabezales adheridos, puede ocurrir una fractura en la esquina, similar a los Tipos 5 y 6.

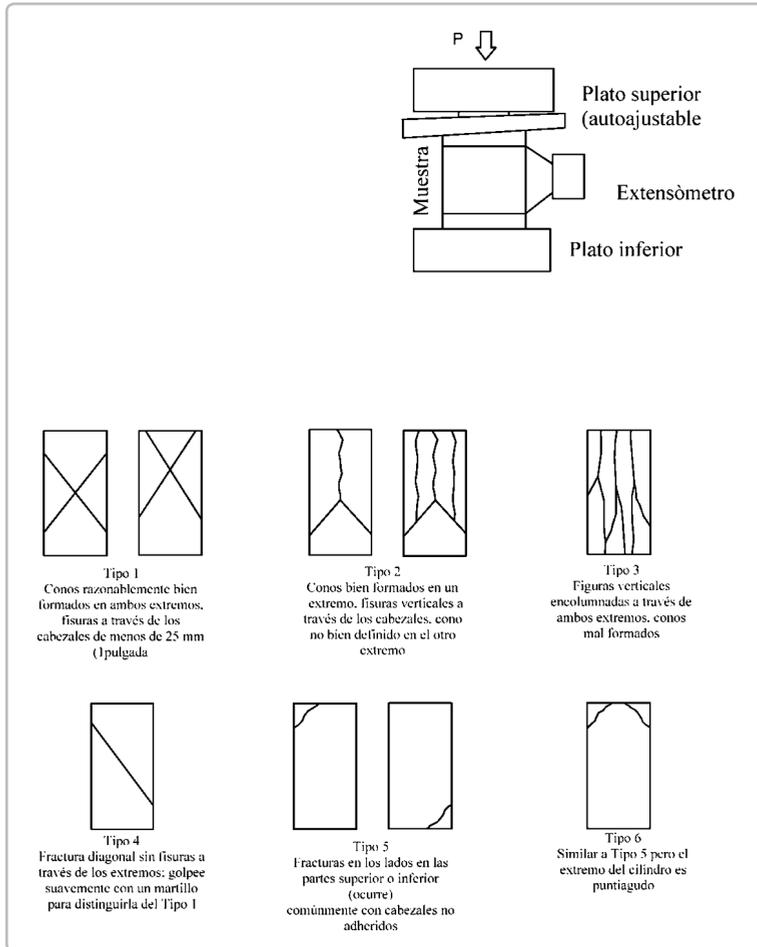


Figura 23. Patrones de fractura típicos en probetas de concreto.

Fuente: ICONTEC, 2010.

2.4.2.2 Ensayo de compresión diametral:

O método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto. Este ensayo mide la resistencia a la tracción del concreto. La norma internacional que rige este tipo de ensayo es la ASTM C496. La norma colombiana que rige este ensayo es la NTC 722. La figura 24 muestra cómo se realiza este ensayo. Se somete un cilindro de concreto de 150 mm de diámetro y una altura de 300 mm a una carga de compresión a velocidad constante según el diámetro vertical, hasta que se produce la fractura. La resistencia de compresión diametral (resistencia indirecta de tracción) se calcula como:

$$T = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Donde,

T, es la resistencia a la tracción,

P, es la fuerza de fractura,

L, es la longitud de la probeta, y

d, es el diámetro de la probeta.

Los valores entre los que se encuentra la resistencia a la tracción indirecta del concreto, oscilan entre 2,5 MPa y 3,1 MPa (360 psi y 450 psi). La resistencia a la tracción del concreto es aproximadamente un 10 % de su resistencia a la compresión.

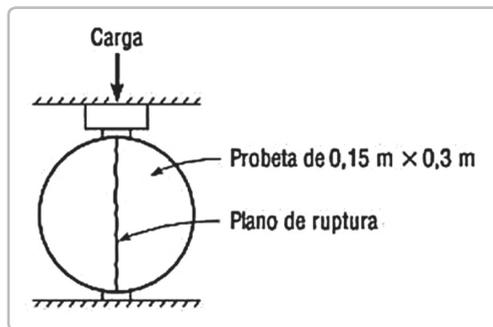


Figura 24. Ensayo de compresión diametral.

Fuente: ASTM, 2017.

2.4.2.3 Ensayo de resistencia a la flexión:

Esta prueba es importante para el diseño y la construcción de vías y pavimentos de concreto para aeropuertos. La norma internacional que rige este tipo de ensayo es la ASTM C78. Se recomienda que la probeta tenga una sección transversal cuadrada. Las dimensiones estándar son una sección transversal de 150 mm (6in) por 150 mm (6in) y una longitud de 450 mm (18 in). La figura 25 indica la manera en que debe ubicarse la probeta para la falla. La carga se aplica de manera continua a una velocidad constante hasta que se fracture. Si la falla inicia en la superficie correspondiente al tercio central del vano, la resistencia a la flexión se calcula mediante:

$$\sigma_{flexión} = \frac{M \cdot c}{I}$$

Donde,

σ , flexión es la resistencia a la flexión (MPa o psi),

M , es el momento flector máximo (N.mm o lb.in),

c , es la distancia más alejada tomada desde el eje neutro de la sección transversal (mm o in),

I , el momento de inercia de la sección transversal (mm⁴ o in⁴),

P , carga máxima aplicada (N o lb),

L , longitud del vano (mm o in),

b , anchura media de la probeta, (mm o in), y

d , altura de la probeta, (mm o in).

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio de la longitud de separación entre apoyos, la resistencia a la flexión se halla mediante:

$$\sigma_{flexión} = 3 \frac{Pa}{bd^2}$$

Donde,

a , es la distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano (mm o in).

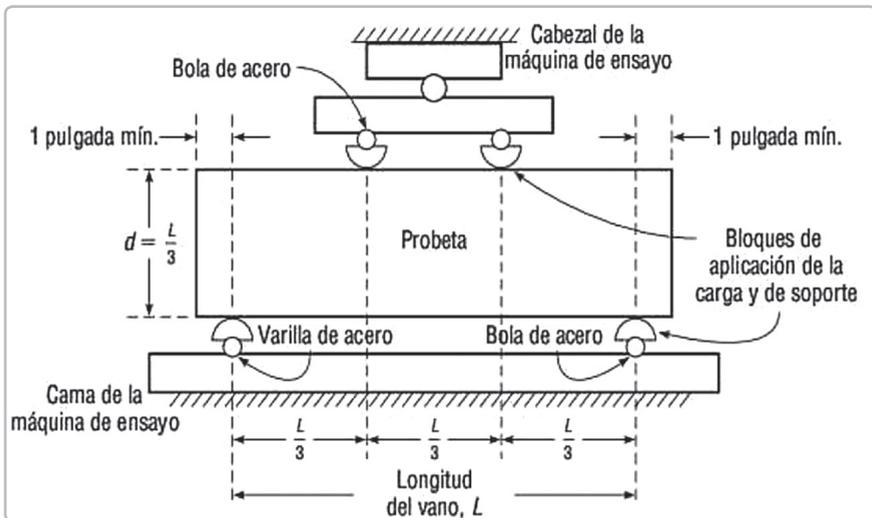


Figura 25. Ensayo a flexión mediante el método de carga por tercios.

Fuente: ASTM, 2002.

2.4.3 Madera

La madera es un material orgánico compuesto por celulosa y lignina, su principal característica es la anisotropía; es decir, su comportamiento elástico variará dependiendo la dirección en que se aplique la carga. Debido a esta característica, los resultados de los ensayos se ven afectados y es necesario seleccionar correctamente la probeta y la manera en la cual se efectuará el ensayo. La norma ASTM D 143 establece los procedimientos de ensayos completos para las diferentes probetas de madera.

2.4.3.1 *Ensayo de flexión estática:*

Este ensayo se realiza con probetas de 50 x 50 x 760 mm o 25 x 25 x 410 mm. Para las probetas de mayor tamaño, el cabezal de carga se ubica en el centro de la probeta con una distancia entre apoyos de 710 mm y la carga se aplica con una velocidad de 2,5 mm/min. Para las probetas de menor tamaño, el cabezal de carga se coloca en el centro de la probeta con una distancia ente apoyos de 360 mm y la carga se aplica a una velocidad de 1,3 mm/min. En la prueba se registran la fuerza y la deflexión de la primera fractura, la carga máxima y los puntos de cambio súbito. La apariencia de la fractura se describe como quebradiza o fibrosa. Una apariencia quebradiza indica una fractura limpia, mientras que una fractura fibrosa indica una fractura con astillado.

2.4.3.2 *Ensayo de compresión:*

El ensayo de compresión paralelo a la veta se realiza con probetas de 50 x 50 x 200 mm o 25 x 25 x 100 mm. La fuerza se aplica a una velocidad igual a 0,003 mm/mm de la longitud nominal por minuto. Las lecturas relacionan la carga con la compresión hasta más allá del límite de proporcionalidad. El tipo de fractura puede clasificarse como aplastamiento, cuña, corte, partición y corte, astillado y deformación, como se muestra en la Figura 26.

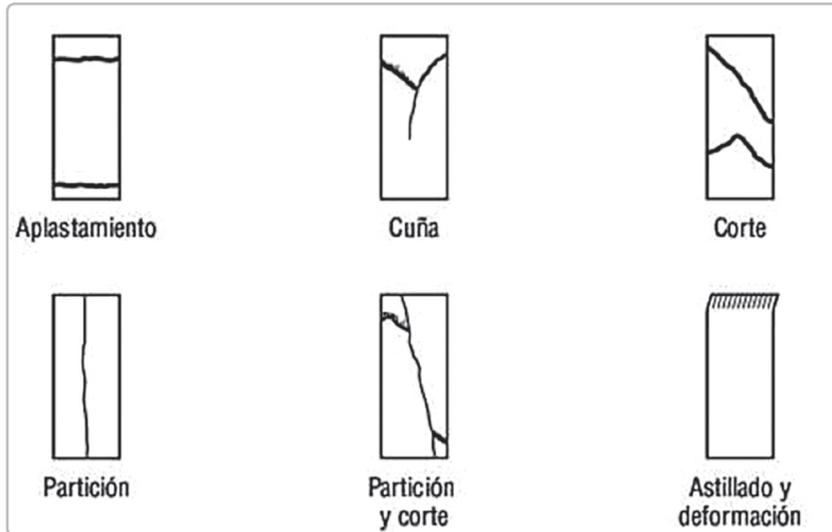


Figura 26. Tipos de fractura en la prueba de compresión paralela a la veta (ASTM D143).

Fuente: ASTM, 2014.

El ensayo de compresión perpendicular a la veta se realiza con probetas de 50 x 50 x 150 mm. La carga se aplica mediante una placa de soporte metálica de 50 mm de anchura, centrada sobre la superficie superior de la probeta. La carga se aplica a una velocidad de 0,305 mm/min.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2010). The Science and Engineering of Materials. *Materials Science and Engineering: B*, 12(4). DOI: [http://doi.org/10.1016/0921-5107\(92\)90012-X](http://doi.org/10.1016/0921-5107(92)90012-X)
- ASTM Int. Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, Astm 1-10 (2014). <http://doi.org/10.1520/E0290-14>
- ASTM Int. Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Astm 1-8 (2018). http://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-18

- ASTM Int. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Thurd-Point Loading), Astm 1-5 (2018). http://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-18
- ASTM Int. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, Astm 1-26 (2016). <http://doi.org/10.1520/E0023-16B>.
- ASTM Int. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, Astm 1-38 (2017). <http://doi.org/10.1520/E0018-17E01>
- ASTM Int. Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature, Astm 1-5 (2013). <http://doi.org/10.1520/E0143-13>
- ASTM Int. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, Astm 1-31 (2014). <http://doi.org/10.1520/D0143-14>
- ASTM Int. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Astm 1-5 (2017). http://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17
- ASTM Int. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials 1, Astm 1–27 (2009). <http://doi.org/10.1520/E0008>
- Barroso Herrero, S., & Ibáñez Ulargui, J. (2014). *Introducción al conocimiento de materiales*. Madrid, España: UNED.
- ICONTEC. NTC 673 - CONCRETOS. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO, Pub. L. No. NTC 673, 17 (2010). Colombia.
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2009). *Materiales para ingeniería civil*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A.
- Sánchez Vergara, M. E., & Campos Silva, I. E. (2010). *Tecnología de materiales*. México D.F.. Trillas
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* México D.F. McGraw-Hill.
- William, D., & Callister, J. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. MEXicp Reverté.