

demostrado que la composición química del acero usado en el *Titanic* y los esfuerzos asociados con la fabricación y la fragilización de ese acero, al someterlo a temperaturas bajas, fueron factores que contribuyeron a la falla del casco del buque.[2,3] Algunos investigadores han demostrado que también contribuyeron a esa falla remaches débiles y errores de diseño.

El objeto principal de este capítulo es presentar los conceptos básicos asociados con las

propiedades mecánicas. Aprenderemos términos básicos como dureza, esfuerzo, deformación, deformación elástica y plástica, viscoelasticidad, rapidez de deformación, tenacidad a la fractura, fatiga, fluencia, etc. También revisaremos algunos de los procedimientos básicos de ensayo que se usan para evaluar muchas de esas propiedades. Estos conceptos se describirán junto con ejemplos de aplicaciones en el mundo real.

6-1

Importancia tecnológica

En muchas de las tecnologías emergentes en la actualidad, se hace hincapié en las propiedades mecánicas de los materiales que se usan. Por ejemplo, en la fabricación de aviones, las aleaciones de aluminio o los materiales compuestos reforzados con carbono, usados para componentes de aviones, deben ser ligeros, resistentes y deben resistir cargas mecánicas cíclicas durante un periodo largo y predecible (Fig. 6-1). Los aceros empleados en la construcción de estructuras, como en edificios y puentes, deben tener la resistencia adecuada como para que se puedan construir sin poner en peligro la seguridad. Los plásticos para fabricación de tubos, válvulas, pisos, etc., también deben tener una resistencia mecánica adecuada. Los materiales como el



Figura 6-1 Los aviones, como el que aquí se muestra, usan aleaciones de aluminio y materiales compuestos reforzados con fibra de carbono. (Cortesía de Getty Images.)

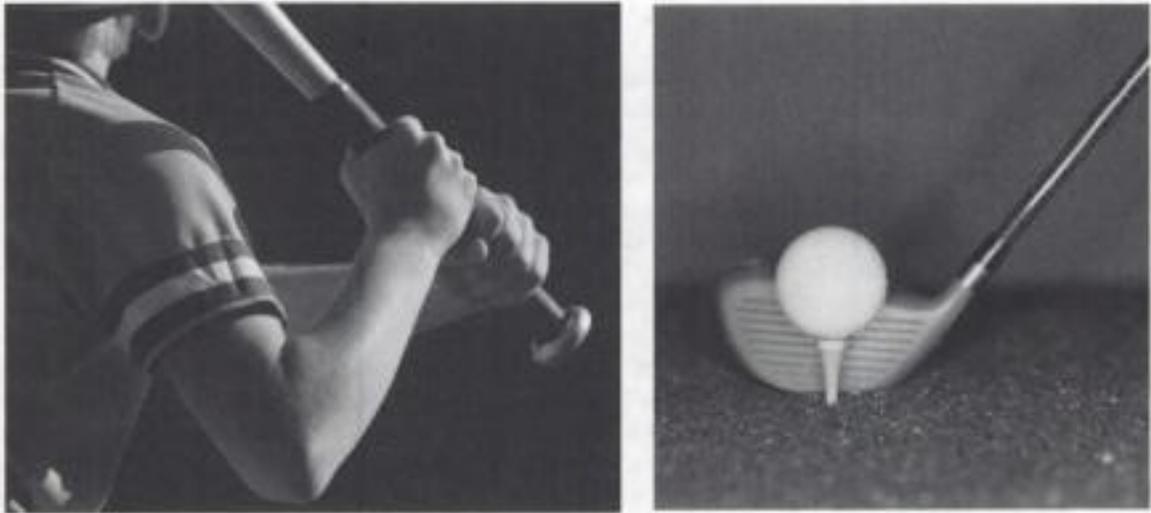


Figura 6-2 Los materiales que se usan en los equipos deportivos deben ser ligeros, rígidos, tenaces y deben resistir impactos. (Cortesía de Getty Images.)

grafito pirolítico o las aleaciones de cobalto, cromo y tungsteno, que se usan como prótesis en válvulas cardíacas, no deben fallar.[4] En forma parecida, el desempeño de las pelotas de béisbol, los palos de cricket, las raquetas de tenis, los palos de golf, los esquís y demás equipo deportivo no sólo dependen de la resistencia y el peso de los materiales que se usan, sino también de su capacidad para funcionar bajo una carga de “impacto” (Fig. 6-2). Es fácil apreciar la importancia de las propiedades mecánicas en muchas de estas aplicaciones a “cargas dinámicas.”

En los capítulos 1 y 2 aprendimos que se usan materiales diseñados avanzados en tecnologías basadas en propiedades electrónicas, magnéticas, ópticas, biológicas y otras más. En la mayoría de esas aplicaciones, también las propiedades mecánicas del material desempeñan un papel importante. Por ejemplo, una fibra óptica debe tener cierto grado de resistencia para tolerar los esfuerzos que encuentre durante su aplicación. Una aleación biocompatible de titanio para un implante de hueso debe tener la suficiente resistencia y tenacidad como para sobrevivir sin fallar durante muchos años en el cuerpo humano. Un recubrimiento resistente a las rayaduras, sobre los lentes ópticos, debe resistir la abrasión mecánica. Una aleación de aluminio o un sustrato de vitrocerámica usados como base para fabricar unidades de disco duro debe tener la suficiente resistencia mecánica, para que no se rompa o agriete durante un funcionamiento que requiere la rotación a altas velocidades. De igual modo, los paquetes electrónicos que se usan para guardar *chips* o *microcontroladores* de semiconductores y las arquitecturas de película delgada formadas sobre el *chip* semiconductor deben resistir los esfuerzos encontrados en diversas aplicaciones, así como los que se presentan durante el calentamiento y enfriamiento de los dispositivos electrónicos. La robustez mecánica de los dispositivos pequeños preparados con sistemas microelectromecánicos (*MEMS*, por sus siglas en inglés) y en nanotecnología también es importante. El vidrio flotado de los automóviles y los edificios debe tener suficiente resistencia mecánica y contra el astillado. Muchos componentes diseñados con plásticos, metales y cerámicos no sólo deben tener la tenacidad y la resistencia adecuadas a temperatura ambiente, sino también a temperaturas relativamente altas y bajas. Lo que queremos decir es muy sencillo; las propiedades mecánicas de un material y las de un componente son críticas en muchas aplicaciones en las cuales lo principal en el funcionamiento pueden ser las propiedades electrónicas, ópticas, magnéticas, biológicas u otras más.

Para aplicaciones sujetas a cargas dinámicas, se seleccionan materiales diseñados comparando sus propiedades mecánicas con las especificaciones de diseño y las condiciones de servicio necesarias en el componente. El primer paso en el proceso de selección requiere un

análisis de la aplicación del material, para determinar sus características más importantes. ¿Debe ser resistente, rígido o dúctil? ¿Se someterá a una aplicación donde se presente un gran esfuerzo o una fuerza intensa repentina, o gran esfuerzo a temperatura elevada, o esfuerzos cíclicos, o a condiciones corrosivas o abrasivas? Una vez conocidas las propiedades requeridas, se puede hacer una selección preliminar del material adecuado usando diversas bases de datos. Sin embargo, se debe conocer cómo se obtienen las propiedades que muestra el manual, saber qué significan las propiedades y darse cuenta de que las propiedades que aparecen se obtienen en ensayos idealizados que podrán no adecuarse en forma exacta a las aplicaciones técnicas de la vida real. Los materiales con la misma composición química y otras propiedades iguales pueden tener propiedades mecánicas muy distintas, dependiendo de su microestructura. Además, los cambios de temperatura, la naturaleza cíclica de los esfuerzos aplicados, los cambios químicos causados por oxidación, corrosión o erosión, los cambios microestructurales debidos a la temperatura, el efecto de posibles defectos introducidos durante las operaciones de maquinado (rectificación, soldadura, corte, etc.), u otros factores, también pueden tener un gran efecto sobre el comportamiento mecánico de los materiales. Un ingeniero competente y profesional conocerá esas posibilidades y podrá tenerlas en cuenta, junto con la seguridad, costo, impacto ambiental y otros requisitos, al diseñar y fabricar distintos componentes.

También se deben comprender las propiedades mecánicas de los materiales, para que se puedan procesar y obtener formas útiles, empleando técnicas de procesamiento de materiales. El procesamiento de materiales, como por ejemplo, el uso de aceros y plásticos para fabricar carrocerías de automóvil, requiere una comprensión detallada de las propiedades mecánicas de los materiales a distintas temperaturas y condiciones de carga; por ejemplo, el comportamiento mecánico de los aceros y los plásticos con que se fabrican artículos tales como carrocerías aerodinámicas para automóviles. Una de las razones por las cuales los aceros se trefilan, laminan, forjan, extruyen y estampan, igual que muchas otras aleaciones, calentándolas primero a altas temperaturas, es que se vuelven dúctiles a esas temperaturas. De igual modo, se usan cambios favorables en las propiedades de plásticos y vidrios durante su procesamiento para obtener formas distintas (como las fibras ópticas).

En las siguientes secciones, describiremos las propiedades mecánicas de los materiales. Definiremos y describiremos diversos términos para describir las propiedades mecánicas de los materiales diseñados. También se describirán los distintos ensayos con que se determinan las propiedades mecánicas de los materiales.

6-2 Terminología de las propiedades mecánicas

Hay distintas clases de fuerzas o "esfuerzos" que se presentan al tratar las propiedades mecánicas de los materiales. En general, se define el **esfuerzo** como una fuerza que actúa sobre el área unitaria en la que se aplica. En la figura 6-3(a) se ilustran los esfuerzos de tensión, compresión, corte y flexión. La **deformación unitaria** se define como el cambio de dimensión por unidad de longitud. El esfuerzo se suele expresar en Pa (pascales) o en psi (libras por pulgadas cuadradas, por sus siglas en inglés). La deformación unitaria no tiene dimensiones y con frecuencia se expresa en pulg/pulg o en cm/cm.

Al describir el esfuerzo y la deformación unitaria, es útil imaginar que el esfuerzo es la *causa* y la deformación unitaria es el *efecto*. Normalmente, los esfuerzos de tensión y de corte se representan con los símbolos σ y τ , respectivamente. Las deformaciones de tensión y de corte se indican con los símbolos ϵ y γ , respectivamente. En muchas aplicaciones sujetas a cargas dinámicas, intervienen esfuerzos de tensión o de compresión. Los esfuerzos cortantes o de cizallamiento, se suelen encontrar en el procesamiento de materiales en técnicas como la extrusión de polímeros. También se encuentran en aplicaciones estructurales. Obsérvese que aun un esfuerzo tensil simple, aplicado en una dirección, causa un esfuerzo cortante en componentes con otras direcciones (parecido al caso descrito en la ley de Schmid, capítulo 4).

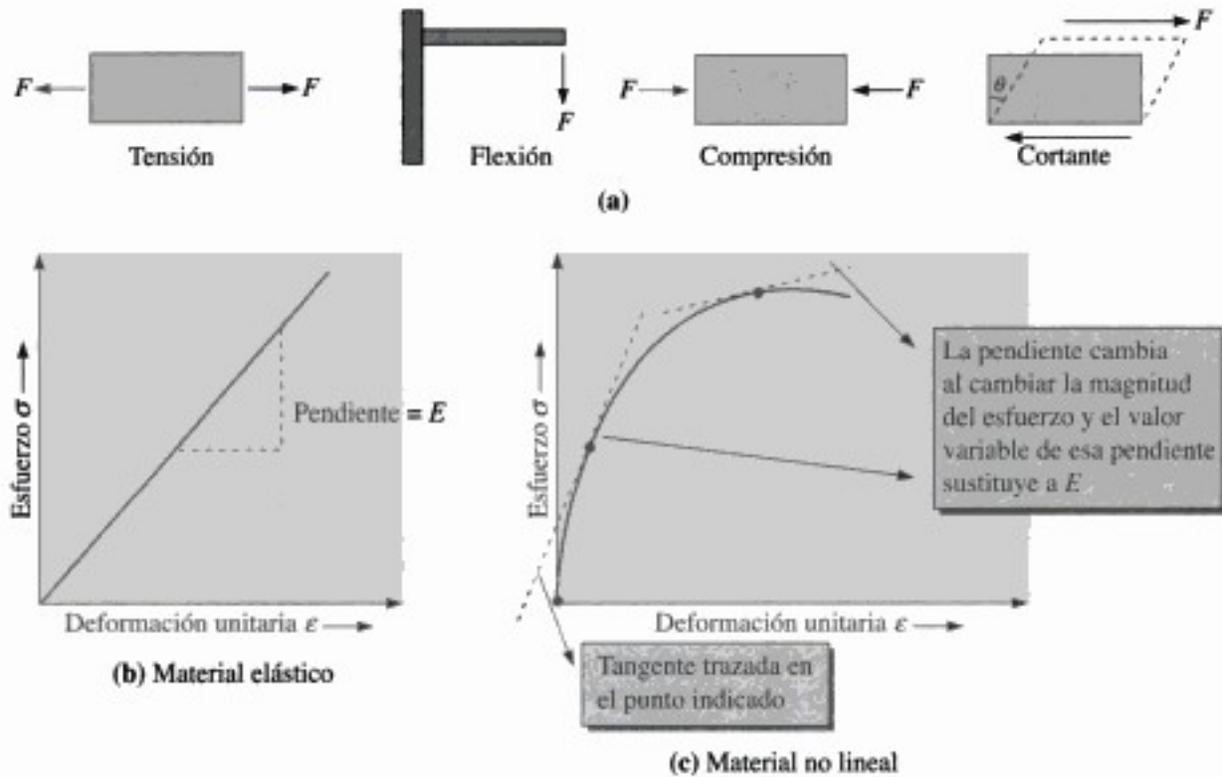


Figura 6-3 (a) Esfuerzos de tensión, compresión, cortante y flexión. (b) Definición del módulo de Young para un material elástico. (c) Para materiales no lineales se usa la pendiente de una tangente como variable que reemplaza el módulo de Young, que es constante.

La **deformación (unitaria) elástica** se define como una deformación restaurable debido a un esfuerzo aplicado. La deformación es "elástica" si se desarrolla en forma instantánea; es decir, se presenta tan pronto como se aplica la fuerza, permanece mientras se aplica el esfuerzo y desaparece tan pronto como se retira la fuerza. Un material sujeto a una deformación elástica no muestra deformación permanente; es decir, regresa a su forma original cuando se retira la fuerza o el esfuerzo. Imagine que un resorte metálico rígido se estira una cantidad pequeña y entonces se suelta. Si regresa con rapidez a sus dimensiones originales, la deformación que se produjo en el resorte era elástica.

En muchos materiales, el esfuerzo y la deformación elásticos siguen una ley lineal. La pendiente en la porción lineal de la curva esfuerzo contra deformación unitaria a tensión define al **módulo de Young** o **módulo de elasticidad** (E) de un material [Fig. 6-3(b)]. Las unidades de E se miden en pascales (Pa) o en libras por pulgada cuadrada (psi), las mismas que las del esfuerzo. En los **elastómeros** se observan deformaciones elásticas grandes, como en el hule natural o las siliconas, donde la relación entre esfuerzo y deformación elásticos no es lineal. En ellos, la enorme deformación elástica se explica por el enredado y desenredado de moléculas semejantes a resortes (capítulo 15). Al manejar esos materiales, se usa la pendiente de la tangente en cualquier valor determinado del esfuerzo o de la deformación, y se le considera como una cantidad variable que reemplaza al módulo de Young [Fig. 6-3(b)]. El inverso del módulo de Young se llama **flexibilidad** (o **capacidad elástica de deformación**) del material. De forma parecida, se define al **módulo de elasticidad cortante** (G) como la pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo cortante contra deformación cortante.

La deformación permanente en un material se llama **deformación plástica**. En este caso, cuando se quita el esfuerzo, el material *no* regresa a su forma original. ¡La abolladura en un auto es una deformación plástica! Observe que aquí la palabra "plástica" no indica deformación

en un material plástico o polimérico, sino más bien una clase de deformación en cualquier material.

La rapidez con que se desarrolla la deformación en un material se define como **velocidad de deformación** ($\dot{\epsilon}$ o $\dot{\gamma}$, respectivamente, para la velocidad de deformación por tensión y por cortante). Las unidades de la velocidad de deformación son s^{-1} . Más adelante en este capítulo, veremos que la rapidez con que se deforma un material es importante desde la perspectiva de las propiedades mecánicas. Muchos materiales que se consideran dúctiles se comportan como sólidos frágiles cuando la velocidad de deformación es alta. La masilla Silly Putty®, un polímero de silicona, es un ejemplo de esos materiales. Cuando se estira con lentitud (velocidad de deformación baja), el material se puede estirar grandes cantidades; sin embargo, cuando se estira con rapidez (velocidad de deformación alta) no se da tiempo a que se desenreden y extiendan las grandes moléculas de polímero y, en consecuencia, el material se rompe. Cuando la velocidad de deformación es baja, la masilla Silly Putty® puede manifestar gran ductilidad. Cuando los materiales se sujetan a grandes velocidades de deformación, le llamamos a la carga que la genera como **carga de impacto o dinámica**.

Un **material viscoso** es uno en el cual se desarrolla la deformación durante cierto tiempo, y el material no regresa a su forma original al quitar el esfuerzo. El desarrollo de la deformación toma tiempo, y no está en fase con el esfuerzo aplicado. Además, el material permanece deformado cuando se quita el esfuerzo aplicado (es decir, la deformación es plástica). Un **material viscoelástico** (o **anelástico**) puede concebirse como uno cuya respuesta es intermedia entre la de un material viscoso y un material elástico. El término "anelástico" se suele aplicar en los metales, mientras que "viscoelástico" se suele asociar a los materiales poliméricos. Muchos plásticos (sólidos y fundidos) son viscoelásticos. Un ejemplo frecuente de un material viscoelástico es la masilla Silly Putty®.

En un material viscoelástico, el desarrollo de una deformación permanente se parece al de un material viscoso. Sin embargo, a diferencia de un material viscoso, cuando se quita el esfuerzo aplicado, parte de la deformación desaparece después de cierto tiempo. La recuperación de la deformación es el cambio en la forma de un material después de quitar el esfuerzo que causa la deformación. Una descripción cualitativa del desarrollo de la deformación en función del tiempo, en relación con una fuerza aplicada en los materiales elásticos, viscosos y viscoelásticos se muestra en la figura 6-4. En los materiales viscoelásticos mantenidos bajo deformación constante, al pasar el tiempo, la magnitud del esfuerzo disminuye. A esto se le llama **relajación de esfuerzo**. La recuperación de la deformación y la relajación de esfuerzo son términos distintos y no se deben confundir. Un ejemplo frecuente de la relajación de esfuerzo es el de las cuerdas de nylon tensadas en una raqueta de tenis. Se sabe que la magnitud del esfuerzo, o la "tensión", como la llaman los tenistas, disminuye al paso del tiempo.

Al tratar materiales fundidos, líquidos y dispersiones, como pinturas o geles, se requiere una descripción de la resistencia al flujo o corrimiento bajo la acción de un esfuerzo aplicado. Si la relación entre el esfuerzo aplicado y la **velocidad de deformación cortante** ($\dot{\gamma}$) es lineal, el material se llama **newtoniano**. La pendiente del esfuerzo cortante en función de la deformación cortante en régimen estacionario se define como **viscosidad** (η) del material. El agua es un ejemplo de un material newtoniano. La siguiente relación define a la viscosidad:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (6-1a)$$

Las unidades de η son Pa-s en el sistema SI, o poises (P) o $\frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$ en el sistema cgs. A veces se usa el término centipoise (cP); $1 \text{ cP} = 10^{-2} \text{ P}$.

La conversión entre estas unidades es $1 \text{ Pa-s} = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$.

La **viscosidad cinemática** (ν) se define como:

$$\nu = \eta / \rho \quad (6-1b)$$

donde la viscosidad (η) está en poises y la densidad (ρ) está en g/cm^3 . La unidad de viscosidad cinemática es el stokes (St). En la ecuación, St equivale a cm^2/s . A veces se usa la unidad centistokes (cSt); $1 \text{ cSt} = 10^{-2} \text{ St}$.

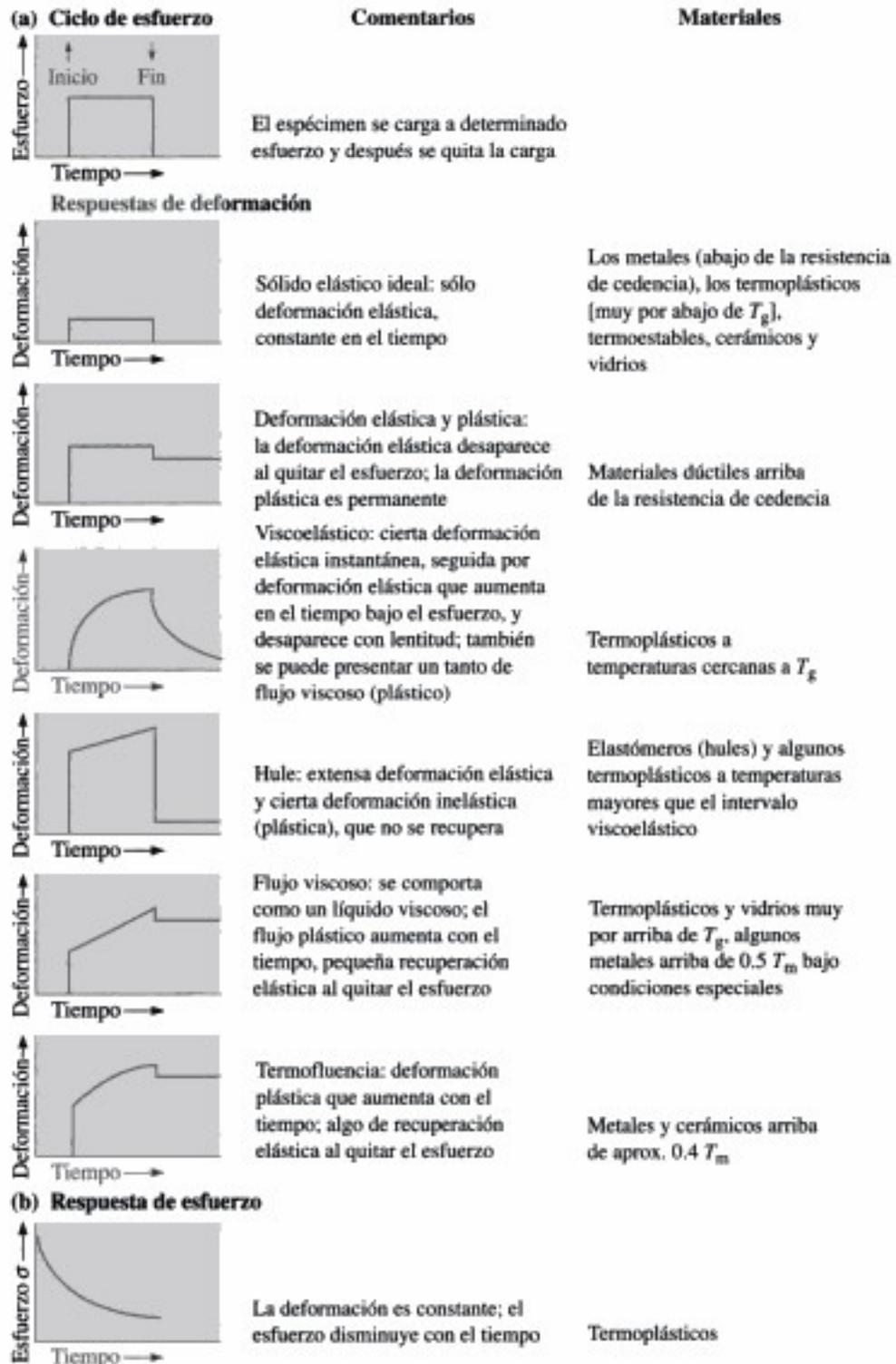


Figura 6-4 (a) Diversas clases de deformación en respuesta a un esfuerzo. (Fuente: Reimpreso de *Materials Principles and Practice*, por C. Newey y G. Weaver (Eds.), 1991, p. 300, fig. 6-9. Copyright © 1991, Butterworth-Heinemann. Reimpreso con autorización de Elsevier Science.)

(b) Relajamiento de esfuerzo en un material viscoelástico. Obsérvese que el eje y es de esfuerzo. La deformación es constante.

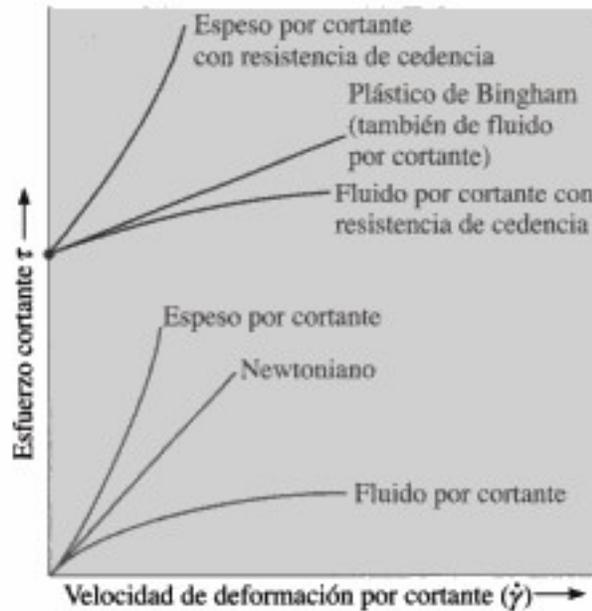


Figura 6-5
Relaciones entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación por cortante, para materiales newtonianos y no newtonianos.

En muchos materiales, la relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación cortante es no lineal. Esos materiales son **no newtonianos**. La relación de esfuerzo en función de la velocidad de deformación cortante estable en estos materiales se puede describir como:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}^m \quad (6-2)$$

en la que el exponente m no es igual a 1.

Los materiales no newtonianos se clasifican como **fluidos por cortante** (o seudoplásticos) o en **espesos por cortante** (o dilatantes). Las relaciones entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación cortante para distintas clases de materiales se muestra en la figura 6-5. Como se muestra en la figura 6-6(a), la **viscosidad aparente** (η_{ap}) del material disminuye al aumentar la velocidad de deformación cortante en estado estacionario. Si se toma la pendiente de la línea obtenida uniendo el origen con cualquier punto de la curva, lo que se determina es la viscosidad aparente. La viscosidad aparente de un material newtoniano permanece constante al cambiar la velocidad de deformación por cortante. En los materiales dilatantes, la viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de deformación cortante. Por ejemplo, en una lata de pintura almacenada, la velocidad de deformación cortante a la que se somete la pintura es muy pequeña y se comporta como muy viscosa. Cuando se toma una brocha y se pinta, la pintura se somete a una gran velocidad de deformación cortante. Ahora esa pintura se comporta como si fuera bastante fluida, delgada o menos viscosa; es decir, muestra una viscosidad aparente pequeña. Es el comportamiento dilatante.

Algunos materiales tienen un comportamiento "plástico ideal". En ellos, el esfuerzo cortante no cambia con la velocidad de deformación constante. Muchos materiales útiles se pueden modelar como **plásticos de Bingham**; se definen con las siguientes ecuaciones:

$$\tau = G\gamma \quad (\text{cuando } \tau \text{ es menor que } \tau_y) \quad (6-3a)$$

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (\text{cuando } \tau \geq \tau_y) \quad (6-3b)$$

Esto se muestra en la figura 6-6(b) y 6-6(c).

En estas ecuaciones, τ_y es la **resistencia de cedencia** aparente, y se obtiene interpolando los datos de esfuerzo cortante-velocidad de deformación cortante para un valor de esta última igual a cero. Se definirá la resistencia de cedencia como el valor del esfuerzo que se debe superar para que el material comience a deformarse plásticamente. No se ha demostrado en

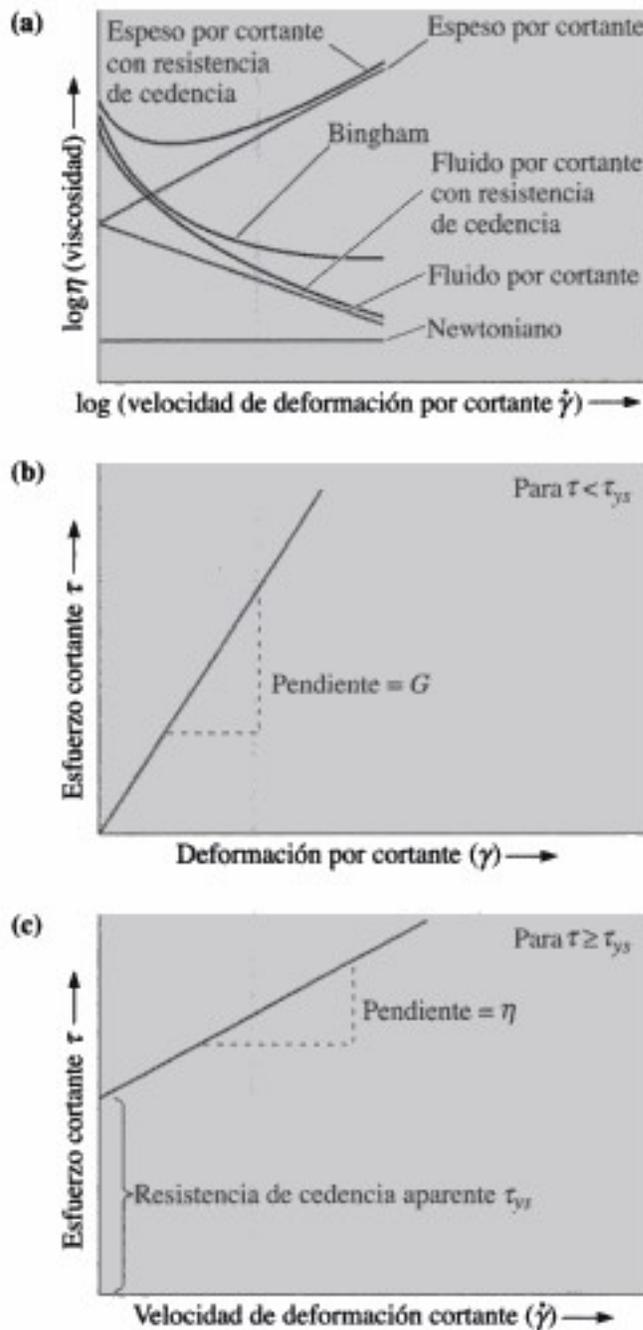


Figura 6-6
 (a) Viscosidad aparente en función de log (cortante) (velocidad de deformación cortante $\dot{\gamma}$) (b) y (c) comportamiento de un plástico de Bingham (ecuaciones 6-3a y b). Obsérvese que en (b), el eje x es deformación por cortante.

forma contundente la existencia de una resistencia real de cedencia (que a veces también se llama esfuerzo de cedencia) para muchos plásticos y dispersiones, como las pinturas. Para demostrar la existencia de la resistencia de cedencia, se necesitan mediciones separadas de esfuerzo en función de la deformación unitaria. Para estos materiales, puede ser que una deformación crítica de cedencia sea mejor para describir el comportamiento mecánico.[5] Muchos lodos cerámicos (dispersiones como las "barbotinas" que se usan en el procesamiento de los cerámicos), polímeros fundidos (en el procesamiento de polímeros), pinturas y geles, así como productos alimenticios (yogurt, mayonesa, catsup, etc.) muestran un comportamiento seudoplástico de Bingham. Obsérvese que los plásticos de Bingham tienen un comportamiento

fluido por cortante o pseudoplástico; es decir, su viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de deformación cortante.

Los materiales pseudoplásticos también muestran un **comportamiento tixotrópico**, como las pinturas, lodos de cerámica, polímeros fundidos, geles, etc. Los materiales tixotrópicos suelen contener algún tipo de red de partículas o moléculas. Cuando se les aplica una deformación cortante suficientemente grande, por ejemplo, mayor que la deformación crítica de cedenencia, la red o estructura tixotrópica se rompe y los materiales comienzan a fluir. Al detenerse el esfuerzo cortante, la red se comienza a formar de nuevo y aumenta la resistencia al flujo. Los arreglos de partículas o moléculas en la red recién formada son distintos que en la red original. Es por eso que se dice que el comportamiento de los materiales tixotrópicos dependen del tiempo y del historial de las deformaciones. Algunos materiales muestran un aumento en la viscosidad aparente en función del tiempo y a una velocidad de deformación cortante constante. A estos materiales se les llama **reopécticos**.

Las propiedades reológicas de los materiales se determinan con instrumentos llamados viscosímetro o **reómetro**. En ellos, se aplica un esfuerzo o una velocidad de deformación constante al material que se esté evaluando. Se usan distintos arreglos geométricos, como por ejemplo cono y placa, placa paralela, de Couette, etcétera.

En las siguientes secciones describiremos distintas propiedades mecánicas de materiales sólidos y algunos de los métodos de ensayo para evaluarlas.

6-3 El ensayo de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación unitaria

El ensayo de tensión está muy difundido, porque las propiedades que se obtienen pueden aplicarse en el diseño de distintos componentes. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas ($\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ a $10^{-2} s^{-1}$). En la figura 6-7 se muestra un arreglo del ensayo; un espécimen o "probeta" estándar (0.505 pulg de diámetro y longitud calibrada de 2 pulg) se coloca en la máquina de prueba y se aplica una fuerza F , llamada **carga**. En la figura 6-8 se muestra una máquina universal de pruebas, en la que se pueden ejecutar tensión y compresión. Para medir la cantidad que se estira el espécimen entre las marcas de calibración cuando se aplica la carga, se usa un **extensómetro** o **galga extensométrica**. Así, lo que se mide es el cambio de longitud del espécimen, Δl , en una longitud determinada, l_0 . En ese

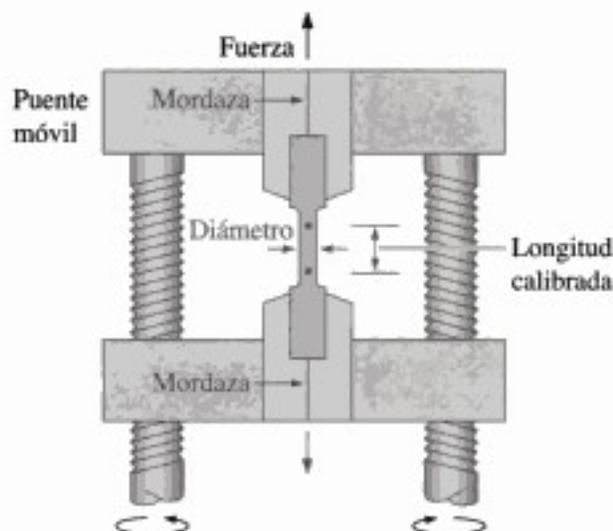


Figura 6-7

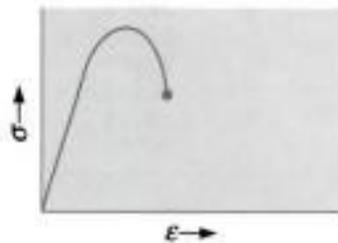
Se aplica una fuerza unidireccional a un espécimen en el ensayo de tensión, mediante el puente o cabezal móvil. El movimiento del puente puede generarse con tornillos sin fin o con un mecanismo hidráulico.



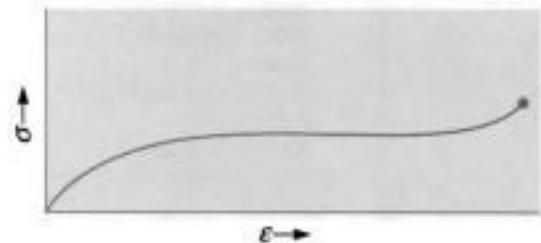
Figura 6-8 Alumnos efectuando un ensayo de tensión, con una máquina automatizada de pruebas. (Cortesía de Pradeep Phulé.)

ensayo de tensión se puede obtener información acerca de la resistencia, el módulo de Young y la ductilidad de un material. Comúnmente, el ensayo de tensión se hace con metales, aleaciones y plásticos. Se pueden hacer ensayos de tensión a cerámicos; sin embargo, no son muy frecuentes, porque la muestra se puede fracturar mientras se está alineando. La siguiente descripción se aplica principalmente al ensayo de tensión de metales y aleaciones. También se describirá en forma breve el comportamiento de polímeros en esfuerzo-deformación.

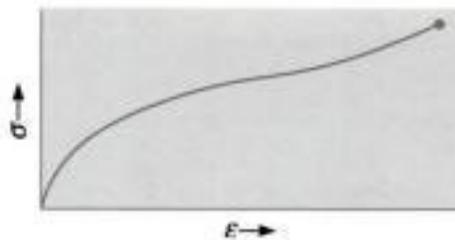
(a) Metal



(b) Material termoplástico arriba de T_g



(c) Elastómero



(d) Cerámicos, vidrios y concreto

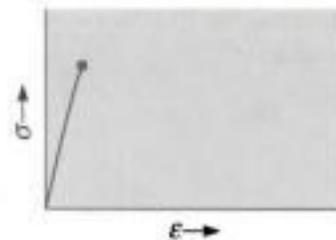


Figura 6-9 Curvas de esfuerzo-deformación a la tensión, para distintos materiales. Obsérvese que son cualitativas.

La figura 6-9 muestra *en forma cualitativa* las curvas de esfuerzo-deformación unitaria normales para (a) un metal, (b) un material termoplástico, (c) un elastómero y (d) cerámicos (o vidrio) bajo velocidades de deformación relativamente pequeñas. En esta figura, las escalas son cualitativas y distintas para cada material. En la práctica, las magnitudes reales de los esfuerzos y las deformaciones pueden ser muy distintas entre sí. Se supone que el material plástico está arriba de su **temperatura de transformación vítrea** (T_g), mientras que los materiales metálicos se asume que están a temperatura ambiente. Los materiales metálicos y termoplásticos muestran una región inicial elástica, seguida por una región plástica no lineal. También se incluye una curva aparte para elastómeros (es decir, hules o siliconas), ya que el comportamiento de esos materiales es distinto del de otros materiales poliméricos. Para los elastómeros, una gran parte de la deformación es elástica y no lineal. Por otra parte, los cerámicos y los vidrios sólo muestran una región elástica lineal y casi no muestran deformación plástica a temperatura ambiente.

Cuando se hace un ensayo de tensión, entre los datos que se anotan están los de carga o fuerza, en función del cambio de longitud (Δl). Ese cambio de longitud, o elongación, se suele medir con una galga extensométrica. La tabla 6-1 muestra el efecto de la carga sobre los cambios de longitud de una barra de ensayo de aleación de aluminio. A continuación, esos datos se convierten en esfuerzo y deformación unitaria. La curva esfuerzo-deformación unitaria se sigue analizando para obtener las propiedades de los materiales, como el módulo de Young, la resistencia de cedencia y otros.

TABLA 6-1 ■ Resultados de un ensayo de tensión ejecutado sobre un espécimen de una aleación de aluminio de 0.505 pulg de diámetro. Longitud inicial (l_0) = 2 pulg

Cambio de longitud medido (Δl)		Calculado	
		Esfuerzo	Deformación
Carga (lb)	(pulg)	(psi)	(pulg/pulg)
0	0.000	0	0
1000	0.001	5 000	0.0005
3000	0.003	15 000	0.0015
5000	0.005	25 000	0.0025
7000	0.007	35 000	0.0035
7500	0.030	37 500	0.0150
7900	0.080	39 500	0.0400
8000 (carga máxima)	0.120	40 000	0.0600
7950	0.160	39 700	0.0800
7600 (fractura)	0.205	38 000	0.1025

Esfuerzo y deformación ingenieriles Los resultados de un solo ensayo se aplican a todos los tamaños y secciones transversales de especímenes de determinado material, siempre que se convierta la fuerza en esfuerzo, y la distancia entre marcas de calibración se convierta a deformación. El **esfuerzo ingenieril** y la **deformación ingenieril** se definen con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \sigma = \frac{F}{A_0} \quad (6-4)$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6-5)$$

en donde A_0 es el área de la sección transversal *original* del espécimen antes de que comience el ensayo, l_0 es la distancia *original* entre las marcas de calibración y Δl es el cambio de

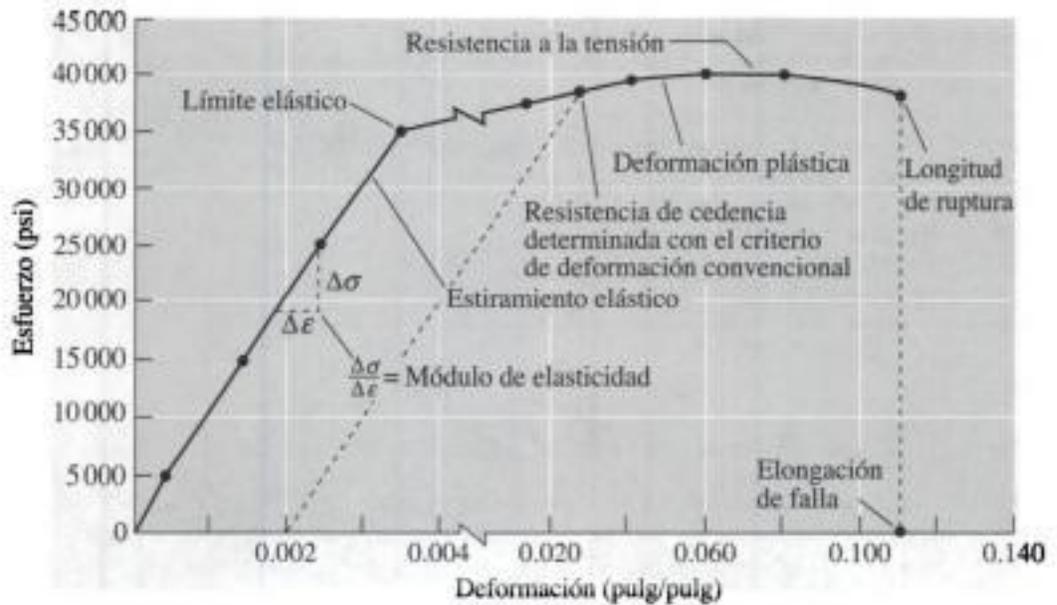


Figura 6-10 Curva esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril para una aleación de aluminio, con datos de la tabla 6-1.

longitud o elongación después de haber aplicado la fuerza F . En la tabla 6-1 se incluyen las conversiones de carga y longitud de muestra a esfuerzo y deformación ingenieriles. La curva esfuerzo-deformación ingenieril (Fig. 6-10) se usa para registrar los resultados de un ensayo de tensión.

EJEMPLO 6-1

Ensayo de tensión de una aleación de aluminio

Convierta los datos de carga contra elongación de la tabla 6-1 a esfuerzo y deformación unitaria y trace una curva de esfuerzo-deformación ingenieril.

SOLUCIÓN

Para la carga de 1000 lb:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{1000 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.505 \text{ pulg})^2} = \frac{1000 \text{ lb}}{0.2 \text{ pulg}^2} = 5000 \text{ psi}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.001 \text{ pulg}}{2.000 \text{ pulg}} = 0.0005 \text{ pulg/pulg}$$

En la tabla 6-1 se proporcionan los resultados de cálculos similares para cada una de las demás cargas y están graficados en la figura 6-10.

Unidades Para presentar los resultados de un ensayo de tensión se usan muchas unidades diferentes. Las unidades más frecuentes para el esfuerzo son megapascuales (MPa) y libras por pulgada cuadrada (psi, por sus siglas en inglés). Entre las unidades de la deformación están pulgada/pulgada, centímetro/centímetro y metro/metro. Los factores de conversión del esfuerzo se resumen en la tabla 6-2. Como la deformación es adimensional, no se requieren factores de conversión para cambiar de sistema de unidades.

TABLA 6-2 ■ Unidades y factores de conversión

1 libra (lb) = 4.448 newtons (N)
1 psi = 1 libra por pulgada cuadrada
1 MPa = 1 megapascal = 1 meganewton por metro cuadrado (MN/m ²) = 1 newton por milímetro cuadrado (N/mm ²) = 1 000 000 Pa
1 GPa = 1000 MPa = 1 gigapascal
1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa
1 psi = 0.006895 MPa
1 MPa = 0.145 ksi = 145 psi

EJEMPLO 6-2 *Diseño de una varilla de suspensión*

Una varilla de aluminio debe resistir una fuerza aplicada de 45 000 libras. Para asegurar que haya la seguridad suficiente, el esfuerzo máximo en la barra se limita a 25 000 psi. La varilla debe tener cuando menos 150 pulgadas de longitud, pero se debe deformar elásticamente cuando mucho 0.25 pulgadas al aplicarle la fuerza. Diseñe la varilla.

SOLUCIÓN

Se puede usar la definición de esfuerzo ingenieril para calcular el área transversal requerida en la varilla:

$$A_0 = \frac{F}{\sigma} = \frac{45\,000}{25\,000} = 1.8 \text{ pulg}^2$$

La varilla podría tener varias formas, siempre y cuando su superficie transversal sea 1.8 pulg². Si la sección transversal es redonda, el diámetro mínimo para asegurar que el esfuerzo no sea demasiado grande es:

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 1.8 \text{ pulg}^2 \quad \text{o} \quad d = 1.51 \text{ pulg}$$

La deformación elástica máxima admisible es 0.25 pulgadas. Según la definición de deformación ingenieril:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.25 \text{ pulg}}{l_0}$$

En la figura 6-10 se observa que la deformación unitaria esperada para 25 000 psi es 0.0025 pulg/pulg. Si se usa el área transversal determinada con anterioridad, la longitud máxima de la varilla es:

$$0.0025 = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.25 \text{ pulg}}{l_0} \quad \text{o} \quad l_0 = 100 \text{ pulg}$$

Sin embargo, la longitud mínima de la varilla debe ser 150 pulgadas. Para producir una varilla más larga, se debe hacer que el área transversal de la misma sea mayor. La deformación unitaria mínima admisible en la varilla de 150 pulgadas es:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.25 \text{ pulg}}{150 \text{ pulg}} = 0.001667 \text{ pulg/pulg}$$

Según la figura 6-10, el esfuerzo aproximado es 16 670 psi, menor que el máximo de 25 000 psi. Entonces, el área transversal mínima es:

$$A_0 = \frac{F}{\sigma} = \frac{45\,000 \text{ psi}}{16\,670 \text{ lb}} = 2.70 \text{ pulg}^2$$

Para satisfacer los requisitos de esfuerzo máximo y de alargamiento mínimo al mismo tiempo, el área transversal de la varilla debe ser 2.7 pulg² como mínimo, o sea que debe tener un diámetro mínimo de 1.85 pulgadas.

Resistencia de cedencia Al aplicar esfuerzo a un material, éste muestra primero una deformación elástica. La deformación que se produce desaparece por completo cuando se elimina el esfuerzo aplicado. Sin embargo, al continuar aumentando el esfuerzo aplicado, el material comienza a mostrar deformación tanto elástica como plástica. Al final, el material "cede" al esfuerzo aplicado. El valor crítico del esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica se llama **límite elástico** del material. En los materiales metálicos, éste es normalmente el esfuerzo necesario para iniciar el movimiento de las dislocaciones o deslizamiento. En los materiales poliméricos, este esfuerzo corresponde al desenredo de las cadenas moleculares del polímero o al deslizamiento de las cadenas entre sí. El **límite de proporcionalidad** se define como el valor del esfuerzo arriba del cual la relación entre esfuerzo y deformación ingenieriles no es lineal.

En la mayoría de los materiales, el límite elástico y el límite de proporcionalidad están bastante cercanos. Sin embargo, ni el valor del límite elástico ni el del límite de proporcionalidad se pueden determinar con precisión. Los valores medidos dependen de la sensibilidad del equipo que se usa. En consecuencia, se define un valor convencional de deformación plástica (normalmente 0.002 o 0.2%, pero no siempre). A continuación, se traza una recta comenzando en este valor desplazado, paralela a la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación ingenieril. El valor de esfuerzo que corresponde al cruce de esa recta y la curva de esfuerzo-deformación ingenieril se le define como la **resistencia a la cedencia** y el procedimiento que se ha descrito para determinarlo se le conoce como criterio "offset" o de deformación plástica convencional. En la figura 6-11(a) se muestra la resistencia de cedencia al 0.2% de deformación convencional del hierro colado gris, que es de 40 000 psi. En ingeniería se prefiere usar el esfuerzo de cedencia para fines de diseño.

En algunos materiales, la transición de deformación elástica a flujo plástico es abrupta. Esa transición se llama **fenómeno de punto de fluencia**. En esos materiales, al comenzar la deformación plástica, el valor del esfuerzo baja primero desde el *punto de fluencia superior* (σ_2) [Fig. 6-11(b)]. El valor del esfuerzo sigue decreciendo y oscila en torno a un valor promedio que se define como *punto de fluencia inferior* (σ_1).

La curva esfuerzo-deformación para ciertos aceros al bajo carbono muestra dos puntos de fluencia (o cedencia) [Fig. 6-11(b)]. Se espera que el material se deforme plásticamente en el esfuerzo σ_1 . Sin embargo, los átomos intersticiales agrupados en torno a las dislocaciones interfieren con el deslizamiento y elevan el punto de cedencia a σ_2 . Sólo después de aplicar el esfuerzo σ_2 mayor, se deslizan las dislocaciones. Después de que comienza el deslizamiento en σ_2 , las dislocaciones se alejan de los grupos de átomos pequeños y continúan moviéndose con mucha rapidez en el esfuerzo menor σ_1 .

Cuando se diseñan partes para aplicaciones sujetas a cargas dinámicas, es preferible que haya muy poca o ninguna deformación plástica. En consecuencia, se debe seleccionar un material tal que el esfuerzo de diseño sea bastante menor que la resistencia de cedencia a la temperatura a la que deberá usarse el material. También se puede hacer mayor la sección transversal del material, para que la fuerza aplicada produzca un esfuerzo bastante menor que la resistencia

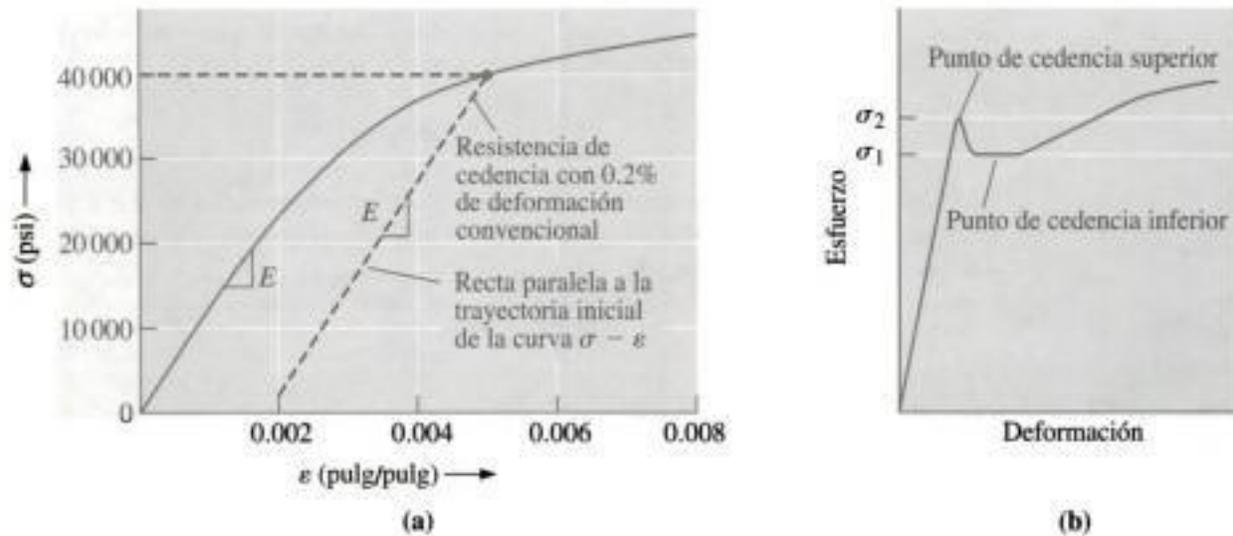


Figura 6-11 (a) Determinación de la resistencia de cedencia con 0.2% de deformación convencional en el hierro colado gris y (b) puntos de cedencia superior e inferior de un acero al bajo carbono.

de cedencia. Por otra parte, cuando se desea conformar los materiales en componentes (por ejemplo, tomar una lámina de acero y formar un chasis de automóvil), se deben aplicar esfuerzos bastante mayores que la resistencia de cedencia.

Resistencia a la tensión El esfuerzo obtenido con la máxima fuerza aplicada es la **resistencia a la tensión** o **resistencia a la tracción** (σ_{TS}), que es el esfuerzo máximo en la curva esfuerzo-deformación ingenieril. En muchos materiales dúctiles, la deformación no permanece uniforme. En algún punto, una región se deforma más que otras y se presenta una reducción local grande de la sección transversal en dicho punto (Fig. 6-12). Esta región de deformación local se llama "cuello". A este fenómeno se le llama **estricción** o **formación de cuello**. Como el área transversal es menor en ese punto, se necesita una fuerza menor para continuar la deformación, y el esfuerzo ingenieril, calculado con el área *original* A_0 , decrece. La resistencia a la tensión es el esfuerzo en el cual comienza la estricción en los materiales dúctiles. Muchos metales y polímeros dúctiles

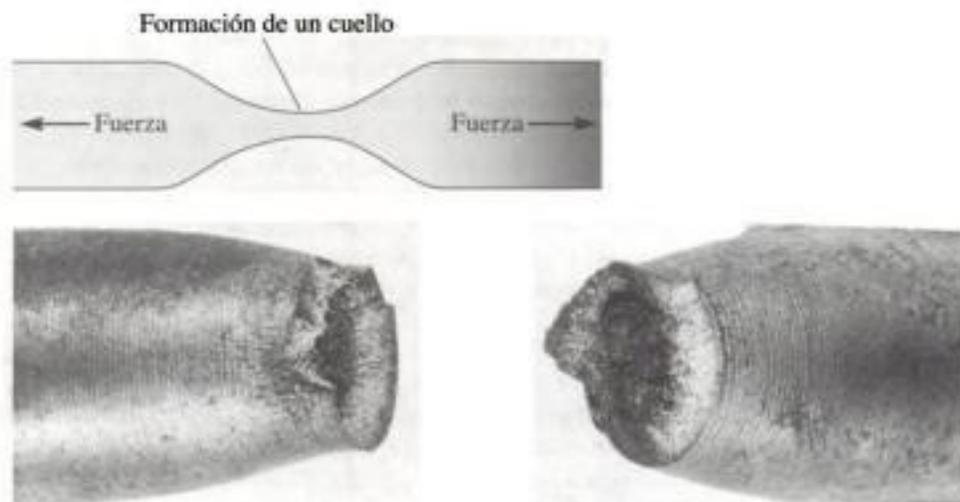


Figura 6-12 Deformación localizada de un material dúctil durante un ensayo de tensión; se produce una región de cuello. En la fotografía se observa la parte del cuello en una muestra fracturada.

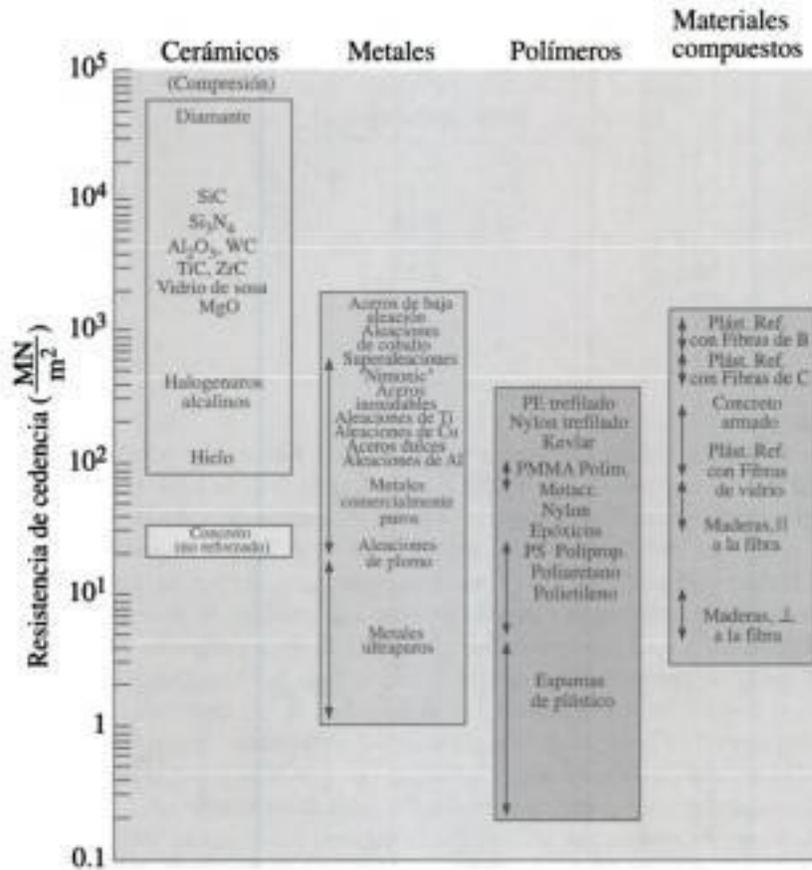


Figura 6-13 Valores característicos de resistencia para diversos materiales. (Fuente: Reimpreso de Engineering Materials I, 2a. ed., M.F. Ashby y D.R.H. Jones, 1996, fig. 8-12, p. 85. Copyright © Butterworth-Heinemann. Reimpreso con autorización de Elsevier Science.)

muestran el fenómeno de formación de cuello. En el ensayo de compresión, los materiales se ensanchan; por consiguiente, la estricción sólo se observa en los ensayos de tensión.

La figura 6-13 muestra valores normales de resistencia de cedencia para distintos materiales diseñados. La resistencia de cedencia de los metales puros es menor. Por ejemplo, los metales ultrapuros tienen una resistencia de cedencia aproximada de $\sim(1 - 10 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2})$. Por otra parte, la resistencia de cedencia de las aleaciones es mayor. El reforzamiento en las aleaciones se logra con los distintos mecanismos que ya se describieron, como el refinamiento del tamaño de grano, formación de solución sólida, endurecimiento por deformación, etc. La resistencia de cedencia de los plásticos y elastómeros en general es menor que la de los metales y aleaciones: hasta de $(10 - 100 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2})$. Los valores para los cerámicos son de resistencia a la compresión, obtenida mediante un ensayo de dureza. La resistencia a la tensión de la mayoría de los cerámicos es mucho menor, aproximadamente de $(\sim 100 - 200 \text{ MPa})$. La resistencia de los vidrios a la tensión es de unos $\sim 70 \text{ MPa}$, y depende de sus imperfecciones en la superficie.

Propiedades elásticas El módulo de elasticidad, o *módulo de Young* (E), es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica. Esta relación es la **ley de Hooke**: [6]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6-6)$$

El módulo tiene una relación estrecha con la energía de enlace atómico (Fig. 2-26). Una pendiente pronunciada de la gráfica fuerza-distancia a la distancia de equilibrio (o interatómica) indica que

TABLA 6-3 ■ Propiedades elásticas y temperaturas de fusión (T_m) de algunos materiales

Material	T_m (°C)	E (psi)	Módulo de Poisson (μ)
Pb	327	2.0×10^6	0.45
Mg	650	6.5×10^6	0.29
Al	660	10.0×10^6	0.33
Cu	1085	18.1×10^6	0.36
Fe	1538	30.0×10^6	0.27
W	3410	59.2×10^6	0.28
Al_2O_3	2020	55.0×10^6	0.26
Si_3N_4		44.0×10^6	0.24

se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se estire en forma elástica. Así, el material tiene un módulo de elasticidad grande. Las fuerzas de enlace y, por consiguiente, el módulo de elasticidad, suelen ser mayores para los materiales de punto de fusión alto (tabla 6-3). En los materiales metálicos, se considera que el módulo de elasticidad es una propiedad *insensible* a la microestructura, porque el valor está muy influido por la fuerza de los enlaces atómicos. El tamaño de grano u otras propiedades microestructurales no tienen un efecto muy grande sobre el módulo de Young. Obsérvese que el módulo de Young depende de factores como orientación de un material monocristalino (es decir, depende de la dirección cristalográfica). Para los cerámicos, el módulo de Young depende de la magnitud de la porosidad. El módulo de Young de un material compuesto depende de la rigidez de los componentes individuales.

El módulo de Young es una medida de la rigidez de un componente. Un componente rígido con módulo de elasticidad grande presenta cambios dimensionales mucho menores cuando el esfuerzo aplicado es relativamente pequeño y, en consecuencia, sólo causa deformación elástica. En la figura 6-4 se compara el comportamiento elástico del acero con el del aluminio. Si se aplica un esfuerzo de 30 000 psi a cada material, el acero se deforma elásticamente 0.001 pulg./pulg., mientras que el aluminio se deforma 0.003 pulg./pulg. En general, la mayoría de los ingenieros consideran que la rigidez es una función del módulo de Young y también de la geometría de un componente.

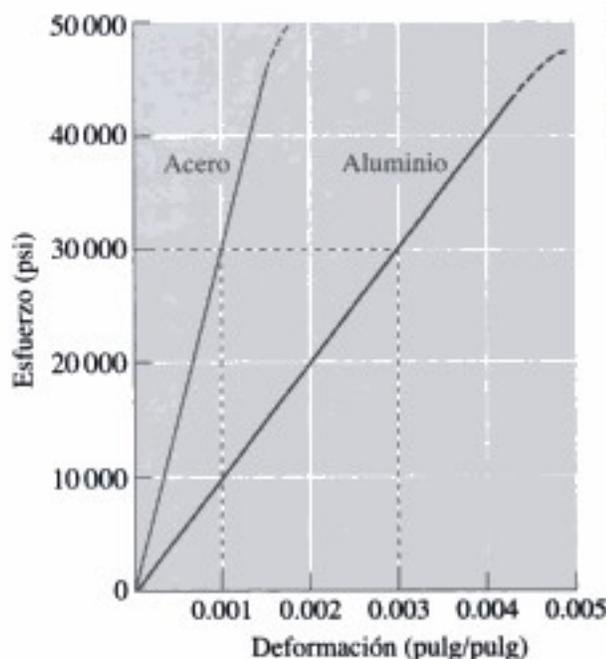


Figura 6-14 Comparación del comportamiento elástico del acero y del aluminio. Para determinado esfuerzo, el aluminio se deforma elásticamente tres veces más que el acero.

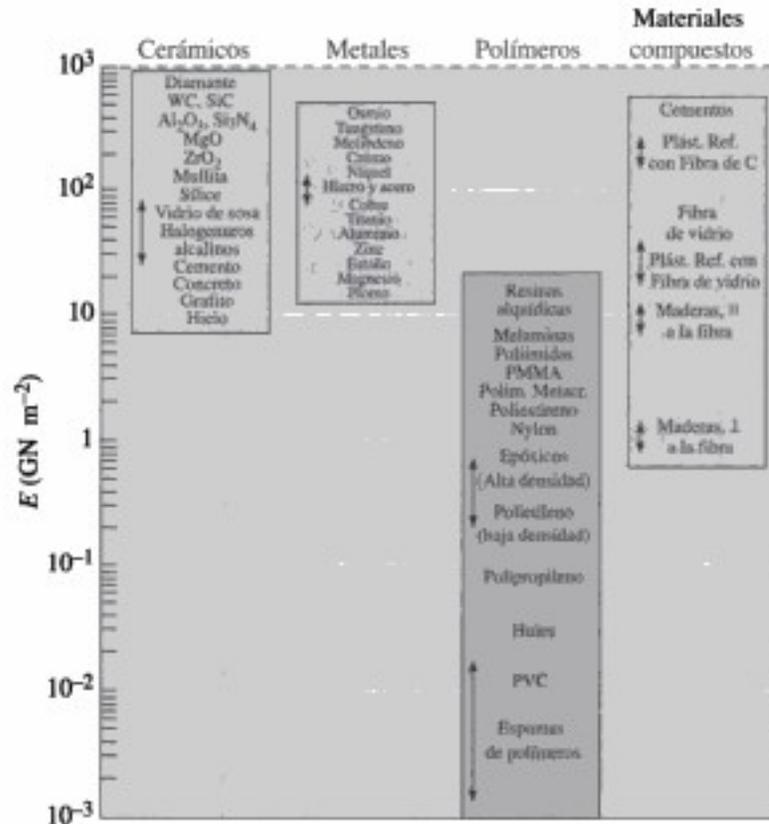


Figura 6-15 Intervalos de módulos elásticos para diversos materiales. (Fuente: Reimpreso de Engineering Materials I, 2a. ed., M.F. Ashby y D.R.H. Jones, 1996, fig. 3-5, p. 35. Copyright © Butterworth-Heinemann. Reimpreso con autorización de Elsevier Science.)

La figura 6-15 muestra los intervalos de módulos de elasticidad para diversos materiales. El módulo de elasticidad de los plásticos es mucho menor que los de los metales, de los cerámicos o de los vidrios. Por ejemplo, el módulo de elasticidad del nylon es 2.7 GPa ($\sim 0.4 \times 10^6$ psi); el módulo de las fibras de vidrio es 72.4 GPa ($\sim 10.5 \times 10^6$ psi). El módulo de Young de materiales compuestos, como los reforzados con fibra de vidrio (GFRC, por sus siglas en inglés) o los reforzados con fibra de carbón (CFRC, por sus siglas en inglés), está entre los valores del polímero de la matriz y de la fibra (fibras de carbono o de vidrio) y depende de sus fracciones volumétricas relativas. El módulo de Young de muchas aleaciones y cerámicos es mayor; en general, llega hasta 413.7 GPa ($\sim 60 \times 10^6$ psi). Los cerámicos, debido a la resistencia de los enlaces iónicos y covalentes, tienen los mayores módulos de elasticidad.

El **módulo de Poisson** μ es el cociente de la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo de tensión o compresión simple, entre la deformación lateral que sucede simultáneamente:

$$\mu = \frac{-\epsilon_{\text{lateral}}}{\epsilon_{\text{longitudinal}}} \tag{6-7}$$

Para muchos metales en la región elástica, el módulo de Poisson suele ser 0.3, aproximadamente (tabla 6-3). Durante un ensayo de tensión, la relación aumenta más allá de la cedencia hasta 0.5, aproximadamente, porque durante la deformación plástica el volumen permanece constante. Algunas estructuras interesantes muestran una relación de Poisson negativa.[7]

El **módulo de resiliencia** (E_r), o área contenida bajo la parte elástica de una curva de esfuerzo-deformación ingenieril, es la energía elástica que absorbe un material durante la carga y que después se desprende, cuando se quita la carga. Para el comportamiento elástico lineal:

$$E_r = \left(\frac{1}{2}\right)(\text{resistencia de cedencia})(\text{deformación de cedencia}) \quad (6-8)$$

El que un resorte o una pelota de golf funcionen en forma satisfactoria depende de que tengan un módulo de resiliencia alto.

Tenacidad a la tensión La energía absorbida por un material antes de fracturarse se llama **tenacidad a la tensión**, y a veces se determina como el área bajo la curva de esfuerzo-deformación ingenieril; también se llama **trabajo de fractura**. En la sección 6-5 se definirán el esfuerzo y la deformación reales. Como es más fácil determinar el esfuerzo y la deformación ingenieriles, los ingenieros suelen igualar la tenacidad a la tensión con el área bajo la curva esfuerzo-deformación ingenieril.

EJEMPLO 6-3 Módulo de Young de una aleación de aluminio

Con los datos del ejemplo 6-1, calcule el módulo de elasticidad de la aleación de aluminio. Use el módulo para determinar, después de deformarse, la longitud de una barra que inicialmente mide 50 pulgadas. Suponga que la magnitud del esfuerzo aplicado es 30 000 psi.

SOLUCIÓN

Cuando se aplica un esfuerzo de 35 000 psi, se produce una deformación unitaria de 0.0035 pulg/pulg. Entonces:

$$\text{Módulo de elasticidad} = E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{35\,000 \text{ psi}}{0.0035} = 10 \times 10^6 \text{ psi}$$

Según la ley de Hooke:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{30\,000 \text{ psi}}{10 \times 10^6} = 0.003 = \text{pulg/pulg} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$l = l_0 + \epsilon l_0 = 50 + (0.003)(50) = 50.15 \text{ pulg}$$

Ductilidad La **ductilidad** mide la cantidad de deformación que puede resistir un material sin romperse. Se puede medir la distancia entre las marcas de calibración en el espécimen antes y después del ensayo. La **elongación porcentual** describe la deformación plástica permanente antes de la falla (es decir, no se incluye la deformación elástica que desaparece después de la fractura). Obsérvese que la deformación a la falla es menor que la deformación en el punto de ruptura.

$$\% \text{ alargamiento} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (6-9)$$

donde l_f es la distancia entre las marcas de calibración después de que se ha roto el espécimen.

Un segundo método consiste en medir el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura, antes y después del ensayo. La **reducción porcentual de área** describe la cantidad de adelgazamiento que sufre el espécimen durante el ensayo en dicho punto:

$$\% \text{ reducción en área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (6-10)$$

donde A_f es el área transversal final en la superficie de fractura.

La ductilidad es importante tanto para los diseñadores de componentes sujetos a cargas (dinámicas) como para los fabricantes de semiproductos (barras, varillas, alambres, placas, vigas I, fibras, etc.) que usan procesamiento de materiales. El diseñador de un componente prefiere un material que muestre por lo menos cierta ductilidad, de modo que si el esfuerzo aplicado es

demasiado alto, el componente pueda tomar algo del mismo deformándose, y no fallar por fractura frágil. Los fabricantes de componentes ingenieriles (metálicos y poliméricos) desean que el material sea dúctil para moldear formas complicadas sin romper los materiales en el proceso. La ductilidad de los materiales depende de la temperatura y de la velocidad de deformación.

EJEMPLO 6-4 *Ductilidad de una aleación de aluminio*

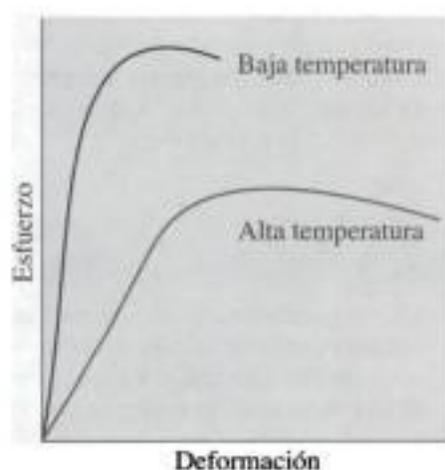
La aleación de aluminio del ejemplo 6-1 tiene una longitud final, después de fallar, de 2.195 pulgadas, y en la superficie fracturada el diámetro es 0.398 pulgadas. Calcule la ductilidad de esta aleación.

SOLUCIÓN

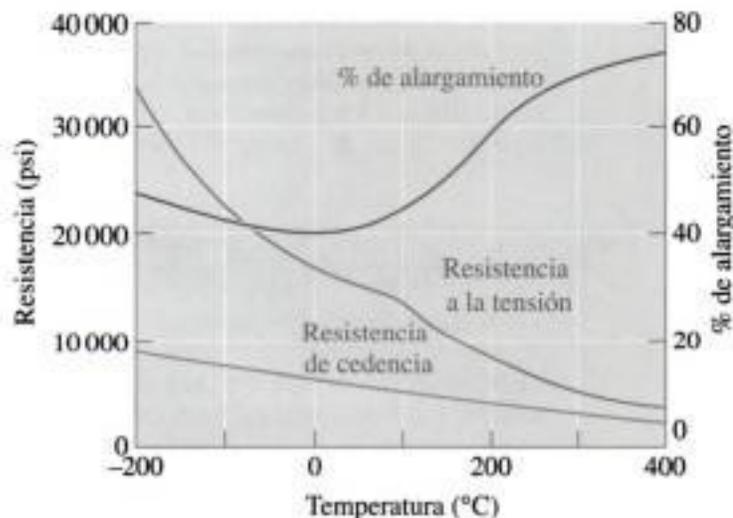
$$\begin{aligned} \text{\% de elongación} &= \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{2.195 - 2.000}{2.000} \times 100 = 9.75\% \\ \text{\% de reducción en área} &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \\ &= \frac{(\pi/4)(0.505)^2 - (\pi/4)(0.398)^2}{(\pi/4)(0.505)^2} \times 100 \\ &= 37.9\% \end{aligned}$$

La longitud final es menor que 2.205 pulgadas (véase la tabla 6-1), porque después de la fractura se recupera la deformación elástica.

Efecto de la temperatura Las propiedades mecánicas de los materiales dependen de la temperatura (Fig. 6-16). La resistencia de cedencia, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen cuando las temperaturas son mayores, mientras que la ductilidad suele aumentar. Un fabricante de materiales podrá querer deformar un material a alta temperatura



(a)



(b)

Figura 6-16 Efecto de la temperatura (a) sobre la curva esfuerzo-deformación y (b) sobre las propiedades a tensión de una aleación de aluminio.

(lo que se llama *trabajo en caliente*) para aprovechar la mayor ductilidad y el menor esfuerzo necesarios. Algunos de los lectores habrán oído decir “calentar y golpear” o “golpear cuando el hierro está caliente”. El origen de estas frases se relaciona con la ductilidad que desarrollan muchos materiales metálicos cuando se calientan a mayores temperaturas. Usamos el término “alta temperatura” con una nota precautoria. En esencia, una alta temperatura es algo que se acerca a la temperatura de fusión. Así, 500 °C es una alta temperatura para las aleaciones de aluminio; sin embargo, es una temperatura relativamente baja para el procesamiento de los aceros. En los metales, la resistencia de cedencia disminuye con rapidez a mayores temperaturas, porque los materiales metálicos pueden tener menor densidad de dislocaciones y un aumento en el tamaño de grano, debido a su crecimiento (capítulo 5) o por “recristalización” de nuevos granos que en esencia están libres de dislocaciones (como se describirá después, en el capítulo 7). De igual modo, todo reforzamiento que pueda haber ocurrido por la deformación de precipitados ultrafinos (capítulo 4) también puede disminuir cuando el tamaño de los precipitados comienza a crecer, o los precipitados comienzan a disolverse en la matriz. Describiremos estos efectos con más detalle en capítulos posteriores. Cuando las temperaturas bajan, muchos metales, aunque no todos, se vuelven frágiles.

Las mayores temperaturas también tienen un papel importante en el moldeo de materiales poliméricos y de vidrios inorgánicos. En muchas operaciones de procesamiento de polímeros, como extrusión o el proceso de estirar y soplar (capítulo 4), es deseable la mayor ductilidad de los polímeros a mayores temperaturas. De nuevo, se debe tener precaución al usar el término “alta temperatura”. Para los polímeros, “alta temperatura” indicaría en general que la temperatura es mayor que la temperatura de transición vítrea (T_g). No hay “transición” a esta temperatura, como indica el nombre. Para nuestros fines, la temperatura de transición vítrea es aquella por debajo de la cual los materiales se comportan como materiales frágiles. Arriba de la temperatura de transformación vítrea los plásticos se vuelven dúctiles. La temperatura de transición vítrea no es fija, sino que depende de la rapidez de enfriamiento y también de la distribución de pesos moleculares en el polímero. Muchos plásticos son dúctiles a temperatura ambiente, porque sus temperaturas de transición vítrea son inferiores a la temperatura ambiente. Resumiendo, muchos materiales poliméricos se vuelven más duros y más frágiles cuando se exponen a temperaturas menores que sus temperaturas de transición vítrea. Las causas de la pérdida de ductilidad a menores temperaturas en los polímeros y en los materiales metálicos son distintas; sin embargo, es un factor que desempeñó un papel en las fallas del *Titanic* en 1912 y del *Challenger* en 1986.

Los materiales cerámicos y vítreos se consideran en general frágiles a temperatura ambiente. Al aumentar la temperatura, los vidrios pueden fluir mejor y volverse más dúctiles. Por esta razón, el procesamiento del vidrio (por ejemplo, trefilado de fibras o fabricación de botellas) se hace a altas temperaturas. Los cerámicos policristalinos también pueden aumentar su ductilidad a temperaturas mayores, por mecanismos en los que interviene el deslizamiento en los límites de grano y otros fenómenos. Esto se describirá en la sección 6-21.

6-5

Esfuerzo real y deformación real

La disminución del esfuerzo ingenieril al rebasar el punto correspondiente a la resistencia a la tensión de la curva esfuerzo-deformación ingenieril se relaciona con la definición del esfuerzo ingenieril. En los cálculos, se usó el área original A_0 , pero eso no es exacto, porque el área cambia en forma continua. Se definirán el **esfuerzo real** y la **deformación real** con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo real} = \sigma_r = \frac{F}{A} \quad (6-11)$$

$$\text{Deformación unitaria real} = \int \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right), \quad (6-12)$$

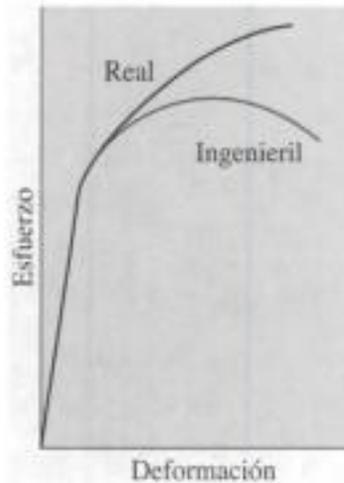


Figura 6-17 Relación entre los diagramas de esfuerzo real-deformación unitaria real y esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril. Las curvas son idénticas hasta el punto de cedencia.

donde A es el área real a la que se aplica la fuerza F . La expresión $\ln(A_0/A)$ sólo se puede usar antes de comenzar la formación de cuello, cuando el volumen permanece constante y $\frac{A_0}{l_0} = \frac{A}{l}$. En la figura 6-17 se comparan las curvas de esfuerzo-deformación reales y esfuerzo-deformación ingenieriles. El esfuerzo real continúa aumentando después de la formación de cuello porque, aunque la carga necesaria disminuye, el área disminuye aún más.

Para aplicaciones estructurales, con frecuencia no se requieren esfuerzos ni deformaciones reales. Cuando se rebasa la resistencia de cedencia, el material se deforma. El componente falló porque ya no tiene la forma que se pretendía al principio. Además, se desarrolla una diferencia apreciable entre las dos curvas sólo cuando comienza la formación de cuello. Pero, cuando eso sucede, el componente ya está muy deformado y ya no sirve para el uso que se pretende. Los ingenieros que trabajan con el procesamiento de materiales necesitan los datos acerca del esfuerzo y la deformación reales.

EJEMPLO 6-5 Cálculo del esfuerzo real y de la deformación real

Compare el esfuerzo y la deformación ingenieriles con el esfuerzo y la deformación reales para la aleación de aluminio del ejemplo 6-1 (a) a la carga máxima y (b) a la fractura. El diámetro con la carga máxima es 0.497 pulg, y en la fractura es 0.398 pulg.

SOLUCIÓN

a) A la carga máxima:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \frac{F}{A_0} = \frac{8000 \text{ lb}}{(\pi/4) (0.505 \text{ pulg})^2} = 40\,000 \text{ psi}$$

$$\text{Esfuerzo real} = \frac{F}{A} = \frac{8000}{(\pi/4) (0.497)^2} = 41\,237 \text{ psi}$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{2.120 - 2.000}{2.000} = 0.060 \text{ pulg/pulg}$$

$$\text{Deformación real} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{2.120}{2.000}\right) = 0.058 \text{ pulg/pulg}$$

b) En la fractura:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \frac{F}{A_0} = \frac{7600 \text{ lb}}{(\pi/4) (0.0505 \text{ pulg})^2} = 38\,000 \text{ psi}$$

$$\text{Esfuerzo real} = \frac{F}{A} = \frac{7600}{(\pi/4) (0.398)^2} = 61\,090 \text{ psi}$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \frac{\Delta l}{l_0} = \left(\frac{0.205}{2.000} \right) = 0.1025 \text{ pulg/pulg}$$

$$\begin{aligned} \text{Deformación real} &= \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \ln\left[\frac{(\pi/4)(0.505)^2}{(\pi/4)(0.398)^2}\right] \\ &= \ln(1.610) = 0.476 \text{ pulg/pulg} \end{aligned}$$

El esfuerzo real es mucho mayor que el ingenieril sólo después de que comienza la formación de cuello.

6-6 El ensayo de flexión para materiales frágiles

En los materiales dúctiles, la curva esfuerzo-deformación ingenieril suele pasar por un máximo; este esfuerzo máximo es la resistencia del material a la tensión. La falla se presenta a un esfuerzo menor, después de que la formación de cuello ha reducido el área transversal que sostiene la carga. En los materiales más frágiles, la falla se presenta en la carga máxima, cuando la resistencia a la tensión y la resistencia a la ruptura son iguales. En los materiales frágiles, incluidos muchos cerámicos, la resistencia de cedencia, la resistencia a la tensión y la resistencia a la ruptura son iguales (Fig. 6-18).

En muchos materiales frágiles no se puede hacer con facilidad el ensayo de tensión convencional, a causa de la presencia de imperfecciones en la superficie. Con frecuencia, sólo con poner un material frágil en las mordazas de la máquina de ensayos de tensión, se produce la fractura. Esos materiales se pueden probar con el **ensayo de flexión** [Fig. 6-19(a)]. Si se aplica la carga en tres puntos y se provoca la flexión, se produce un esfuerzo de tensión en el material

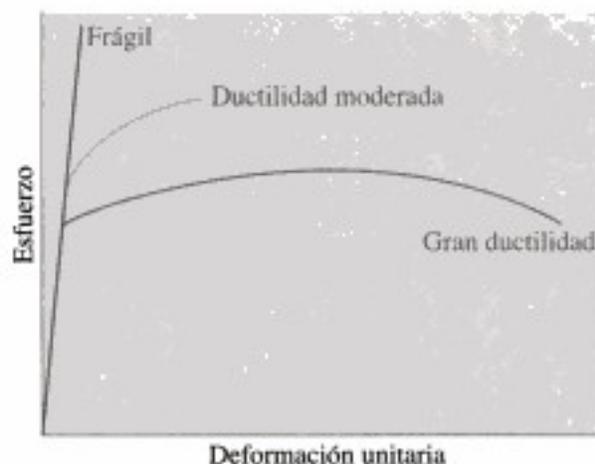


Figura 6-18 Comparación del comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales frágiles comparado con el de los materiales dúctiles.

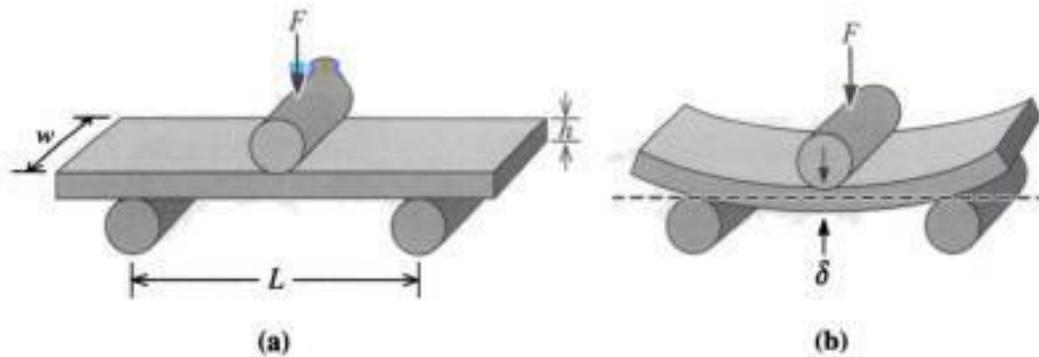


Figura 6-19 (a) Para medir la resistencia de materiales frágiles, se usa con frecuencia el ensayo de flexión y (b) la deflexión δ obtenida por flexión.

en un punto opuesto al punto de aplicación de la fuerza central. La fractura comienza en ese punto. La **resistencia a la flexión**, o **módulo de ruptura**, describe la resistencia del material:

$$\text{Resistencia a la flexión en el ensayo de flexión con tres puntos} = \frac{3FL}{2wh^2} = \sigma_{\text{flexión}} \quad (6-13)$$

donde F es la carga de fractura o de ruptura, L es la distancia entre los dos puntos de apoyo, w es el ancho del espécimen y h es la altura del espécimen. Las unidades de la resistencia a la flexión son unidades de esfuerzo, y esa resistencia se representa con $\sigma_{\text{flexión}}$. Los resultados del ensayo de flexión son parecidos a las curvas de esfuerzo-deformación; sin embargo, se grafica el esfuerzo en función de la deflexión y no en función de la deformación unitaria (Fig. 6-20).

El módulo de elasticidad en flexión, o **módulo de flexión** ($E_{\text{flexión}}$), se calcula en la región elástica de la figura 6-20:

$$\text{Módulo de flexión} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} = E_{\text{flexión}} \quad (6-14)$$

donde δ es la deflexión o flecha de la viga cuando se aplica la fuerza F .

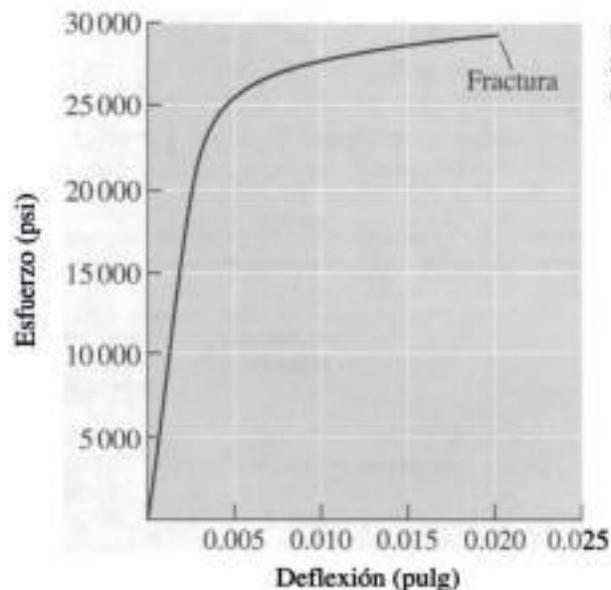


Figura 6-20 Curva de esfuerzo-deflexión para MgO, obtenida en un ensayo de flexión.

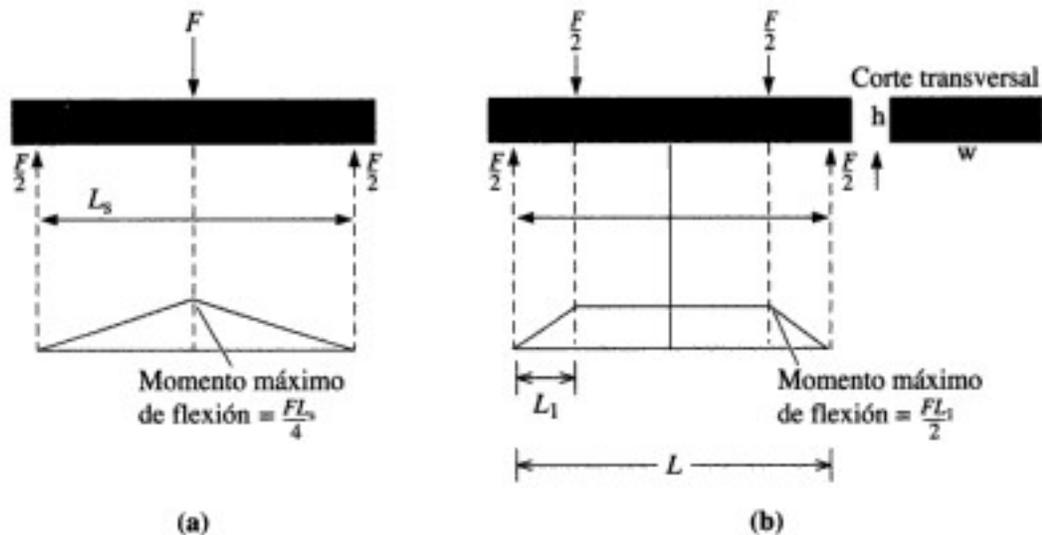


Figura 6-21 (a) Esquema de ensayo de flexión en tres puntos y (b) en cuatro puntos.

Este ensayo también se puede ejecutar en una configuración llamada ensayo de flexión en cuatro puntos (Fig. 6-21). El esfuerzo máximo o esfuerzo de flexión para un ensayo de flexión con cuatro puntos es:

$$\sigma_{\text{flexión}} = \frac{3FL_1}{4wh^2} \tag{6-15}$$

Obsérvese que al deducir las ecuaciones 6-13 a 6-15 se supuso una respuesta lineal esfuerzo-deformación unitaria (esto no se puede hacer en forma correcta con muchos polímeros). El ensayo de flexión con cuatro puntos se presta mejor para materiales que contienen imperfecciones. Esto se debe a que el momento de flexión entre las patinas interiores es constante (Fig. 6-21(b)), y entonces las muestras tienden a romperse en un lugar al azar, a menos que haya una imperfección que cause concentración del esfuerzo.

Ya que las grietas e imperfecciones tienden a permanecer cerradas durante la compresión, los materiales frágiles, como el concreto, se diseñan con frecuencia de tal modo que sobre la parte sólo actúen esfuerzos de compresión. Muchas veces se encuentra que los materiales frágiles fallan cuando los esfuerzos de compresión son mucho mayores que los de tensión (tabla 6-4). Ésta es la causa de que sea posible sostener un camión de bomberos sobre cuatro tazas de café. Sin embargo, los cerámicos tienen una tenacidad mecánica muy limitada; por eso, cuando se deja caer una taza de café, puede romperse con facilidad.

TABLA 6-4 ■ Comparación de las resistencias de algunos materiales cerámicos y compuestos a la tensión, compresión y flexión

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la compresión (psi)	Resistencia a la flexión (psi)
Poliéster con 50% de fibra de vidrio	23 000	32 000	45 000
Poliéster con 50% de tela de fibra de vidrio	37 000	27 000*	46 000
Al ₂ O ₃ (99% puro)	30 000	375 000	50 000
SiC (sinterizado sin presión)	25 000	560 000	80 000

*Varios materiales compuestos son muy malos en compresión.

EJEMPLO 6-6 Resistencia de materiales compuestos a la flexión

La resistencia a la tensión de un material compuesto reforzado con fibras de vidrio es 45 000 psi, y el módulo de flexión es 18×10^6 psi. Una muestra tiene 0.5 pulg de ancho, 0.375 pulg de alto, 8 pulg de longitud y se sostiene entre dos varillas a 5 pulg de distancia. Calcule la fuerza necesaria para romper el material y la deflexión de la muestra en la fractura, suponiendo que no se produce deformación plástica.

SOLUCIÓN

Con base en la descripción de la muestra, $w = 0.5$ pulg, $h = 0.375$ pulg y $L = 5$ pulg. De acuerdo con la ecuación 6-15:

$$45\,000 \text{ psi} = \frac{3FL}{2wh^2} = \frac{(3)(F \text{ lb})(5 \text{ pulg})}{(2)(0.5 \text{ pulg})(0.375 \text{ pulg})^2} = 106.7F$$

$$F = \frac{45\,000}{106.7} = 422 \text{ lb}$$

En consecuencia, la deflexión, de acuerdo con la ecuación 6-14, es:

$$18 \times 10^6 \text{ psi} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} = \frac{(5 \text{ pulg})^3 (422 \text{ lb})}{(4)(0.5 \text{ pulg})(0.375 \text{ pulg})^3 \delta}$$

$$\delta = 0.0278 \text{ pulg}$$

En este cálculo supusimos que no hay comportamiento viscoelástico, y que el comportamiento de esfuerzo en función de la deformación unitaria es lineal.[8]

6-7**Dureza de los materiales**

El **ensayo de dureza** mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro. Dureza es un término que no se define con precisión. Dependiendo del contexto, puede representar resistencia al rayado o penetración y una medida cualitativa de la resistencia del material. En la figura 6-22 se muestra un durómetro Rockwell. En general, en las mediciones de **macro dureza**, la carga aplicada es ~ 2 N. Se han inventado varios ensayos de dureza, pero las que se usan con más frecuencia son el ensayo de Rockwell y el de Brinell. En esos ensayos, se usan distintos penetradores, los cuales se muestran en la figura 6-23.

En el ensayo de *dureza Brinell*, se comprime una esfera de acero duro, por lo general de 10 mm de diámetro, contra la superficie del material. Se mide el diámetro de la impresión, que suele ser de 2 a 6 mm, y se calcula el número de dureza Brinell (que se abrevia HB o BHN, por sus siglas en inglés) con la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{2F}{(\pi D [D - \sqrt{D^2 - D_i^2}])} \quad (6-16)$$

donde F es la carga aplicada en kilogramos, D es el diámetro del penetrador en milímetros y D_i es el diámetro de la impresión en milímetros. La dureza Brinell tiene las unidades de esfuerzo (es decir, kg/mm^2).



Figura 6-22 Durómetro Rockwell. (Cortesía de Newage Testing Instruments, Inc.)



Figura 6-23 Penetradores para los ensayos de dureza Brinell y Rockwell.

El ensayo de dureza Rockwell usa una bola de acero de pequeño diámetro, para materiales blandos, y un cono o indentador de diamante, para los materiales más duros. La máquina de ensayo mide en forma automática la profundidad de penetración del indentador, la cual se convierte en un número de dureza Rockwell (HR, por sus siglas en inglés). Como no se necesita una medición óptica de las dimensiones de la penetración, el ensayo de Rockwell tiende a ser más frecuente que el ensayo de Brinell. Se usan algunas variaciones del ensayo de Rockwell, incluidas las que se describen en la tabla 6-5. Para los aceros duros, se usa el ensayo de Rockwell C (HRC), mientras que para el aluminio se podría seleccionar uno como el Rockwell F (HRF). Los ensayos de Rockwell dan como resultado un número que no tiene unidades.

TABLA 6-5 ■ Comparación de pruebas normales de dureza

Prueba	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Esfera con 10 mm	3000 kg	Hierro colado y acero
Brinell	Esfera con 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Esfera de 1/16 pulg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Esfera de 1/8 pulg	100 kg	Materiales muy blandos
Rockwell F	Esfera de 1/16 pulg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Todos los materiales
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Los números de dureza se usan principalmente como base *cualitativa* de comparación entre materiales o en especificaciones para tratamiento térmico en la manufactura o control de calidad y para correlacionar con otras propiedades de materiales; por ejemplo, la dureza Brinell se relaciona estrechamente con la resistencia a la tensión del acero, con la ecuación:

$$\text{Resistencia a la tensión (psi)} = 500 \text{ HB} \quad (6-17)$$

donde HB tiene las unidades de kg/mm^2 .

Se puede obtener un número de dureza Brinell sólo en pocos minutos, casi sin preparar el espécimen y sin romper el componente; es decir, se considera que es un ensayo no destructivo; proporciona una aproximación muy cercana a la resistencia a la tensión. El número de dureza Rockwell no se puede relacionar en forma directa con la resistencia de cedencia en los metales y aleaciones; sin embargo, el ensayo es rápido, se hace con facilidad y es frecuente en la industria.[9]

La dureza se correlaciona bien con la resistencia al desgaste. (Para medir la resistencia al desgaste hay, además, un ensayo especial.) Un material que se use para romper o moler minerales debe ser muy duro, para asegurar que no se desgaste o erosione con esos minerales. De igual modo, los dientes de los engranajes en el sistema de transmisión o motriz de un vehículo debe tener la dureza suficiente para que no se gasten los dientes. Comúnmente, encontramos que los materiales poliméricos son excepcionalmente blandos, los metales y las aleaciones tienen durezas intermedias, y los cerámicos son excepcionalmente duros. Se usan materiales, como el compuesto de carburo de tungsteno y cobalto (WC-Co), llamado "carburo", en aplicaciones para herramientas de corte. También se usan materiales como diamante microcristalino o carbono semejante al diamante (DLC, por sus siglas en inglés) en las herramientas de corte y en otras aplicaciones.

El ensayo de Knoop (HK) es un **ensayo de microdureza** que genera "indentaciones" tan pequeñas que se requiere un microscopio para obtener la medida. En esos ensayos la carga

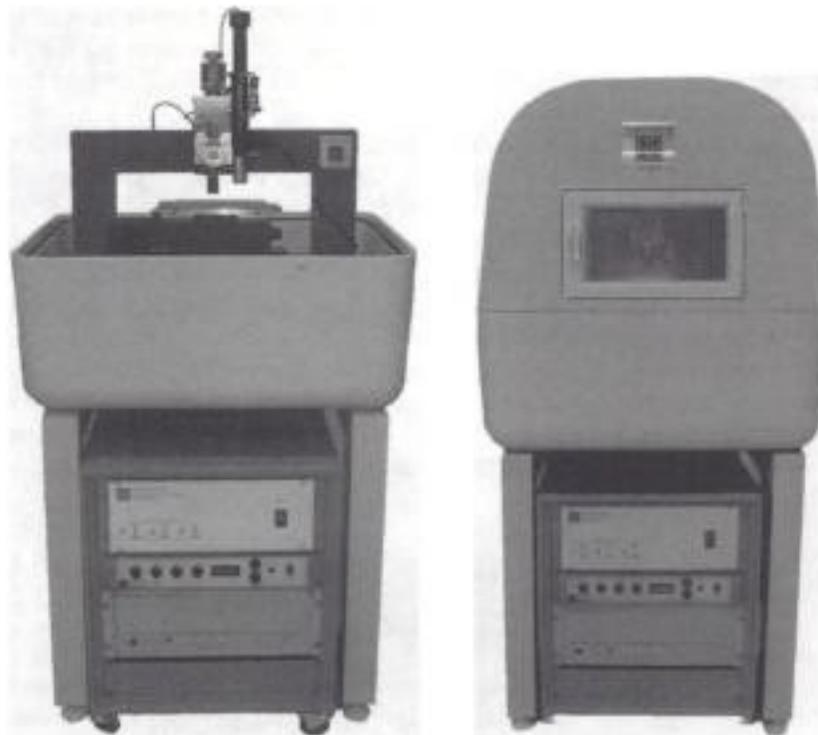


Figura 6-24 Fotografía de un nanopenetrador: el Hysitron TribolIndenter®. (Cortesía de Hysitron Incorporated.)

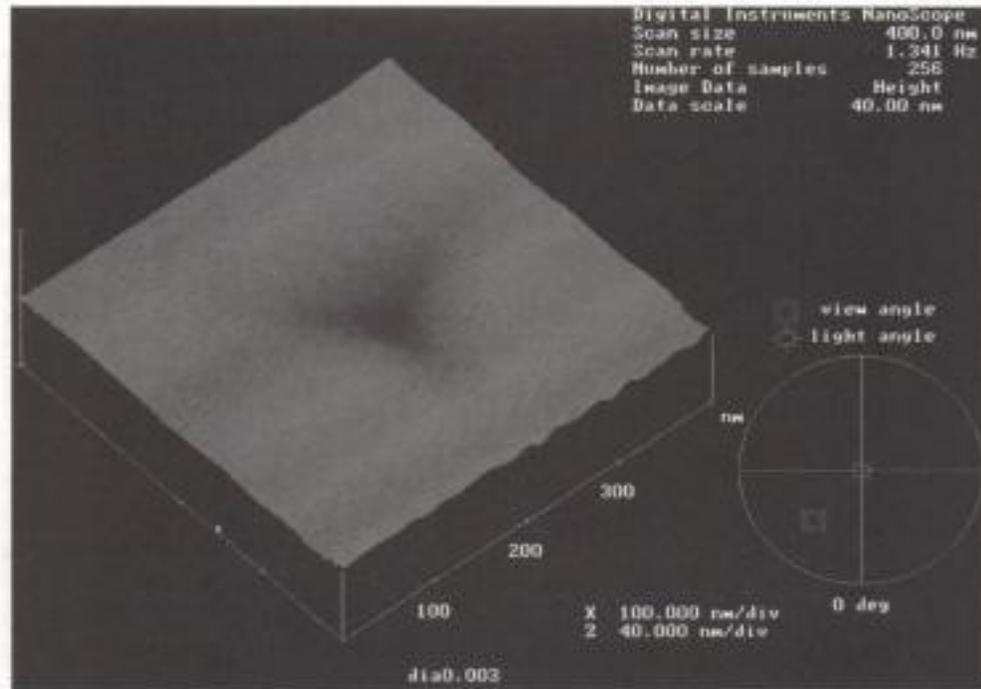


Figura 6-25 Nanopenetración de película de carbono tipo diamante, a nanoescala. (Cortesía del Dr. Scott Mao, Universidad de Pittsburgh.)

aplicada es menor que 2 N.[10] El ensayo Vickers, que usa un indentador de diamante en forma de pirámide, se puede hacer como ensayo de macro o de microdureza. Los ensayos de macrodureza son adecuados para materiales con una dureza superficial mayor que en el núcleo, materiales que en distintas áreas tengan distintos valores de dureza o en muestras que no sean macroscópicamente planas.

En el capítulo 2 describimos los materiales y dispositivos nanoestructurados. Para algunas de las aplicaciones de nanotecnología, son importantes las mediciones de dureza en nanoescala, o de **nanodureza**. Las técnicas para medir la dureza a escalas de longitud muy pequeñas se han vuelto importantes en muchas aplicaciones, para las cuales se usa un nanoindentador (Fig. 6-24). La carga aplicada en este ensayo es del orden de 100 μN . Esta técnica implica crear una indentación en nanoescala sobre la superficie del material que se ensaya (Fig. 6-25). Con base en la carga aplicada y en las dimensiones de la penetración producida, se puede determinar la dureza a nanoescala de un material. Se ha aplicado exitosamente esta técnica para determinar la nanodureza en recubrimientos de carbono semejante al diamante (DLC, por sus siglas en inglés), depositados sobre discos duros magnéticos. En la actualidad, los ensayos de micro y nanodureza se usan principalmente en investigación y desarrollo.

6-8 Efectos de la velocidad de deformación y comportamiento al impacto

Cuando un material se sujeta a un golpe repentino y violento, en el que la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$ o $\dot{\epsilon}$) es extremadamente rápida, se puede comportar en una forma mucho más frágil que la que se observa en el ensayo de tensión. Eso, por ejemplo, se puede observar en muchos plásticos y en materiales como la masilla Silly Putty®. Si se estira un plástico, polietileno o Silly Putty®, con mucha lentitud, las moléculas de polímero tienen tiempo de desenredarse o las cadenas de deslizarse entre sí y permitir deformaciones plásticas grandes.

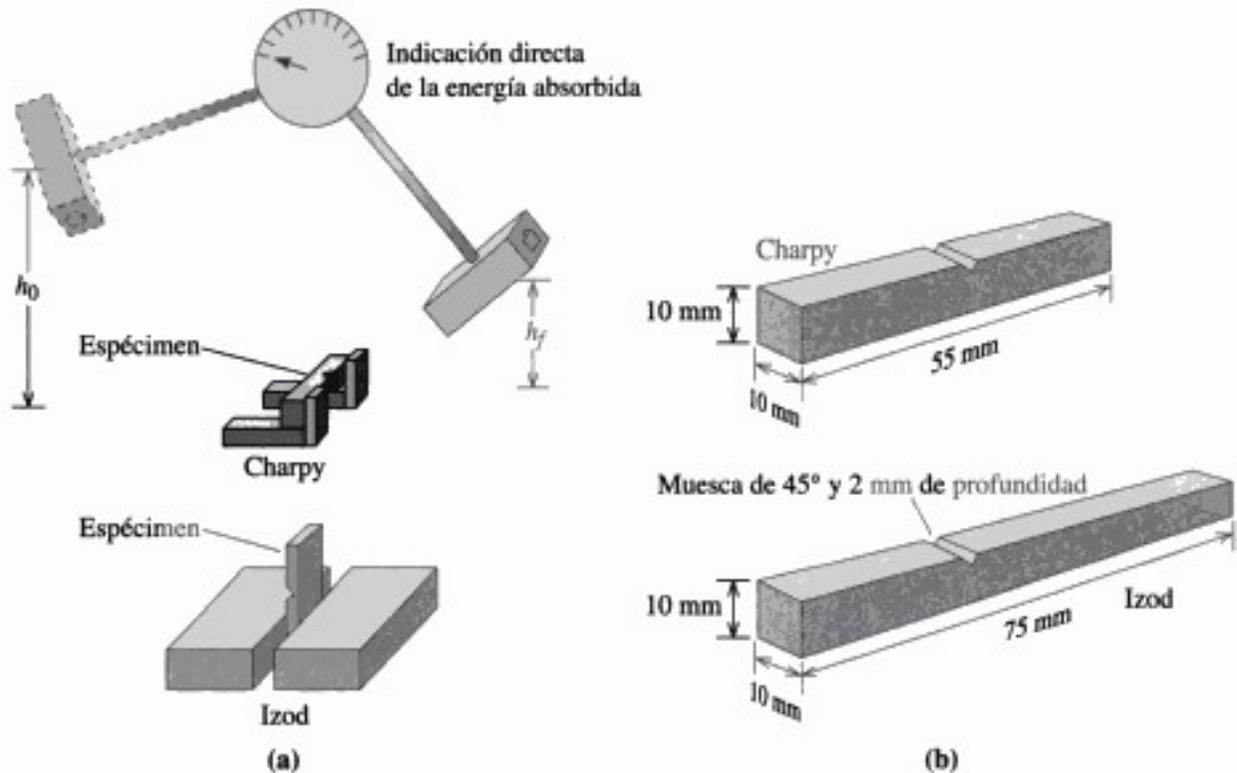


Figura 6-26 El ensayo de impacto: (a) Ensayos de Charpy e Izod y (b) Dimensiones de especímenes normales.

Sin embargo, si se aplica una carga de impacto, el tiempo es insuficiente para que esos mecanismos jueguen un papel en el proceso de deformación, y los materiales se rompen en forma frágil. Con frecuencia se usa un **ensayo de impacto** para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones. En contraste con el ensayo de tensión, en el de impacto las tasas de deformación unitaria son mucho mayores ($\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$).

Se han inventado muchos procedimientos de prueba, incluyendo el ensayo de *Charpy* y el ensayo de *Izod* (Fig. 6-26). El ensayo de *Izod* se usa frecuentemente en materiales plásticos. El espécimen de ensayo puede o no tener muesca; los especímenes con muesca en V son mejores para medir la resistencia del material a la propagación de grietas.

En el ensayo hay un péndulo pesado que comienza a moverse a una altura h_0 , describe su arco, golpea y rompe el espécimen, y llega a una altura final h_f menor. Si se conocen las alturas inicial y final del péndulo se puede calcular la diferencia en energía potencial. Esta diferencia es la **energía de impacto** que absorbió el espécimen cuando falló. Para el ensayo de *Charpy*, la energía se suele expresar en joules (J) o en libra-pie (lb·pie); $1 \text{ lb} \cdot \text{pie} = 1.356 \text{ J}$. Los resultados del ensayo de *Izod* se expresan en J/m o en lb·pie/pulg. La capacidad de un material para resistir el impacto de un golpe se suele llamar **tenacidad al impacto** del material. Como se dijo antes, en algunos casos se considera que el área bajo la curva de esfuerzo-deformación real o ingenieril es una medida de la **tenacidad a la tensión**. En ambos casos, se mide la energía necesaria para romper un material. La diferencia es que en los ensayos de tensión las velocidades de deformación son mucho menores en comparación con las que se usan en un ensayo de impacto. Otra diferencia es que en un ensayo de impacto se manejan en general materiales que tienen una muesca. La **tenacidad a la fractura** de un material se define como la capacidad del mismo para resistir una carga aplicada, cuando el material contiene imperfecciones. En la sección 6-10 se describirá la tenacidad a la fractura.

6-9 Propiedades que se obtienen en el ensayo de impacto

En la figura 6-27 se observa una curva que muestra las tendencias en los resultados de una serie de ensayos de impacto efectuadas en nylon a distintas temperaturas. En la práctica, los ensayos se hacen a una cantidad limitada de temperaturas.

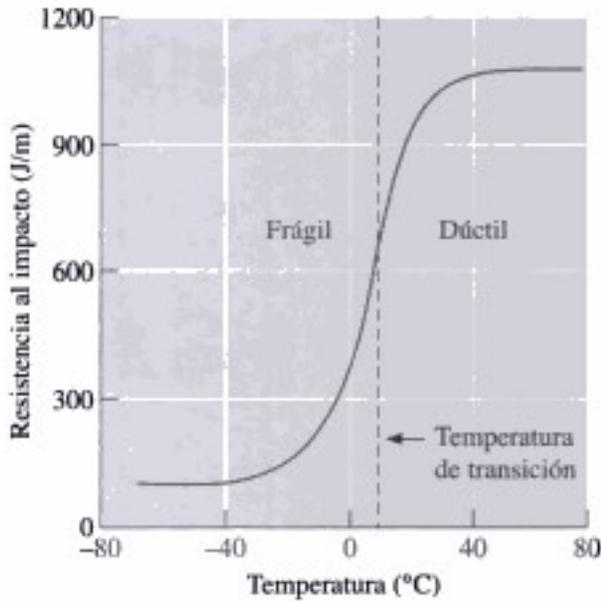


Figura 6-27 Resultados de una serie de ensayos de impacto para un polímero termoplástico de nylon supertenaz.

Temperatura de transición de dúctil a frágil (DBTT, por sus siglas en inglés) La **temperatura de transición de dúctil a frágil** es aquella a la cual el modo de fractura en un material cambia de dúctil a frágil. Se puede definir esta temperatura mediante la energía promedio entre las regiones dúctil y frágil, o a cierta energía específica absorbida, o mediante la aparición de alguna fractura característica. Un material que se somete a un golpe de impacto en servicio debe tener una temperatura de transición *menor* que la de su entorno.

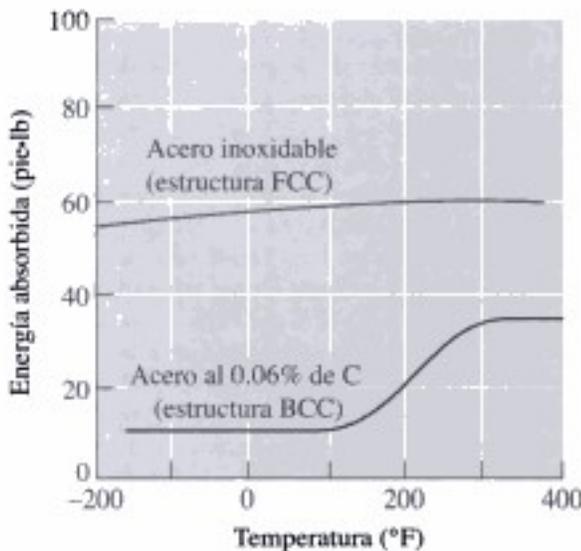


Figura 6-28 Propiedades de muesca en V de Charpy para un acero al carbono BCC y un acero inoxidable FCC. La estructura cristalina FCC normalmente conduce a mayores energías absorbidas, sin mostrar temperatura de transición.

No todos los materiales tienen una temperatura de transición definida (Fig. 6-28). Los metales BCC tienen temperaturas de transición, pero la mayoría de los metales FCC no la tienen. Estos metales tienen grandes energías absorbidas que decrecen en forma gradual y a veces incluso aumentan, a medida que la temperatura disminuye. Como se mencionó antes, puede ser que esta transición haya contribuido a la falla del *Titanic*.

La temperatura de transición de dúctil a frágil se relaciona estrechamente con la temperatura de transición vítrea en los polímeros y, para fines prácticos, se maneja de la misma manera. Como se mencionó antes, la menor temperatura de transición de los polímeros que se usaron en los sellos "O" del cohete de impulsión, así como otros factores, causaron el desastre del *Challenger*.

Sensibilidad a la muesca Las muescas originadas por un maquinado o fabricación deficiente, o las ya diseñadas, concentran esfuerzos y reducen la tenacidad de los materiales. La **sensibilidad a la muesca** de un material se puede evaluar comparando las energías absorbidas de especímenes con y sin muesca. Las energías absorbidas son mucho menores en los especímenes con muesca, si el material es sensible a la muesca. En la sección 6-15 se describirá cómo la presencia de muescas afecta el comportamiento de los materiales sometidos a esfuerzos cíclicos.

Relación con el diagrama esfuerzo-deformación La energía necesaria para romper un material durante un ensayo de impacto, es decir, la tenacidad al impacto, no siempre se relaciona con la tenacidad a la tensión (es decir, el área contenida dentro del diagrama esfuerzo-deformación reales, figura 6-29). Como se dijo antes, con frecuencia los ingenieros consideran que el área bajo la curva esfuerzo-deformación ingenieril es la tenacidad a la tensión. En general, los metales que tienen alta resistencia y a la vez gran ductilidad, tienen buena tenacidad a la tensión. Sin embargo, no siempre es así cuando las velocidades de deformación son altas. Por ejemplo, los metales que muestran una excelente tenacidad a la tensión pueden presentar comportamiento frágil cuando están sujetos a velocidades de deformación altas; es decir, pueden mostrar pobre tenacidad al impacto. De esta forma, la velocidad de deformación puede desplazar la transición de dúctil a frágil (DBTT). Los cerámicos y muchos materiales compuestos tienen, normalmente, mala tenacidad, aunque alta resistencia, debido a que virtualmente no tienen ductilidad. Esos materiales muestran tanto tenacidad a la tensión como al impacto deficientes.

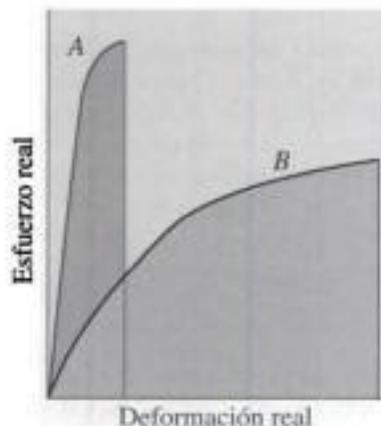


Figura 6-29 El área contenida por la curva de esfuerzo real-deformación real se relaciona con la tenacidad a la tensión. Aunque el material B tiene menor resistencia de cedencia, absorbe mayor cantidad de energía que el material A. Las energías obtenidas con estas curvas pueden ser distintas a las obtenidas con datos de ensayos de impacto.

Uso de las propiedades de impacto La energía absorbida y la temperatura de transición de dúctil a frágil son muy sensibles a las condiciones de carga. Por ejemplo, la mayor rapidez de aplicación de energía al espécimen reduce la energía absorbida y aumenta la temperatura de transición de dúctil a frágil. El tamaño del espécimen también afecta los resultados, porque es más difícil que un material grueso se deforme; por consiguiente, se necesitan energías menores para romper materiales gruesos. Por último, la configuración de la muesca afecta el comportamiento: una grieta superficial en punta y aguda permite menores energías absorbidas que una muesca en V. Ya que con frecuencia no se pueden predecir o controlar todas esas condiciones, el ensayo de impacto es una forma rápida, cómoda y poco costosa de comparar diversos materiales.