

## PRUEBA DE MATERIALES Y REOLOGÍA DE ALIMENTOS SÓLIDOS

---

### 2.1. INTRODUCCIÓN

La complejidad de los procesos modernos de manufactura de alimentos y la importancia que se le otorga a la calidad exigen entender mejor la función de las propiedades de los materiales que constituyen los alimentos sólidos y los semisólidos. Las propiedades mecánicas se definen por lo general como el comportamiento en cuanto a esfuerzo-deformación de un material en condiciones de carga estática o carga dinámica, en tanto que la reología se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia. La naturaleza polimérica de los almidones y las proteínas en particular, sugiere que las características de los materiales deben determinarse en el contexto de los principios fundamentales de la física de los polímeros. Por lo general, los procedimientos para probar los materiales consisten en pruebas no destructivas que producen poca deformación y pruebas destructivas que acarrearán deformaciones mayores. Las primeras resultan muy convenientes para caracterizar las varias estructuras reticulares comunes en muchos alimentos como el queso; en tanto que las segundas, son útiles para determinar la extensibilidad y la resistencia máxima de estas estructuras. La combinación de los dos tipos de pruebas es provechosa para entender las relaciones entre la micro (macro) estructura y las propiedades complejas de los alimentos, como la textura.

### 2.2. INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA LA PRUEBA DE MATERIALES

#### 2.2.1. Medición de la fuerza

Existen varios instrumentos para efectuar la medición de la fuerza; por ejemplo, el Instron (el aparato de prueba universal). En este capítulo se hace referencia al TA-XT2 (Texture

Technologies, Scarsdale, Nueva York), un instrumento que determina las propiedades de resistencia y textura de los materiales alimenticios. Funciona deformando de varias maneras los materiales y midiendo la fuerza que se requiere para producir esa deformación. Por ejemplo, las fibras comúnmente se prueban midiendo la fuerza que se necesita para estirarlas y romperlas. El procedimiento usual para probar alimentos como el queso consiste en comprimirlos o forzarlos a pasar a través de un orificio pequeño. La fuerza resultante frente a los datos de la deformación es una función tanto de las propiedades de los materiales como de las dimensiones del fragmento de material particular probado. A fin de caracterizar al material independientemente de sus dimensiones, los datos de fuerza-tiempo deben convertirse en datos de esfuerzo-deformación. Aunque en el mercado existen otros aparatos, el TA-XT2 es el que más se utiliza en la industria alimentaria.

**2.2.1.1. Descripción.** El TA-XT2 aparece en la figura 2.1. Es un instrumento conectado a una computadora, un monitor y un teclado de control. El sistema funciona por medio de un programa con ambiente Windows. La muestra se coloca en la plataforma destinada a ello; luego, el dispositivo medidor se baja para comprimir la muestra o se eleva para estirarla (para esto, la muestra debe estar fija por ambos extremos). El analizador de textura puede programarse para mantener un esfuerzo o una deformación constantes, o bien puede especificarse una velocidad de carga cruzada constante. Algunas de las pruebas que es posible llevar a cabo con el TA-XT2 son:

1. Prueba de relajamiento del esfuerzo.
2. Prueba de penetración.
3. Prueba de fluencia en caliente.
4. Prueba de doblado en tres puntos.
5. Ensayo de tensión.
6. Prueba de extensibilidad.

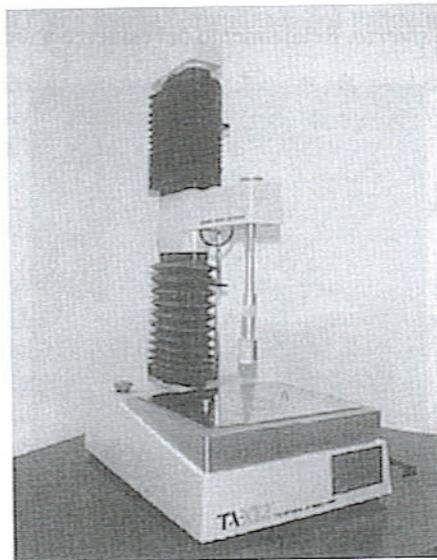


Figura 2.1. Analizador de textura TA-XT2.

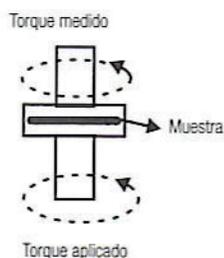


Figura 2.2. Principio de operación del análisis mecánico dinámico.

### 2.2.2. Análisis mecánico dinámico (DMA)

A diferencia del TA-XT2, para las pruebas no destructivas con poca deformación se utiliza un reómetro oscilatorio dinámico, ya sea en modo de oscilación —barrido de deformación— o modo de relajamiento del esfuerzo. Primero, la muestra se coloca en la plataforma y se hace descender la placa superior de manera que haga contacto con la muestra (figura 2.2). La parte inferior de la placa oscila a una frecuencia especificada y aplica el torque a la muestra. Un transductor mide el torque que se transmite a través de la muestra. Los resultados se dan en términos de módulo complejo ( $G^*$ ), módulo de almacenamiento ( $G'$ ), módulo de pérdida ( $G''$ ), viscosidad compleja y  $\tan \delta$ .

Las pruebas que es posible realizar en el análisis mecánico dinámico (DMA, por sus siglas en inglés) incluyen las siguientes:

1. *Prueba de cura.* Manteniendo la muestra a temperatura y frecuencia constantes.
2. *Barrido de temperatura.* Incrementando la temperatura a una frecuencia fija.
3. *Barrido de deformación.* Incrementando la amplitud de la deformación a una frecuencia fija.
4. *Barrido de frecuencia.* Aumentando la frecuencia de oscilación a una deformación fija.
5. *Relajamiento del esfuerzo.* Relajamiento del esfuerzo a una deformación constante.

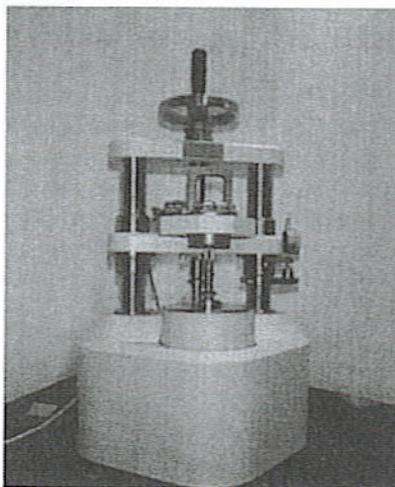


Figura 2.3. Reómetro oscilatorio.

Una ventaja de utilizar el análisis mecánico dinámico es la capacidad de controlar la temperatura en un amplio intervalo. El análisis mecánico dinámico térmico, por lo general implica variar la temperatura, la amplitud de la deformación o la frecuencia, mientras las otras dos variables se mantienen constantes. Claro está, en el caso de alimentos con un contenido considerable de agua, el límite superior de temperatura es un poco más bajo que 100°C. En este capítulo se toma como referencia un reómetro Bohlin VOR-M (Bohlin Rheologi, Cranbury, Nueva Jersey) (figura 2.3), aunque en el mercado existen otros instrumentos.

## 2.3. ANTECEDENTES

Si se quiere diseñar e interpretar pruebas de materiales y sus resultados, es fundamental entender los conceptos básicos de esfuerzo y deformación.

### 2.3.1. Esfuerzo

1. *Fuerza.* El TA-XT2 mide la fuerza que se requiere para que un objeto se deforme y la registra en gramos, kilogramos, libras fuerza ( $lb_f$ ) o Newtons ( $1\text{ kg}_f = 9.807\text{ N}$ ). La fuerza depende de la naturaleza del material, pero en vista de que también depende de las dimensiones de la muestra de prueba, no es una propiedad sólo del material.
2. *Esfuerzo.* La fuerza que se aplica a un objeto se distribuye por todo el objeto. Si, en cualquier punto dentro del objeto, se traza un plano perpendicular a esta fuerza interna, se puede definir el esfuerzo en ese punto como la magnitud de la fuerza por unidad de área de la sección transversal.

$$\text{Esfuerzo} = (\sigma) = \frac{F}{A} = \frac{\text{Fuerza aplicada}}{\text{Área de la sección transversal}} \quad (2.1)$$

Es claro que la misma fuerza aplicada sobre un área de sección transversal más pequeña resulta en un mayor esfuerzo. Por tanto, el esfuerzo se define como la intensidad de la fuerza o una fuerza normalizada por llamarla de algún modo.

*Ejemplo.* Si una barra rectangular de 2 cm de altura, 1 cm de grosor y 4 cm de largo se comprime en los extremos con una fuerza de 4 N, el esfuerzo en cualquier punto de la barra es

$$\sigma = \frac{4\text{ N}}{0.02\text{ m} \times 0.01\text{ m}} = 20\,000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 20\,000\text{ Pa} = 20\text{ kPa}$$

3. *Unidades de esfuerzo.* El esfuerzo se define como la fuerza por unidad de área, análogo a la presión. En realidad, la presión hidrostática es simplemente una forma de esfuerzo y tiene las mismas unidades que éste.
4. *Esfuerzo de compresión.* Cuando un objeto se coloca entre un par de fuerzas opuestas que apuntan una a la otra como se muestra en la figura 2.4, el efecto es que el objeto se comprime. El esfuerzo resultante se conoce como esfuerzo de compresión. Se aplica un esfuerzo de compresión cuando se aprieta una bola de masa entre las manos.
5. *Esfuerzo de tensión.* Cuando un objeto es sostenido por dos fuerzas que tiran en sentidos opuestos como se representa en la figura 2.5, el efecto es que el objeto se estira. El esfuerzo resultante se llama esfuerzo de tensión. Se aplica un esfuerzo de tensión cuando se estira una liga.

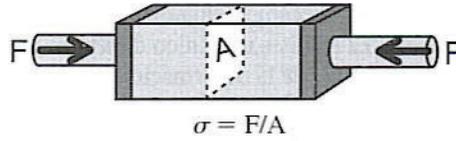


Figura 2.4. Principio del esfuerzo de compresión.

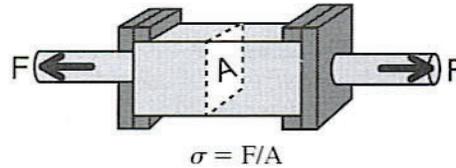


Figura 2.5. Principio del esfuerzo de tensión.

6. *Esfuerzo axial.* Tanto en el esfuerzo de compresión como en el de tensión, el par de fuerzas aplicadas existe a lo largo de un eje común. En consecuencia, estos dos esfuerzos se clasifican como esfuerzos axiales.
7. *Esfuerzo normal.* Al calcular ya sea el esfuerzo de compresión o el esfuerzo de tensión en un objeto, la fuerza aplicada se divide entre el área de la sección transversal del objeto que es perpendicular al eje de la fuerza. Ya que esta área es normal a la fuerza, el esfuerzo se conoce como esfuerzo normal.
8. *Esfuerzo de corte.* Cuando un par de fuerzas son paralelas pero no ocurren a lo largo de un eje común, el efecto es que el objeto se tuerce a un lado. Por ejemplo, si la parte superior de un objeto rectangular se jala hacia la derecha mientras que la inferior se jala hacia la izquierda como aparece en la figura 2.6, el objeto se convertirá en un paralelogramo. Este tipo de esfuerzo se conoce como esfuerzo de corte:

$$\text{Esfuerzo de corte} = (\tau) = \frac{F}{A} \tag{2.2}$$

donde  $\tau$  por lo general denota un esfuerzo de corte.

9. *Esfuerzo tangencial.* Al calcular el esfuerzo de corte, la magnitud de las fuerzas se divide entre el área de la sección transversal del objeto que es paralela a las fuerzas. Ya que las fuerzas son tangenciales, en vez de perpendiculares al área, este esfuerzo se conoce como tangencial.
10. *Esfuerzo isotrópico.* Un esfuerzo que viene de todas direcciones con la misma magnitud, como en el caso de la presión hidrostática, se conoce como esfuerzo isotrópico. El esfuerzo isotrópico se representa en la figura 2.7, y resulta idéntico a la presión sobre la superficie del objeto:

$$\text{Esfuerzo isotrópico} = (P) = \frac{F}{A} = \text{Presión hidrostática} \tag{2.3}$$

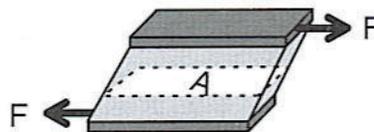


Figura 2.6. Principio del esfuerzo de corte.

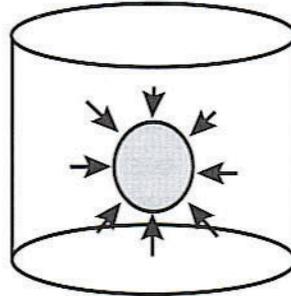


Figura 2.7. Principio del esfuerzo isotrópico.

### 2.3.2. Deformación

1. *Deformación absoluta.* Cuando un objeto se somete a esfuerzo, una o más de sus dimensiones (por decir,  $L$ ) por lo general cambia. La magnitud de este cambio dimensional ( $\Delta L$ ) es lo que se conoce como deformación absoluta.
2. *Deformación.* Sometidos al mismo esfuerzo, es de esperar que un objeto largo cambie más que uno corto. Así, la deformación es una función tanto de la naturaleza del material como de sus dimensiones. A fin de tener una propiedad que dependa únicamente del material, se define a la deformación como la magnitud del cambio dividido entre la dimensión inicial:

$$\text{Deformación} = (\epsilon) = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\text{Cambio de longitud}}{\text{Longitud original}} \quad (2.4)$$

En la figura 2.8 se ilustran las deformaciones de compresión y de tensión. A esto se le conoce comúnmente como deformación de ingeniería. La deformación verdadera es dada por

$$\epsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (2.5)$$

donde  $L$  = longitud bajo esfuerzo después de alargamiento o compresión.

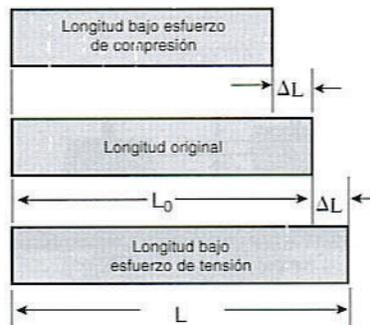


Figura 2.8. Principio de las deformaciones de compresión y de tensión.

*Ejemplo.* Una liga de 3.00 pulgadas de longitud se estira hasta 4.50 pulgadas. La deformación sobre esta liga es

$$\varepsilon = \frac{4.50 - 3.00}{3.00} = \frac{1.50}{3.00} = 0.50 \quad (\text{deformación de ingeniería})$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{4.5}{3.0}\right) = 0.41 \quad (\text{deformación verdadera})$$

De esta manera, la deformación de ingeniería es sólo una aproximación de la verdadera deformación en el caso de una deformación considerable, pero no obstante se le utiliza ampliamente.

3. *Unidades de deformación.* Puesto que la deformación es siempre la razón de dos longitudes, siempre es adimensional.
4. *Deformación axial.* Cuando un objeto se somete a una deformación de compresión o de tensión, la longitud disminuye o aumenta a lo largo del eje del esfuerzo. A esta clase de cambio se le conoce como deformación axial.
5. *Deformación lateral (transversa).* Cuando se estira un objeto, por lo general se adelgaza; cuando se le comprime, generalmente se hace más grueso. Así, para cualquier deformación axial, existe comúnmente una deformación compensatoria en ángulos rectos a la fuerza, que se conoce como deformación lateral o transversa. En la figura 2.9, la deformación lateral se define como

$$\varepsilon_{\text{Lateral}} = \frac{\Delta W}{W} \quad (2.6)$$

6. *Cociente de Poisson.* El cociente entre la deformación lateral y la deformación axial mide en qué grado los cambios de longitud se acompañan de cambios de las dimensiones no axiales, es decir, el diámetro de un cilindro. Por lo general, varía de 0 (sin combadura) a un máximo de 0.5 (una combadura igual a la mitad de la compresión). Con respecto a la figura 2.9, se observa que el cociente de Poisson se calcula como

$$\text{Cociente de Poisson } (\mu) = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} = \frac{\Delta D/D}{\Delta L/L} \quad (2.7)$$

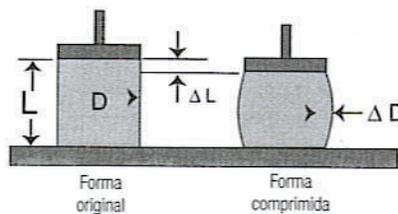


Figura 2.9. Principio de las deformaciones axial y lateral.

*Ejemplo.* Un cilindro de queso de 2.00 pulgadas de altura y 1.00 pulgada de diámetro se comprime a lo largo de su eje hasta una longitud de 1.80 pulgadas. El diámetro del cilindro aumenta a 1.04 pulgadas:

$$\begin{aligned} \text{Deformación axial} &= \frac{2.00 - 1.80}{2.00} = 0.10 \\ \text{Deformación lateral} &= \frac{1.04 - 1.00}{1.00} = 0.04 \\ \text{Cociente de Poisson} &= \frac{\text{Deformación lateral}}{\text{Deformación axial}} = \frac{0.04}{0.10} = 0.4 \end{aligned}$$

El cociente de Poisson varía de 0 (sin contracción lateral) a 0.5 cuando no hay cambio de volumen durante la deformación. Los elastómeros (por ejemplo, el hule o caucho) se caracterizan por presentar valores cercanos a 0.5, en tanto que en el caso de las espumas flexibles se encuentran valores cercanos a 0; los plásticos y los metales presentan valores intermedios.

7. *Deformación volumétrica.* Cuando se somete a esfuerzo un objeto de cualquier manera, como cuando se halla bajo presión hidrostática, su volumen cambia. Esto se conoce como deformación volumétrica y se calcula como el cambio de volumen dividido entre el volumen inicial a presión manométrica o absoluta:

$$\text{Deformación volumétrica} = (\epsilon_{\text{vol}}) = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\text{Cambio de volumen}}{\text{Volumen inicial}} \quad (2.8)$$

*Ejemplo.* Se encuentra que un cilindro duro ocupa 4.00 pulg<sup>3</sup>. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 3.92 pulg<sup>3</sup>. La deformación volumétrica a esta presión es

$$\epsilon_{\text{vol}} = \frac{4.00 - 3.92}{4.00} = \frac{0.08}{4.00} = 0.02$$

8. *Deformación de corte.* La deformación de corte, como se representa en la figura 2.10, es una distorsión que ocurre cuando las fuerzas opuestas no están alineadas entre sí. Así, la deformación de corte es igual a la tangente del ángulo de deformación causada por el esfuerzo de corte:

$$\text{Deformación de corte} = (\gamma) = \frac{\Delta L}{L} = \tan(\theta) \quad (2.9)$$

en la que  $\gamma$  usualmente significa una deformación de corte.

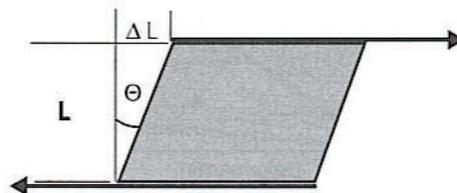


Figura 2.10. Principio de la deformación de corte.

*Ejemplo.* Un trozo de gelatina de 1.5 pulgadas de grosor se encuentra entre dos placas horizontales. La placa superior se mueve 0.1 pulgadas hacia la derecha, lo que hace que la gelatina se incline. La deformación de corte es

$$\gamma = \frac{0.10}{1.5} = 0.067$$

y las unidades son radianes.

El ángulo de deformación en este caso es  $\theta = \tan^{-1}(0.067) = 0.68^\circ$ , lo que indica que para deformaciones pequeñas,  $\gamma \sim \theta$ .

### 2.3.3. Relación entre esfuerzo y deformación

1. *Material elástico.* Cuando se aplica un esfuerzo a un objeto, por regla general éste se deforma. Cuando se elimina el esfuerzo, podría o no recuperar sus dimensiones originales. De un material que regresa a sus dimensiones originales se dice que es elástico perfecto.
2. *Ley de Hooke.* Esta ley establece que la deformación que experimenta un objeto es directamente proporcional al esfuerzo aplicado, es decir,

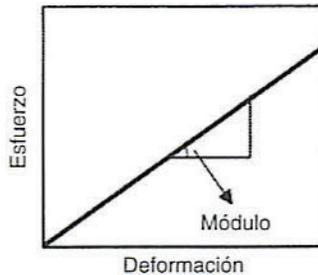
$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.10)$$

donde  $E$  es la constante de proporcionalidad. Un material que obedece esta ley se dice que es un "sólido de Hooke". De hecho, la mayoría de los materiales son sólidos de Hooke en el límite de la pequeña deformación.

3. *Módulo de Young.* La constante  $E$  de la ley de Hooke se conoce como módulo de Young:

$$\text{Módulo de Young} = (E) = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} \quad (2.11)$$

El módulo de Young es una medida de la rigidez o resistencia a la deformación de un material. En la figura 2.11 se observa una gráfica de esfuerzo contra deformación para un material de Hooke. A medida que el esfuerzo aplicado aumenta, la deformación aumenta en proporción directa. El módulo de Young es la pendiente de esta línea. En el caso de los materiales de Hooke, este módulo depende sólo del material y no de las dimensiones ni de la magnitud del esfuerzo aplicado. Por tanto, resulta una medida útil de una propiedad del material. Por ejemplo, un esfuerzo



**Figura 2.11.** Principio de la ley de Hooke, es decir, una respuesta lineal entre esfuerzo y deformación.

grande aplicado a un palito de pan resulta sólo en una deformación pequeña con un módulo relativamente grande, en tanto que un pastelillo bocado de ángel, que demuestra un esfuerzo menor para la misma deformación, tendrá un módulo más pequeño. Claro está, este concepto del módulo únicamente se aplica en la región lineal de una curva de esfuerzo-deformación.

4. *Unidades de módulo.* Ya que el denominador de un módulo es siempre adimensional, las unidades de cualquier módulo son las mismas unidades de esfuerzo, a saber, fuerza por unidad de área; por ejemplo: Pa [=1 N/m<sup>2</sup>].
5. *Módulo global.* El módulo global para cambios volumétricos se define de manera similar:

$$\text{Módulo global} = (K) = \frac{P}{\epsilon_{\text{vol}}} = \frac{\text{Presión hidrostática}}{\text{Deformación volumétrica}} \quad (2.12)$$

6. *Módulo de corte.* El módulo de corte es el cociente entre esfuerzo de corte y deformación de corte:

$$\text{Módulo de corte} = (G) = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\text{Esfuerzo de corte}}{\text{Deformación de corte}} \quad (2.13)$$

### 2.3.4. Propiedades viscoelásticas

Algunos alimentos semisólidos como la masa de pan, los geles o el queso tienen un comportamiento viscoso y a la vez tipo sólido. A estos materiales se les conoce generalmente como materiales viscoelásticos. En una prueba mecánica dinámica, una muestra es modificada por una deformación que varía de manera sinusoidal con el tiempo, lo que resulta en un esfuerzo que varía de modo sinusoidal, como se ilustra en la figura 2.12. El ensayo dinámico permite separar el esfuerzo debido a la deformación sinusoidalmente variable en sus componentes viscoso y elástico. El siguiente análisis se basa en el trabajo de Rosen (1993).

1. *Deformación sinusoidal.* Ésta se define como

$$\gamma = \gamma' \text{ sen } \omega t \quad (2.14)$$

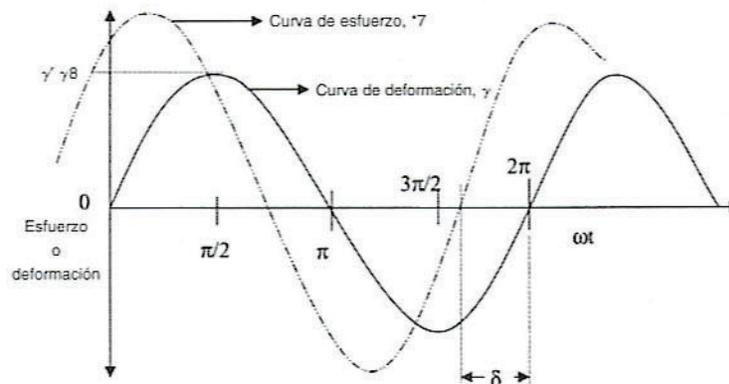


Figura 2.12. Vista esquemática de la deformación que varía de manera sinusoidal en una prueba dinámica representativa.

donde  $\gamma'$  = deformación máxima de una deformación que varía de modo sinusoidal,  $\omega$  = frecuencia angular (radián/s),  $t$  = tiempo (s).

2. *Esfuerzo en fase.* Este componente del esfuerzo total ( $\tau^*$ ) se halla en fase con la deformación y define el módulo de almacenamiento  $G'$ :

$$\tau' = G' \cdot \gamma' \quad (2.15)$$

donde  $\tau'$  = esfuerzo en fase y  $G'$  = módulo de almacenamiento.

3. *Esfuerzo fuera de fase.* Este componente del esfuerzo total ( $\tau^*$ ) se encuentra fuera de fase con la deformación y define el módulo de pérdida  $G''$ :

$$\tau'' = G'' \cdot \gamma' \quad (2.16)$$

donde  $\tau''$  = esfuerzo fuera de fase y  $G''$  = módulo de pérdida. Observe que el ángulo de fase ( $\delta$ ) será cero para un material elástico ideal y  $90^\circ$  para un material puramente viscoso, en tanto que para un material viscoelástico, el ángulo de fase varía entre  $0$  y  $90^\circ$ .

4. *Módulo complejo.* El módulo complejo es la suma vectorial de los módulos en fase y fuera de fase como lo demuestra la ecuación 2.17:

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} = (G' + iG'') \text{ y la magnitud de } G^* (|G^*|) = (G'^2 + G''^2)^{1/2} \quad (2.17)$$

5. *Tangente de pérdida (tangente de delta).* Esta es el cociente entre el módulo de pérdida y el módulo de almacenamiento, como se demuestra en la ecuación 2.18 y representa el cociente entre el esfuerzo que se disipa en forma de calor y el esfuerzo que se almacena por elasticidad.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} = \frac{\tau''/\gamma'}{\tau'/\gamma'} = \frac{\tau''}{\tau'} \quad (2.18)$$

6. *Trabajo.* El trabajo realizado durante el primer cuarto de ciclo de una deformación que varía de modo sinusoidal es dado por la ecuación 2.19:

$$W = \frac{(\gamma')^2}{2} G' + \frac{\pi}{4} (\gamma')^2 G'' \quad (2.19)$$

El primer término de la ecuación representa el trabajo elástico o recuperable, y el segundo término el trabajo disipado o "perdido" en forma de calor. El trabajo realizado en el segundo cuarto del ciclo es el mismo, excepto que el signo del término de energía almacenada es negativo, lo que indica que la energía elástica es devuelta. Sin embargo, siempre hay una pérdida por disipación. La pérdida de energía total que se convierte en calor dentro del material para un ciclo completo lo da la ecuación 2.20 (Rosen, 1993):

$$W = 4 \cdot \left\{ \frac{\pi}{4} (\gamma')^2 G'' \right\} = \pi (\gamma')^2 G'' \quad (2.20)$$

Un ejemplo de deformación cíclica: un bajo  $G''$  sería de desear en los neumáticos de los automóviles, donde es deseable una baja acumulación de calor. Por otra parte, en el ama-

samiento de la masa para hacer pan, se necesita una combinación de valores adecuados de  $G'$  y  $G''$  para permitir un flujo viscoso, es decir, el mezclado. La masa se deja "reposar" después de amasarla, para que la energía elástica almacenada en el mezclado se disipe.

## 2.4. MÉTODOS DE PRUEBA

Así, las propiedades que tienen que ver con la materia de un material sólido se caracterizan por las cuatro constantes anteriores:  $E$ ,  $G$ ,  $\mu$  y  $K$ . Estas cuatro constantes están relacionadas por

$$E = 3K(1 - 2\mu) = 2(1 + \mu)G \quad (2.21)$$

Lo anterior significa que sólo es necesario determinar de manera experimental dos propiedades. En el caso de los elastómeros ( $\mu = 0.5$ ), la ecuación anterior se reduce a la conocida ecuación:

$$E = 3G \quad (2.22)$$

La relación anterior es posible utilizarla para convertir datos de esfuerzo-deformación obtenidos en el modo de corte o modo de tensión y viceversa. Estas constantes de tipo de material se usan cada vez más para caracterizar los materiales alimenticios. Algunos de los procedimientos de prueba utilizados para determinarlas constituyen el tema central de este capítulo.

### 2.4.1. Pruebas de compresión

En ensayos de compresión simples, un propósito común es determinar el módulo de Young del material. Esto se hace como sigue, empleando el queso como ejemplo:

1. Encienda el TA-XT2 y la computadora o cualquier otro instrumento medidor de fuerza.
2. Entre al programa analizador de textura.
3. Introduzca la velocidad de carga cruzada (por decir, 2 mm/s), el área superficial de la muestra (por ejemplo, 506 mm<sup>2</sup>), el tiempo de compresión (60 s), la distancia de compresión (10 mm).
4. Corte una muestra de queso de 20 mm de altura, 25 mm de diámetro empleando un sacabocados.
5. Coloque la muestra bajo la sonda y empiece el ensayo:
  - a) Este ejemplo se refiere al resultado de la prueba ilustrada en la figura 2.13. Se comprimió una muestra de queso de 20 mm de altura y un diámetro de 25 mm (deformación de 50%) utilizando un aparato TA-XT2 como se representa en la figura 2.14.
  - b) En el punto B, la sonda empieza a comprimir la muestra de queso. La fuerza registrada por el instrumento se indica sobre el eje Y.

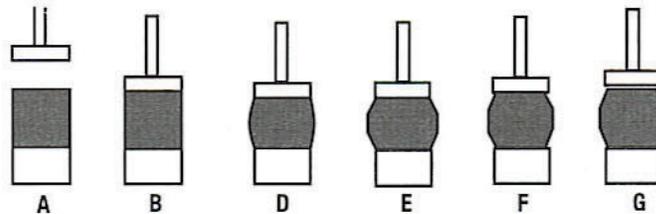


Figura 2.13. Vista esquemática de varias etapas del ensayo de compresión en una muestra de queso.

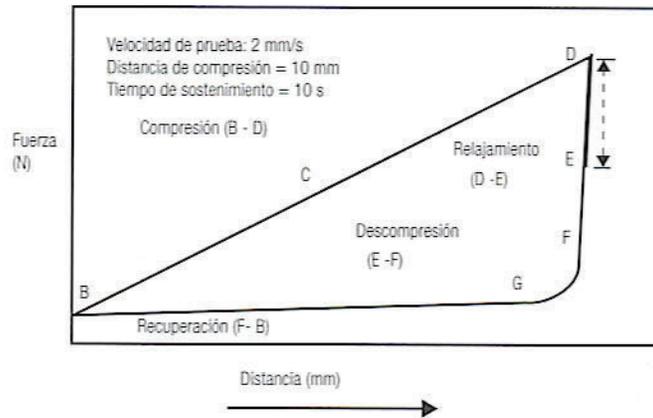


Figura 2.14. Curva fuerza-distancia representativa obtenida para una muestra de queso durante una secuencia compresión/relajamiento/descompresión utilizando el analizador TA-XT2.

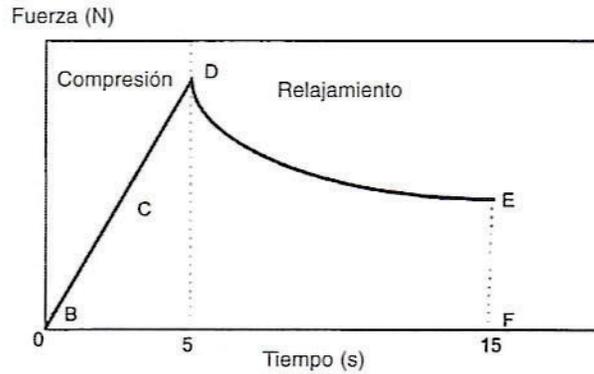
- c. En el punto *D*, la muestra se ha comprimido 10 mm y se mantiene así 10 s. El queso es parcialmente comprimido y permanece estacionario hasta el punto *E*.
- d. Sin movimiento adicional de la sonda, la fuerza ya no aumenta. Sin embargo, entre los puntos *D* y *E*, el queso sigue experimentando una deformación por compresión, pero la fuerza disminuye más que permanecer constante. Esta reducción gradual de la fuerza se llama relajamiento del esfuerzo y es característica de los materiales viscoelásticos.
- e. En la etapa *E*, la sonda empieza a subir y la fuerza disminuye rápidamente.
- f. En el punto *F*, la sonda ya no está en contacto con la muestra.
- g. En el punto *G*, la sonda se aleja del queso y la fuerza vuelve a ser 0 otra vez.
- La fuerza máxima en el punto *D* fue 35 Newtons. El área superficial = 0.000506 m<sup>2</sup>. Por consiguiente, esfuerzo = 35/0.000506 = 69 170 Pa o 69.17 kPa. La fuerza en el punto *B* es 0 N y su esfuerzo es 0 kPa. En consecuencia, el cambio de esfuerzo  $\Delta\sigma = (69.17 - 0) = 69.17$  kPa. Además, el cambio de deformación entre los puntos *D* y *B* es  $\Delta\varepsilon = 0.5 - 0 = 0.5$ .

$$\text{Módulo elástico } E = \left( \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \right) = 138.34 \text{ kPa}$$

Observe que la curva esfuerzo-deformación es lineal (o casi) lineal en esta región. Entre los puntos *D* y *E*, el módulo es una función del tiempo, a diferencia de un material elástico ideal donde *E* sería constante a una deformación constante.

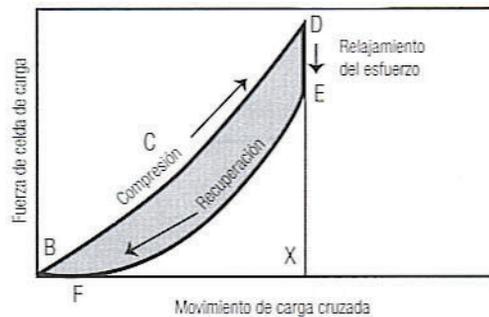
#### 2.4.2. Consideraciones sobre la energía

1. En la figura 2.14 se muestra una curva representativa de fuerza contra distancia para una prueba de compresión de un producto como el queso. Si la coordenada horizontal de este diagrama se convierte con el tiempo en movimiento de carga cruzada, se obtiene una gráfica como se ilustra en la figura 2.15. En la figura 2.14, el área debajo de la curva desde *B-D* representa la integración de fuerza y distancia y, en consecuencia, el trabajo consumido en comprimir el queso.



**Figura 2.15.** Curva representativa de fuerza contra tiempo obtenida para una muestra de queso durante un ensayo de compresión en un instrumento TA-XT2.

- En la figura 2.16 se ilustra una curva que representa la carga y la descarga de la fuerza contra el movimiento de carga cruzada. El trabajo de compresión lo determina el área  $BCDEXFB$  en la figura 2.16.
- En tanto que la carga cruzada es estacionaria (10 s en  $D$ ), los rearrreglos internos (a deformación constante) en el nivel molecular dentro del queso permiten el relajamiento parcial de la fuerza ejercida por el queso contra la carga cruzada y disipa algo de la energía almacenada. Ya que no existe deformación ni movimiento durante el relajamiento, nada de esta energía aparece en forma de trabajo, así que debe perderse como calor. Esto se representa como la línea vertical ( $DE$ ) en la figura 2.16.
- Cuando la carga cruzada se mueve de  $E$  a  $F$  como se indica antes en la figura 2.13, es empujada por el queso conforme éste experimenta una recuperación elástica parcial, de modo que el queso está realizando trabajo sobre la carga cruzada. En el proceso, se recupera el resto de la energía almacenada. Esta energía se representa por el área ligeramente sombreada  $EXFE$  de la figura 2.16.
- La energía que se pierde es la diferencia entre la energía almacenada y la energía recuperada y se representa por el área sombreada más oscura  $BCDEFB$  entre la curva de compresión y la de recuperación. Aunque con anterioridad se estableció que esta pérdida ocurre justo entre  $D$  y  $E$ , en realidad, se efectúa durante todo el proceso, lo que incluye la compresión inicial.



**Figura 2.16.** Curva típica de fuerza contra movimiento de carga cruzada obtenida para una muestra representativa de queso durante la prueba de compresión en un analizador TA-XT2.

En un material elástico ideal como hule o caucho, no habría pérdida por disipación viscosa y la porción superior de la curva de la figura 2.16 ( $D-E$ ) sería horizontal. Además, los puntos  $B$  y  $F$  existirían en el mismo sitio. En el caso de un material puramente viscoso como aceite o agua, la curva no presentaría una porción de recuperación elástica. Los materiales que presentan las curvas representadas en las figuras 2.14, 2.15 y 2.16 se denominan viscoelásticos ya que presentan propiedades tanto viscosas como elásticas, el grado relativo en que una predomina sobre la otra depende de la duración del experimento.

### 2.4.3. Ensayo de tensión

En una prueba de tensión, el material es estirado en vez de ser comprimido. Las pruebas de esta naturaleza constituyen un medio útil para caracterizar las propiedades que tienen que ver con la materia de materiales fibrosos o elastoméricos. Este tipo de prueba simula la manera en que en ocasiones se podría tirar de un producto de panadería, un dulce de regaliz (*licorice*), un queso Mozzarella o carne seca (*jerk*) con los dientes en vez de morderlo.

En este ensayo, el material de prueba se fija entre dos pinzas que jalan; la alternativa es fijar un extremo y jalar del otro. La carga cruzada continúa moviéndose durante toda la prueba. Una curva representativa que podría obtenerse en una prueba de tensión es la figura 2.17.

1.  $A-B$  representa el límite proporcional de Hooke.
2.  $C$  es el punto de cedencia y representa el esfuerzo de cesión o cedencia. Aunque la carga cruzada continúa moviendo y estirando el material, el esfuerzo podría disminuir a medida que se forma un cuello. Esta parte de la curva varía considerablemente de un material a otro. Para materiales quebradizos, podría presentarse fractura en  $C$  y la fuerza podría caer a 0. En el caso de algunos materiales blandos, el flujo plástico podría continuar por algún tiempo ( $C-D$ ) y esta porción de la curva podría ser muy larga.
3.  $E$  es la resistencia máxima del material y la ruptura se produce en algún punto más allá del punto  $E$ . A partir de esta curva es posible determinar varias propiedades materiales.
  - *Módulo de Young*. Mide la resistencia del material que se está estirando y se representa por la pendiente entre  $A$  y  $B$ . Lo anterior se conoce como módulo de ten-

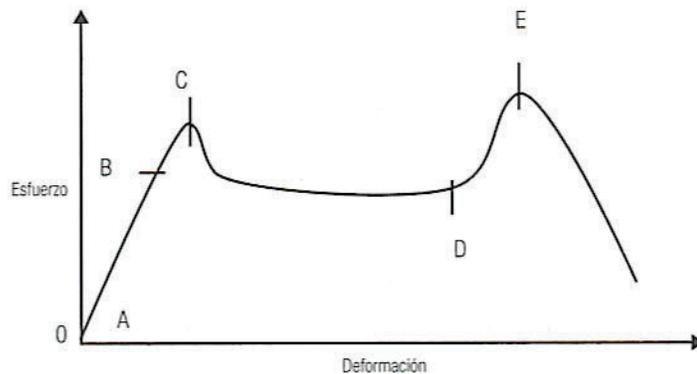


Figura 2.17. Curva esquemática de esfuerzo-deformación en ingeniería en la que se indican varios puntos críticos (no necesariamente se observarán todos los puntos con todos los productos).

sión. Una liga débil tiene un módulo bajo, en tanto que una cuerda gruesa tendría un módulo alto. Al igual que en la prueba de compresión, este módulo es el cociente entre esfuerzo y deformación:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.23)$$

- *Deformación crítica.* Una medida de la cantidad de deformación antes de la cedencia interna ya sea por fractura o formación del cuello. El alargamiento se expresa como porcentaje de la longitud original:

$$(\gamma_c)\% = 100\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) = 100\left\{\frac{L - L_0}{L_0}\right\} \quad (2.24)$$

donde  $L_0$  = longitud inicial del material (en A) y  $L$  = longitud del material en la cedencia (en C).

- *Esfuerzo de cedencia.* El esfuerzo en  $\gamma_c$ .
- *Resistencia máxima.* Esfuerzo en el punto E.
- *Tenacidad o módulo de tenacidad o dureza.* El área debajo de una curva de fuerza-deformación (por ejemplo, hasta el punto C o E) representa el trabajo ( $N \cdot m$  o J) hasta la cedencia o la resistencia máxima, respectivamente. El área bajo la curva correspondiente de esfuerzo-deformación tendría unidades de Pa, esto es, un módulo de tenacidad. Esto equivale a dividir la tenacidad entre el volumen de la muestra.

Para efectuar una prueba de tensión, el material de prueba debe fijarse entre grapas. En muchos casos, la presión que ejercen las grapas debilita al material y causa rotura prematura. Esto se evita rebajando el material hasta darle forma de "hueso", como se indica en la figura 2.18. Las grapas se colocan en los extremos más anchos y la sección central más delgada se convierte en un punto débil, lo que contribuye a que la rotura ocurra lejos de las grapas.

*Ejemplo.* Un trozo de pan se corta en forma de hueso y se estira. Las dimensiones del trozo son las siguientes: anchura central = 1 cm (0.01 m), grosor en el centro = 0.2 cm (0.002 m). Inicialmente, la separación de las pinzas = 8.6 cm (0.086 m). Velocidad de carga cruzada = 0.2 mm/min. Calcule el módulo  $\Delta L = 50$  cm (0.05 m).

#### Solución

$$\Delta\varepsilon = \frac{0.05 \text{ m}}{0.086 \text{ m}} = 0.58 \quad (58\% \text{ de cambio de longitud})$$

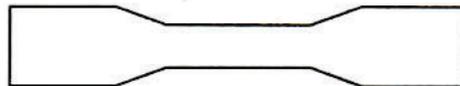


Figura 2.18. Un material de prueba característico al que se le ha dado forma de "hueso" para el ensayo de tensión.

El cambio de fuerza a lo largo del intervalo medido es, por ejemplo, 2 N. Por tanto, el cambio de esfuerzo durante este intervalo es:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{\text{área de la sección transversal}} = \frac{(2.0 \text{ N})}{(0.01 \text{ m})(0.002 \text{ m})} = 100 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ (100 kPa)}$$

Por consiguiente, el módulo es

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{100 \text{ kPa}}{0.58} = 172.4 \text{ kPa (conocido como el área inicial de la sección transversal)}$$

#### 2.4.4. Ensayo de flexión

En un ensayo de flexión, o prueba de doblado en 3 puntos como algunas veces se le llama, una oblea rectangular de material como una galleta se suspende transversalmente sobre dos varillas cilíndricas paralelas, como se indica en la figura 2.19. Una tercera varilla, paralela a las dos primeras, se fija al aparato TA-XT2 y se hace descender sobre la oblea a la mitad del espacio entre los soportes. De esta manera, la muestra se dobla.

##### 1. Dimensiones de prueba

$w$  = anchura de la oblea en la dirección paralela a las varillas de soporte

$t$  = grosor de la oblea

$L$  = longitud de la distancia entre los centros de las varillas paralelas

$D$  = deflexión del centro de la oblea a partir de su posición original en cualquier momento de la prueba

$F$  = fuerza que se ejerce para lograr la deflexión  $D$

2. *Deformación flexionante.* Si una oblea se flexiona  $D$  unidades desde la horizontal, la superficie inferior se estira como se muestra en la figura 2.20. La deformación máxima en las fibras exteriores se calcula así

$$\text{Deformación flexionante máxima} = (\varepsilon_f) = \frac{6Dt}{L^2} \quad (2.25)$$

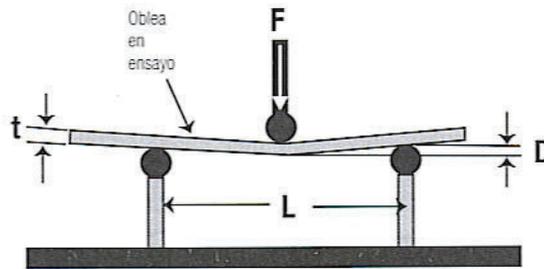


Figura 2.19. Prueba representativa de flexión en un aparato Instron o un TA-XT2.

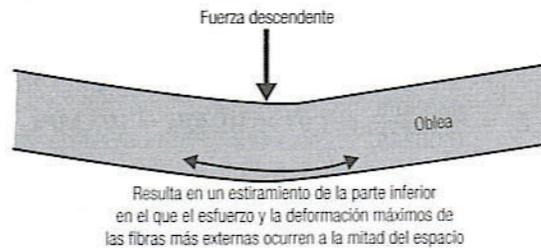


Figura 2.20. Estiramiento en la parte inferior de una muestra durante una prueba de flexión.

Observe que esta deformación ocurre en la dirección horizontal, en ángulo recto a la deformación vertical de la hojuela.

**Ejemplo.** Si una hojuela de 0.05 pulgadas de espesor se suspende entre varillas separadas 3.5 pulgadas y se deforma 0.1 pulgadas desde la horizontal, la superficie inferior de la hojuela experimentará una deformación de

$$\text{Deformación flexionante} = (\varepsilon_f) = \frac{6(0.1 \text{ pulg})(0.05 \text{ pulg})}{(3.5 \text{ pulg})^2} = 0.00245$$

En otras palabras, la superficie inferior en la flexión habrá aumentado en longitud 0.245%.

3. **Esfuerzo flexionante.** El esfuerzo máximo en las fibras exteriores a la mitad del espacio entre los soportes sobre esta superficie inferior se calcula mediante

$$\text{Esfuerzo flexionante} = (\sigma_f) = \frac{3FL}{2wr^2} \quad (2.26)$$

Al igual que con la deformación flexionante, este esfuerzo es horizontal, en ángulo recto a la fuerza aplicada.

**Ejemplo.** Si en el ejemplo anterior, la hojuela era de 1.5 pulgadas de ancho y la deformación fue originada por una fuerza descendente de 0.05 lb, entonces el esfuerzo que está estirando la superficie inferior tiene la siguiente magnitud:

$$\sigma_f = \frac{3(0.05 \text{ lb}_f)(3.5 \text{ pulg})}{2(1.5 \text{ pulg})(0.05 \text{ pulg})^2} = 70.0 \frac{\text{lb}_f}{\text{pulg}^2} \quad (\text{lb/pulg}^2)$$

$$\sigma_f = \left(70.0 \frac{\text{lb}_f}{\text{pulg}^2}\right) \left(\frac{4.4482 \text{ N}}{1 \text{ lb}_f}\right) \left(\frac{39.37 \text{ pulg}}{1 \text{ m}}\right)^2 = 4.83 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 483 \text{ kPa}$$

4. **Módulo de flexión.** Es el cociente del cambio en el esfuerzo máximo de flexión y el cambio en la deformación máxima de flexión:

$$\text{Módulo de flexión} = (E_f) = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} \quad (2.27)$$

*Ejemplo.* En el ejemplo anterior, un esfuerzo de 483 kPa produjo una deformación de 0.00245. El módulo de flexión de esta oblea es

$$E_f = \frac{483 \text{ kPa}}{0.00245} = 1.97 \times 10^5 \text{ kPa} = 197 \text{ MPa}$$

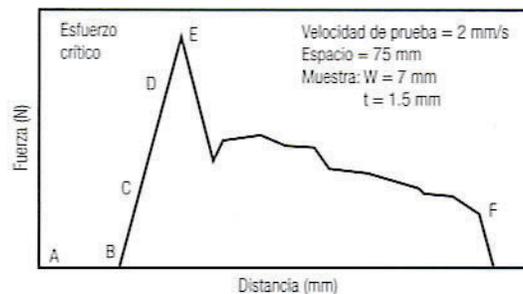
5. *Esfuerzo crítico.* Si un material se somete a esfuerzo hasta que alcanza el punto de deformación permanente o se rompe, el esfuerzo crítico es el esfuerzo calculado en el punto de fractura. Es una medida de la resistencia del material cuando un lado se estira con respecto al otro. En un material fibroso, por ejemplo, es una medida de la resistencia de las fibras.
6. *Deformación crítica.* La deformación calculada en el punto de fractura.
7. *Ensayo de flexión.* En la figura 2.21 se representa una curva característica de fuerza-distancia en un ensayo de flexión.
  - a) En A, la carga cruzada empieza a bajar.
  - b) En B, la varilla adherida a la carga cruzada alcanza el ejemplar de prueba y empieza a doblarlo.
  - c) Desde C a D, existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación. A partir de esta parte de la curva se calcula el módulo de flexión.
  - d) En E, el ejemplar de prueba se fractura pero no se separa. Se mide el esfuerzo máximo y la deformación máxima en este punto.
  - e) De E a F, el ejemplar de prueba continúa doblándose, pero a causa de la fractura, ofrece una menor resistencia y el esfuerzo disminuye.
  - f) En F, el ejemplar se separa y el esfuerzo disminuye hasta 0.

*Ejemplo.* Un pedazo de tortilla (especialmente elaborada para esta prueba) se somete a un ensayo de flexión. Calcular el módulo de flexión si los parámetros de la prueba y la dimensión de la muestra son las siguientes: anchura  $w = 27 \text{ mm}$ , grosor  $t = 7 \text{ mm}$  y distancia entre soportes  $L = 75 \text{ mm}$ . La distancia recorrida entre C y D es

$$\Delta D = 2 \text{ mm} - 0.4 = 1.6 \text{ mm}$$

El cambio en deformación entre C y D es

$$\Delta \epsilon_f = \frac{6\Delta D t}{L^2} = \frac{6(1.6 \text{ mm})(7 \text{ mm})}{(75 \text{ mm})^2} = 0.012$$



**Figura 2.21.** Curva característica de fuerza contra distancia obtenida durante una prueba de flexión en un TA-XT2.

El cambio de fuerza entre C y D es

$$\Delta F = 70 \text{ N}$$

El cambio de esfuerzo entre C y D es

$$\Delta\sigma_f = \frac{3\Delta FL}{2wf^2} = \frac{3(70 \text{ N})(0.075 \text{ m})}{2(0.027 \text{ m})(0.007 \text{ m})^2} = 5\,952 \text{ kPa}$$

El módulo de flexión es

$$E_f = \frac{\Delta\sigma_f}{\Delta\varepsilon_f} = \frac{(5.952 \text{ MPa})}{0.012} = 496 \text{ MPa}$$

Lo anterior representa un resumen de las propiedades materiales representativas y los métodos de prueba para sólidos. Tener en cuenta que "sólidos" originalmente significaba material para soportar carga (acero, cobre, etcétera). Estas pruebas se adaptaron luego a los polímeros y plásticos, y ahora se está viendo su adaptación a los alimentos. Los alimentos no son metales, pero se hace referencia a ellos como sólidos blandos. La principal advertencia para utilizar estas pruebas de gran deformación es tener presente que los resultados dependerán de las condiciones de prueba, básicamente la velocidad de carga cruzada. Claro está, las propiedades materiales podrían cambiar también con la temperatura y la composición de la muestra. Es probable que estas pruebas se utilicen mejor de modo comparativo, en vez de modo absoluto. Por ejemplo, el módulo de flexión de una galleta probablemente debe interpretarse en el contexto de módulos para otras galletas de uso propuesto similar, o de un valor blanco conocido que represente un buen producto.

## 2.5. EJERCICIOS DE LABORATORIO

### 2.5.1. Objetivos

1. Enseñar las pruebas para determinar las propiedades materiales en un instrumento medidor de fuerza representativo.
2. Familiarizarse con los cálculos que se utilizan en las pruebas de compresión, de tensión y de flexión.
3. Relacionar las propiedades materiales obtenidas mediante estos instrumentos con las características de textura de algunos materiales alimenticios.

### 2.5.2. Equipo

1. Analizador TA-XT2 o un instrumento tipo Instron.
2. Cortador cilíndrico de 1 pulgada para dar forma a los ejemplares de prueba.
3. Micrómetro para medir los ejemplares de prueba.

### 2.5.3. Materiales

1. Rebanadas de alrededor de una pulgada de quesos de tres diferentes durezas para el ensayo de compresión: Mozzarella de leche entera, Mozzarella de leche parcialmente descremada y Provolone. Como queso duro se puede utilizar también el Suizo o el Cheddar.
2. Un material apropiado para un ensayo de tensión; por ejemplo, tortillas de maíz y de harina de trigo.
3. Pedazos rectangulares de tortilla, galletas o un material quebradizo similar para las pruebas de flexión.

**2.5.3.1. Medición subjetiva de la textura.** A fin de interpretar la medición del esfuerzo, la de la deformación y la de los módulos, resulta útil relacionarlas con materiales familiares. Medir estas propiedades de manera subjetiva apretando varios quesos con los dedos. Ya que los dedos no están calibrados, simplemente clasificar los varios quesos asignándoles una calificación de 1 a un queso que es el más alto en cuanto a una propiedad particular, 2 para el queso que le sigue, etcétera.

1. *Apriete el queso.* Tome un trozo de cada tipo de queso, aplique un esfuerzo de compresión apretándolos entre los dedos, y observe la deformación (porcentaje de compresión).
2. *Juzgue el esfuerzo relativo.* Para alcanzar aproximadamente la misma deformación, ¿cuál de estos quesos requiere el mayor esfuerzo (categoría 1)? ¿Cuál la siguiente (categoría 2)?, etcétera.
3. *Juzgue la deformación relativa.* Para el mismo esfuerzo aplicado (presión de los dedos), ¿qué queso presenta la mayor deformación (categoría 1)? ¿Cuál la siguiente (categoría 2)?, etcétera.
4. *Juzgue el módulo relativo.* Con base en las respuestas a 2 y 3, ¿qué queso tiene el mayor módulo (categoría 1)? ¿Cuál el siguiente (categoría 2)?, etcétera. Recuerde que el módulo es básicamente la firmeza del queso. Registre los datos en la hoja de datos 2.1.

### 2.5.3.2. Prueba de compresión/relajamiento

1. Corte el cilindro de queso.
2. Rebaje a la altura apropiada.
3. Pegue papel metálico a los extremos del cilindro de queso.
4. Registre las dimensiones de la muestra de prueba en la hoja de datos 2.2.

### 2.5.4. Ajuste del analizador de textura o del Instron

1. Calibre el instrumento con la carga estándar apropiada.
2. Ajuste la perilla de seguridad a un nivel seguro haciendo descender la sonda hasta cerca de la plataforma. Podría dejarse un espacio de alrededor de 2 mm.
3. Fije la sonda cilíndrica de 1 pulgada de diámetro con el fondo plano sobre la carga cruzada del instrumento.
4. Seleccione las unidades de fuerza, distancia y velocidad, etcétera.
5. Seleccione los parámetros como se indica en la tabla 2.1.
6. Ajuste la deformación a alrededor de 25%, lo que debe estar dentro del límite elástico de las muestras.
7. Lleve a cabo la prueba y conserve los datos originales.

**Tabla 2.1. Parámetros utilizados en el ensayo de compresión/relajamiento**

Parámetros	Descripción	Valores
Velocidad antes del ensayo	Velocidad de carga cruzada antes de disparar la fuerza	2 mm/s
Velocidad de ensayo	Velocidad de carga cruzada durante la compresión	1 mm/s
Velocidad después del ensayo	Velocidad de carga cruzada después del ensayo	5 mm/s
Distancia	Distancia de compresión (p.e.j.: deformación de 25%)	2.5 mm
Tiempo de relajamiento	Tiempo para el relajamiento	180 s

### 2.5.5. Cálculos

1. Separe los datos en un ensayo de compresión y uno de relajamiento.
2. Elabore una gráfica de esfuerzo contra deformación para cada ensayo de compresión. ¿En qué difieren los quesos?
3. Localice la porción lineal inicial de la curva. Calcule el módulo elástico (esfuerzo/deformación) durante las primeras etapas de la compresión. Localice una porción lineal de la curva inmediatamente después de comenzar la prueba. Como alternativa, se podría trazar una línea arbitraria que conecte el origen con un punto; por ejemplo, deformación de 2%. Éste es el método de la secante para determinar el módulo.
4. Calcule el módulo de compresión (E) del material a lo largo de este intervalo. ¿Es este valor una propiedad material? ¿Cómo se comparan los módulos relativos de los tres quesos con los discernimientos subjetivos efectuados?
5. Para cada queso, determine el grado de relajamiento expresado como porcentaje del esfuerzo máximo. ¿Qué queso presenta el mayor relajamiento? ¿Qué dice esto acerca de los tres quesos?
6. Anote los resultados en la hoja de datos 2.2.

### 2.5.6. Prueba de doblado en tres puntos

En esta prueba, se comparan las propiedades de fractura de diferentes tipos de galletas como saladas y graham (galletas elaboradas con harina de trigo integral), etcétera.

1. Fije los aparejos de doblado de tres puntos al aparato TA-XT2. Mida el espacio entre las barras paralelas sobre la plataforma. Asegúrese de que el claro entre las dos barras del fondo sea suficiente para sostener todas las muestras y la hoja superior baje a la mitad de las barras del fondo.
2. calibre la fuerza y ajuste la perilla de seguridad como se hizo en la sección 2.5.4.
3. Seleccione el parámetro como se muestra en la tabla 2.2.
4. Mida con cuidado todas las dimensiones de cada galleta.
5. Coloque la muestra sobre el soporte de barra paralela directamente bajo la sonda; bájela hasta aproximadamente 3 mm por arriba de la muestra para asegurarse de que está centrada.
6. Efectúe la prueba y conserve los datos originales.

Tabla 2.2. Parámetros para la prueba de doblado en tres puntos

Parámetros	Descripción	Valores
Velocidad antes del ensayo	Velocidad de carga cruzada antes de disparar la fuerza	2 mm/s
Velocidad de ensayo	Velocidad de carga cruzada durante la compresión	1 mm/s
Velocidad después del ensayo	Velocidad de carga cruzada después del ensayo	5 mm/s
Distancia	Trayecto vertical	4.0 mm

### 2.5.6.1. Cálculos

1. *Punto de fractura.* Calcule el esfuerzo flexionante crítico y la deformación flexionante crítica en la fractura.
2. *Módulo inicial.* Escoja dos puntos en la porción recta inicial de la pendiente hacia arriba y utilice estos puntos para calcular el módulo flexionante.
3. Determine el módulo de tenacidad, esto es, el trabajo consumido por unidad de volumen hasta la deformación crítica.
4. Compare una gráfica de fuerza contra distancia y una de esfuerzo contra deformación. ¿En qué y por qué difieren?
5. Compare las diferentes muestras, y anote los resultados en la hoja de datos 2.3.

### 2.5.7. Prueba de extensibilidad

En esta prueba, se comparan la diferencia en extensibilidad entre tortillas de maíz y tortillas de harina de trigo. También es posible utilizar tortillas sin grasa, con poca grasa o comunes.

#### 2.5.7.1. Equipo y materiales

1. Fije la sonda cilíndrica redondeada de una pulgada al aparato TA-XT2. (*Nota:* esto es más de una prueba "de estiramiento". También podría hacerse una prueba de tensión ordinaria.)
2. Calibre la fuerza y ajustar la perilla de seguridad.
3. Fije los parámetros de prueba como se indica en la tabla 2.3.
4. Prepare una tortilla de harina de trigo y una de maíz.
5. Corte la tortilla en un cuadro de 4 pulgadas por lado.
6. Practique perforaciones en las esquinas.
7. Coloque la tortilla en los aparejos de doblado y asegúrelos a la estructura de manera apropiada con tornillos.
8. Coloque la muestra sobre la plataforma directamente debajo de la sonda. Baje ésta hasta alrededor de 3 mm por arriba de la muestra, para asegurarse de que esté centrada.
9. Efectúe la prueba y conserve los datos originales.

Tabla 2.3. Parámetros para la prueba de extensibilidad

Parámetros	Descripción	Valores
Velocidad antes del ensayo	Velocidad de carga cruzada antes de disparar la fuerza	2 mm/s
Velocidad de ensayo	Velocidad de carga cruzada durante la compresión	1 mm/s
Velocidad después del ensayo	Velocidad de carga cruzada después del ensayo	5 mm/s
Distancia	Trayectoria vertical (cerciorarse de que hay al menos 20 mm de espacio entre la muestra y la plataforma)	20.0 mm

**2.5.7.2. Cálculos**

1. Haga una gráfica de fuerza contra deformación con ambas tortillas en el mismo eje.
2. ¿Qué dice esto acerca de las tortillas? ¿Cuál es la más extensible?
3. ¿Dónde se hallan los puntos de ruptura? ¿Qué predicciones podrían hacerse acerca de la forma de la gráfica si las muestras estuvieran a temperaturas de refrigeración?
4. ¿Cómo afectarían las diferencias en el espesor de la muestra los resultados? Re-ñérase al ensayo de flexión para efectuar el análisis.
5. Registre los resultados en la hoja de datos 2.4.

(Nota: a causa de la geometría de esta prueba particular, no se presta para determinar propiedades materiales. Sin embargo, Morgenstein *et al.* [1996] presentan un análisis de ingeniería de tal prueba).

**2.5.8. Barrido de deformación****2.5.8.1. Prepare muestra**

1. Pese el gluten y el agua.
2. Mezcle hasta alcanzar uniformidad.
3. Extruya la mezcla haciéndola pasar a través de un elaborador de pasta 15 veces.
4. Permita que se hidrate 1 h.
5. Comprima la mezcla entre placas (2.5 mm) durante 1 h.
6. Corte una muestra con diámetro de 1 pulgada.
7. Corte la muestra de queso con las mismas dimensiones.

**2.5.8.2. Ajuste el montaje DMA**

1. Ajuste a barrido de deformación.
2. Ajuste la unidad de control de temperatura a 25°C.

**2.5.8.3. Efectúe la prueba**

1. Coloque la muestra en la placa inferior.
2. Baje la placa superior a un grosor de 2.5 mm.
3. Aplique aceite mineral a los lados de la muestra para reducir al mínimo la pérdida de humedad.
4. Inicie la prueba y guarde los datos originales.

**2.5.8.4. Cálculos**

1. Elabore una gráfica de  $G^*$  (módulo complejo) contra % de deformación.
2. Compare el queso y el gluten en términos de  $G^*$  y valores de deformación críticos. ¿Cómo se compara  $G^*$  con el módulo determinado mediante el TA-XT2. ¿Por qué razón podrían diferir?
3. Apunte los resultados en la hoja de datos 2.5.

### 2.5.9. Informe

El informe debe incluir una parte por separado para cada una de las pruebas: de compresión, de doblado en 3 puntos, de extensibilidad y de barrido de deformación. Cada parte debe incluir lo siguiente:

1. Las tablas de datos para cada prueba.
2. Los cálculos de los módulos de compresión y de flexión, así como los del esfuerzo y la deformación máximos de cada material.
3. *Prueba de compresión.* Compare los quesos. ¿Fue el orden de los módulos el que se predijo? ¿Qué indican los módulos relativos acerca de los tres tipos de quesos?
4. Compare el grado de relajamiento. ¿Qué dicen éstos acerca de los tres quesos? (Reflexione con cuidado acerca de lo que sucede en el queso durante el tiempo en que el relajamiento se está midiendo).
5. *Ensayo de flexión.* Compare los pedazos de tortilla o las galletas. ¿Alguna de estas mediciones de la prueba parece estar relacionada con juicios subjetivos? ¿Cuáles? ¿Cómo están relacionadas? ¿Se puede sugerir maneras de usar estos ensayos de flexión?
6. *Prueba de extensibilidad.* ¿Qué muestra es más extensible y por qué? ¿De qué manera es útil esta información? ¿Cómo se define extensibilidad en términos de fuerza y punto de ruptura?
7. Discuta si los resultados de las pruebas marcan diferencias entre las dos tortillas.
8. Discuta los resultados en términos de la composición de la muestra; por ejemplo, contenido de humedad, contenido de grasa, relación entre agua y proteína (quesos) y contenido de gluten para las tortillas.

### 2.5.10. Ejercicio adicional

1. Determine el efecto de la temperatura en las propiedades materiales de quesos y tortillas (por ejemplo: refrigere la muestra antes de la prueba).
2. Determine los efectos de la velocidad de carga cruzada en las propiedades materiales. Discuta esto en el contexto de la viscoelasticidad.

## 2.6. LECTURAS RECOMENDADAS Y REFERENCIAS

1. S. Timoshenko y G. H. MacCullough. *Elements of Strength of Materials*, 3ª edición. Nueva York: Van Nostrand.
2. S. L. Rosen. "Linear viscoelasticity". En *Fundamental Principle of Polymeric Materials*, 2ª edición. Nueva York: John Wiley & Sons, capítulo 18.
3. R. C. Progelhof y J. L. Throne. "Testing for design". En *Polymer Engineering Principles: Properties, Process Tests for Design*. Nueva York: Hansen Publishers, capítulo 6.
4. M. P. Morgenstern, M. P. Newberry y S. E. Holst. "Extensional properties of dough sheets". *Cereal Chemistry*. 73:478.
5. ASTM D638. Standard test method for tensile properties of plastics. American Society for Testing Materials, Philadelphia, Pennsylvania.

6. ASTM D790. Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. American Society for Testing Materials, Philadelphia, Pennsylvania.

**HOJA DE DATOS 2.1**

**Evaluación subjetiva de las clasificaciones de la textura de muestras de queso**

Queso	Esfuerzo relativo que se necesita para la misma deformación	Deformación relativa obtenida a partir del mismo esfuerzo	Módulo relativo

**HOJA DE DATOS 2.2. Prueba de compresión****Dimensiones de la muestra de prueba**

Material	Diámetro	Longitud	Área de la sección transversal	Volumen

**Resultados de prueba obtenidos en el ensayo de compresión utilizando el TA-XT2**

Material	Esfuerzo inicial (F/A)	Esfuerzo final (F/A)	% de relajamiento	Clasificación

**HOJA DE DATOS 2.3. Prueba de doblado en tres puntos**

**Parámetros de prueba TA-XT2**

Velocidad de carga cruzada	
Diámetro de la herramienta	
Distancia de soporte	

**Dimensiones de la muestra de prueba**

Material	Ancho	Espesor

**Resultados de la muestra de prueba**

Material	Módulo de flexión	Esfuerzo de fractura	Deformación de fractura

**HOJA DE DATOS 2.4. Prueba de extensibilidad**

**Parámetros de prueba en el TA-XT2 o el Instron**

Velocidad de carga cruzada	
Fuerza de escala completa	
Diámetro de la herramienta	

**Dimensiones de la muestra de prueba**

Material	Longitud	Espesor	Ancho

**Resultados de la prueba**

Material	Distancia de ruptura	Esfuerzo de ruptura (kPa)

**HOJA DE DATOS 2.5. Prueba DMA de deformación de barrido****Parámetros de prueba DMA**

Material de la muestra			
Frecuencia			
Diámetro de la placa			
Temperatura de la muestra			
Espesor de la muestra			

**Resultados de la prueba**

Material	Intervalo viscoelástico lineal	$G^*$ en la región lineal
Gluten		
Queso		

## REOLOGÍA DE ALIMENTOS LÍQUIDOS Y SEMISÓLIDOS

---

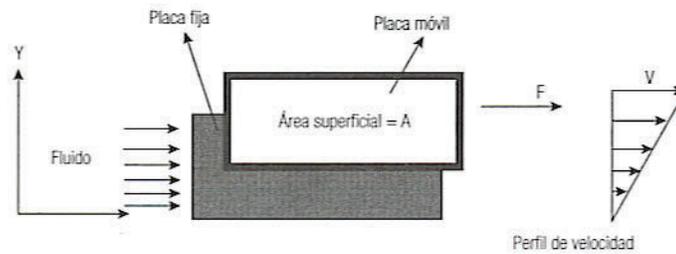
### 3.1. ANTECEDENTES

La reología tiene que ver con el estudio de la deformación y el flujo de la materia. Es una disciplina muy importante para el desarrollo, la manufactura y el procesamiento de alimentos y productos alimenticios. Los alimentos líquidos como leche, miel, jugos de fruta, bebidas y aceites vegetales presentan propiedades de flujo sencillas. Los productos más espesos como los aderezos cremosos para ensaladas, la salsa catsup y la mayonesa se comportan de manera más complicada. Los alimentos semisólidos como la crema de cacahuete y la margarina también se comportan como sólidos y como líquidos. La mayor parte de estos materiales alimenticios se transportan por medio de bombas en alguna etapa del procesamiento o el empaque, por lo que sus características de comportamiento de flujo son importantes para determinar la potencia que se necesita para el bombeo, el tamaño de la tubería y, además, de qué manera se relacionan con las propiedades sensoriales como la textura de los alimentos. El transporte de alimentos líquidos por medio de bombas está directamente relacionado con las propiedades de los líquidos, en particular, la densidad y la viscosidad.

El comportamiento de flujo también es importante para diseñar procesos y operaciones. Por ejemplo, es importante determinar si el tipo de flujo es turbulento o laminar en los intercambiadores de calor. Suponer que se trata de flujo newtoniano simple puede conducir a error al estimar el tiempo de retención y el diseño de algún otro equipo. Las propiedades reológicas también sirven como medio para controlar o monitorear un proceso. Por ejemplo, la viscosidad aparente de un alimento general disminuye durante la hidrólisis enzimática, en tanto que esta misma propiedad aumenta durante la desnaturalización de proteínas.

#### 3.1.1. Viscosidad

La viscosidad es una propiedad de los líquidos que describe la magnitud de la resistencia originada por fuerzas de corte en el líquido. Cuando se confina un fluido entre dos placas



**Figura 3.1.** Representación imaginaria de un fluido newtoniano que fluye entre una placa fija y una placa móvil ( $F$  = fuerza actuando sobre la placa,  $v$  = velocidad del fluido en movimiento).

paralelas de dimensiones infinitas, la influencia de la fuerza de corte se muestra en la figura 3.1. En este escenario, la placa inferior se mantiene fija y la fuerza  $F$  se aplica sobre la placa superior para producir una velocidad  $v$ . Esto resulta en un perfil de velocidad dentro del fluido. La velocidad cerca de la placa fija es cero, en tanto que el líquido cerca de la placa superior se estará moviendo a velocidad  $v$  en m/s.

La fuerza de corte  $F$  sobre el área de la placa  $A$  tendrá un esfuerzo cortante o de corte:

$$\tau = F/A \quad (\text{N/m}^2)$$

Como la distancia entre la placa es  $y$ , el gradiente de velocidad se describe como  $dv/dy$ . Este gradiente es una medida de la velocidad de deformación o de la velocidad de corte que se está aplicando al fluido.

### 3.1.2. Fluido newtoniano

Para un fluido newtoniano ideal, el esfuerzo cortante es una función lineal de la velocidad de corte, y la constante de proporcionalidad para la relación  $\mu$  se conoce como viscosidad dinámica:

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} \quad (3.1)$$

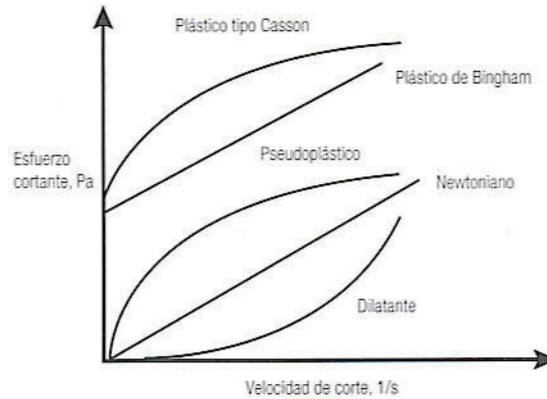
Muchos materiales alimenticios como leche, jugo de manzana, jugo de naranja, vino y cerveza tienen un comportamiento newtoniano. En el caso de los fluidos newtonianos, la viscosidad se determina aplicando una sola velocidad de corte y midiendo el esfuerzo cortante correspondiente. Pero para ser preciso, siempre se debe estimar a varias velocidades de corte. La unidad de viscosidad es  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ , que es  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ , mientras que en el sistema c.g.s., es  $\text{dina} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ , que también se conoce como poise.

$$1 \text{ P} = 100 \text{ centipoises (cP)}, \quad 1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad \text{o} \quad 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

Los seres humanos son capaces de detectar diferencias de viscosidad tan bajas como 1 cP.

### 3.1.3. Fluido no newtoniano

Para la mayoría de los productos agrícolas, lo que incluye productos alimenticios como crema, azúcar, jarabe, miel y aderezo para ensalada, el cociente entre esfuerzo cortante y velocidad de corte no es lineal y estos fluidos se conocen como no newtonianos. Algunos de estos materiales tienen un esfuerzo de cedencia que debe alcanzarse antes de que co-



**Figura 3.2.** Esfuerzo cortante contra velocidad de corte para fluidos newtoniano, pseudoplástico (adelgazamiento al corte), dilatante (espesamiento al corte), plástico de Bingham y plástico tipo Casson.

mience el flujo lineal. Éstos se conocen como fluidos de Bingham de tipo plástico, los ejemplos incluyen salsa catsup, pasta de tomate, etcétera.

- En fluidos **no newtonianos**, el cociente entre esfuerzo cortante y velocidad de corte cambiará con la velocidad de corte y a este cociente a una determinada velocidad de corte se le llama **viscosidad aparente**.
- El comportamiento más común es el **pseudoplástico** o **adelgazamiento al corte**, en el que la curva de esfuerzo cortante contra velocidad de corte es convexa con respecto al eje de esfuerzo cortante como se indica en la figura 3.2. Estos tipos de materiales muestran una disminución de la viscosidad con el corte y los ejemplos incluyen aderezos para ensaladas, crema de cacahuete, etcétera. La viscosidad de algunos alimentos comunes aparece en la tabla 3.1.
- En el caso de los **fluidos dilatantes** o **espesantes al corte**, la curva de esfuerzo cortante contra velocidad de corte es cóncava con respecto al eje del esfuerzo cortante. Estos fluidos se hacen más espesos y la viscosidad aumenta con el corte. Algunas suspensiones de almidón caen en esta categoría.
- Si el fluido tiene una curva de esfuerzo de cedencia y esfuerzo cortante contra velocidad de corte convexa respecto al eje de corte, entonces el fluido se conoce como **plástico tipo Casson**.

**Tabla 3.1.** Valores de viscosidad de algunos productos alimenticios newtonianos

Producto	Temperatura °C	Viscosidad (mPa·s)
Agua	0	1.8
Agua	20	1.0
Agua	45	0.6
Leche, homogeneizada	20	2.0
Leche, homogeneizada	40	1.1
Jarabe de maíz (48% sólidos)	27	5.3
Crema (10% grasa)	40	1.5
Miel	27	4.8
Jugo de manzana (20° brix)	27	2.1
Aceite de maíz	25	5.7
Aceite de cacahuete	25	6.6
Aceite de soya	30	4.1

### 3.1.4. Modelos reológicos

**3.1.4.1. Modelo de la ley de la potencia.** Muchos modelos reológicos se utilizan para describir las propiedades de los materiales durante el flujo y la deformación. En la mayoría de los casos, las curvas de esfuerzo cortante o de corte ( $\tau$ ) contra velocidad de corte ( $dv/dy$ ) para materiales pseudoplásticos y dilatantes se describen utilizando un modelo de ley de la potencia simple como el que se muestra en la ecuación 3.2:

$$\tau = m \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad (3.2)$$

En la ecuación 3.2,  $m$  se conoce comúnmente como **coeficiente de consistencia** con unidades  $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$  y  $n$  se conoce como **índice de comportamiento de flujo**, que carece de unidades. El **fluido newtoniano** es un caso particular de este modelo, donde  $n = 1$  y  $m$  es la viscosidad dinámica. Si  $n < 1$ , el fluido es pseudoplástico, si  $n > 1$ , es dilatante.

**3.1.4.2. Modelo de Herschel-Bulkley.** En este modelo (ecuación 3.3), se ha añadido el término esfuerzo de cedencia ( $\tau_0$ ) para describir el comportamiento plástico y el plástico tipo Casson.

$$\tau = m \left( \frac{dv}{dy} \right)^n + \tau_0 \quad (3.3)$$

Algunas propiedades del comportamiento de flujo de alimentos que siguen el modelo de Herschel-Bulkley se enumeran en la tabla 3.2.

**3.1.4.3. Modelo de Casson.** En este modelo (ecuación 3.4), la curva de esfuerzo cortante contra velocidad de corte puede transformarse en una línea recta elaborando una gráfica de la raíz cuadrada del esfuerzo cortante contra la raíz cuadrada de la velocidad de corte. El chocolate es un ejemplo notable de este tipo de fluido:

$$\tau^{1/2} = m \left( \frac{dv}{dy} \right)^{1/2} + \tau_0^{1/2} \quad (3.4)$$

**Tabla 3.2. Valores de coeficiente de consistencia ( $m$ ), índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) y esfuerzo de cedencia ( $\tau_0$ ) para algunos alimentos**

Producto (Pa)	Temperatura (°C)	Velocidad de corte, 1/s	$m(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	$n$	$\tau_0$
Salsa catsup	25	10-560	18.7	0.27	32
Salsa de manzana	20	3.3-530	16.7	0.30	0
Puré de plátano (17.7 brix)	23.8	28-200	6.08	0.43	0
Mayonesa	25	30-1,300	6.4	0.55	0
Concentrado de jugo de tomate (25% sólidos)	32.2	500-800	12.9	0.41	0
Relleno de blueberry para tarta	20	3.3-530	6.1	0.43	0
Chocolate, fundido	46	—	0.57	0.57	1.16
Mostaza	25	30-1,300	19.1	0.39	0
Puré de durazno (20% sólidos)	26.6	80-1,000	13.4	0.4	0
Carne molida (15% grasa)	15	300-500	693.3	0.16	1.53
Concentrado de jugo de naranja (42.5° brix)	25	0-500	4.121	0.58	0

**3.1.5. Temperatura de los fluidos y viscosidad**

La viscosidad de los fluidos disminuye con un aumento de la temperatura. Para algunos jugos de frutas, el efecto de la temperatura se describe utilizando una relación de tipo Arrhenius como se indica en la ecuación 3.5:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \tag{3.5}$$

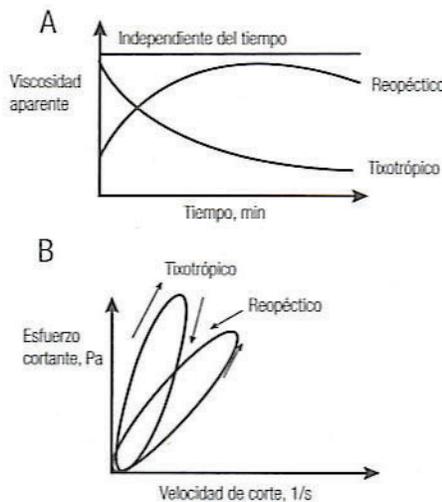
donde  $\mu$  es la viscosidad,  $\mu_0$  la viscosidad a la temperatura de referencia.  $E_a$  la energía de activación,  $T$  la temperatura absoluta y  $R$  la constante de los gases. Puede utilizarse una gráfica entre  $\log \mu$  contra  $1/T$ , el recíproco de la temperatura absoluta, para determinar los valores de  $\mu_0$  y la energía de activación  $E_a$ .

**3.1.6. Viscosidad dependiente del tiempo**

En algunos casos, la viscosidad aparente de los fluidos cambia con el tiempo, ya que el fluido está sometiendo a corte continuamente. Si la viscosidad aparente disminuye con el tiempo, el fluido se llama tixotrópico, y si aumenta con el tiempo, se llama reopéctico como se ilustra en la figura 3.3. Si el esfuerzo cortante se mide en función de la velocidad de corte, y si primero aumenta la velocidad de corte y luego disminuye, se presentará la histéresis en las curvas de esfuerzo cortante contra velocidad de corte.

**3.1.6.1. Tixotrópico.** En el caso de los alimentos tixotrópicos, la estructura material se rompe conforme continúa la acción cortante. Este tipo de material alimenticio incluye gelatina, crema, manteca vegetal y aderezos para ensaladas, etcétera.

**3.1.6.2. Reopéctico.** En el caso de los fluidos reopécticos, la estructura se fortalece conforme el corte continúa. Este tipo de comportamiento no es común en el sistema de alimentos, pero se presenta en una solución de almidón muy concentrada por periodos largos.



**Figura 3.3.** Comportamiento de fluidos dependientes del tiempo (A, viscosidad aparente en función del tiempo; B, esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte).

### 3.2. MEDICIÓN DE LA VISCOSIDAD

Para llevar a cabo una medición reológica se impone un esfuerzo bien definido y se mide la deformación o el corte resultantes o viceversa. Las geometrías experimentales más comúnmente utilizadas para lograr un flujo de corte constante son:

1. Viscómetro de tubo capilar
2. Viscómetro de rotación
  - Tipo Searle
  - Tipo Couette

El uso de reómetros de espacio angosto, como un cono y una placa, se limita a velocidades de corte relativamente pequeñas. A velocidades de corte altas, los efectos finales provenientes de la inercia de la muestra hacen que la medición no sea válida. Los efectos de orilla y extremo resultan principalmente de las dimensiones finitas del sistema, la forma de la superficie libre, la tensión superficial relacionada y la fractura de las muestras.

#### 3.2.1. Viscómetro capilar

En un viscosómetro de tubo capilar, la medición de la viscosidad se basa en la fuerza de presión que es suficiente para superar la fuerza de corte dentro del líquido y que produce flujo de líquido a una velocidad dada. Considerar un pequeño viscosómetro capilar de longitud  $L$  y radio interno  $r$  como se muestra en la figura 3.4 para medir la viscosidad del líquido. Las fuerzas de corte están operando en todas las superficies líquidas internas para toda la longitud  $L$  y la distancia  $r$  desde el centro del tubo. El esfuerzo cortante,  $\tau$ , fuerza  $F$  por unidad de área, puede calcularse como

$$\tau = \frac{F}{2\pi rL} \quad (3.6)$$

y la caída de presión  $\Delta P$  a través del capilar está dada por

$$\Delta P = \frac{F}{\pi r^2} \quad (3.7)$$

Sustituyendo el valor  $F$  a partir de la ecuación 3.7 en la ecuación 3.6 da

$$\tau = \frac{\Delta P(\pi r^2)}{2\pi rL} = \frac{\Delta P r}{2L} \quad (3.8)$$

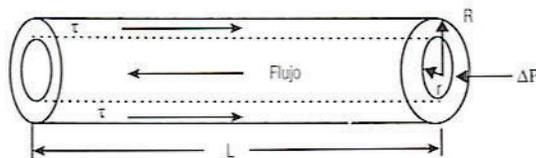


Figura 3.4. Diagrama que muestra el equilibrio entre esfuerzo cortante  $\tau$  y presión  $P$  de una sección del tubo capilar para medir la viscosidad.

De acuerdo con la ecuación 3.8, el esfuerzo cortante  $\tau$  aumentará desde un valor de 0 en el centro del tubo a  $\Delta PR/2L$  en la pared del tubo. Sustituyendo el valor del esfuerzo cortante  $\tau$  en esfuerzo cortante y velocidad de corte en la viscosidad newtoniana (ecuación 3.1), se obtiene

$$\frac{\Delta P r}{2L} = -\mu \frac{dv}{dr} \quad (3.9)$$

Rearreglando la ecuación 3.9 e integrando a partir de la pared del tubo en el radio  $R$ , donde  $v = 0$  a cualquier sitio  $r$  dentro del perfil de velocidad  $v$ , se obtiene

$$\int_0^v dv = -\frac{\Delta P}{2\mu L} \int_R^r r dr \quad (3.10)$$

Por tanto, la velocidad puede expresarse como

$$v = -\frac{\Delta P}{4\mu L} (R^2 - r^2) \quad (3.11)$$

El perfil de velocidad de un líquido con viscosidad  $\mu$  puede ser expresado por la ecuación 3.11 en el sitio  $r$ , cuando se aplica una presión  $\Delta P$  a través de una longitud del tubo capilar  $L$ .

Considerando un área de sección transversal de un cascarón circular dentro del tubo como

$$dA = 2\pi r dr \quad (3.12)$$

Entonces, el volumen del líquido que fluye dentro del cascarón se calcula multiplicando el área transversal (ecuación 3.12) por la velocidad:

$$d\dot{V} = (2\pi r dr)(v) \quad (3.13)$$

Integrando la ecuación 3.13 desde el centro del tubo con  $r = 0$  a la pared del tubo  $r = R$  y rearreglando, se obtiene la ecuación 3.14, que también se conoce como la ecuación clásica de Hagen-Poiseuille:

$$\mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8L\dot{V}} \quad (3.14)$$

donde  $R$  = radio interno del tubo y  $\dot{V}$  = gasto volumétrico.

Ya que se trata de un líquido newtoniano, cualquier combinación de gasto-presión dará la misma viscosidad:

$$\Delta P = \frac{\rho V g}{A} = \rho h g = \frac{N}{m^2} = \text{Pa} \quad (3.15)$$

Sustituyendo el valor de  $\Delta P$  en la ecuación 3.14 y midiendo el tiempo  $t$  durante el flujo de un fluido de volumen constante  $V$ , la viscosidad se determina a partir de la siguiente ecuación para un líquido de densidad conocida  $\rho$  como se muestra:

$$\mu = \left( \frac{\pi \rho g h R^4}{8LV} \right) t \quad (3.16)$$

La viscosidad cinemática ( $\nu = \mu / \rho$ ) se calcula fácilmente a partir de un viscosímetro de tubo capilar como el de tipo Cannon-Fenske (figura 3.5) midiendo el tiempo  $t$  para drenar el líquido entre dos marcas grabadas en los bulbos del tubo capilar. La razón del depósito debe ser mayor que 10, de modo que la caída de presión debida al flujo en el depósito pueda ser pasada por alto. Así, todos los términos dentro de los paréntesis de la ecuación 3.16 son constante para un viscosímetro capilar y, por tanto, la viscosidad cinemática se determina como

$$\nu = c \cdot t \quad (3.17)$$

La viscosidad cinemática se mide en Stokes. 1 Stoke = 100 cS =  $\text{cm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . 1 cS =  $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ . La viscosidad cinemática tiene la misma unidad de medida que el coeficiente de difusión. Por tanto, también se le conoce como difusividad de *momentum* (cantidad de movimiento) y es una función de las propiedades moleculares del fluido en flujo turbulento.

La constante del viscosímetro capilar  $c$  puede determinarse con facilidad obteniendo los valores necesarios o midiendo el tiempo de descarga de un fluido de viscosidad cinemática conocida. Una vez que se conoce la constante del viscosímetro  $c$ , la viscosidad cinemática del fluido de prueba se estima fácilmente.

*Ejemplo.* Se utiliza un viscosímetro de tubo capilar para medir la viscosidad de la miel a  $30^\circ\text{C}$ . El radio del tubo es 2.5 cm y la longitud 25 cm. Una presión de 10 Pa da un

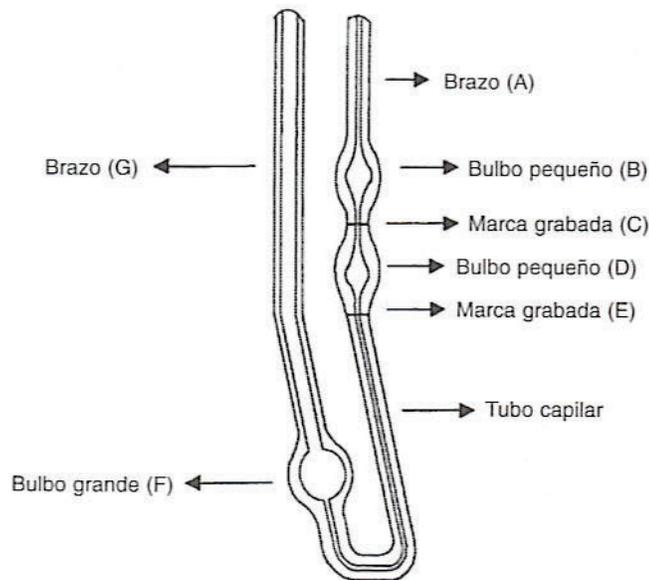


Figura 3.5. Viscosímetro capilar tipo Cannon-Fenske.

gasto de  $1.25 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Calcule la viscosidad de la miel. Se proporcionan  $R = 2.5 \text{ cm}$  o  $0.025 \text{ m}$ ;  $L = 25 \text{ cm}$  o  $0.25 \text{ m}$ ;  $V = 1.25 \text{ cm}^3/\text{s}$  o  $1.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , y  $\Delta P = 10 \text{ Pa}$ .

**Solución.** La sustitución de los valores dados en la ecuación 3.14 da una viscosidad de

$$\mu = \frac{3.1416 \times 10(0.025)^4}{8 \times 0.25 \times 1.25 \times 10^{-6}} = 4.909 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

### 3.2.2. Viscómetro de rotación

Los parámetros reológicos del fluido de prueba no newtoniano se calculan a partir de los datos de la relación entre esfuerzo cortante y velocidad de corte generados con un viscosímetro de cilindros coaxiales, como los viscosímetros Brookfield LV, RV o DV o el Haake Rotovisco serie RV. En semejante tipo de viscosímetro, un huso o sensor gira en un fluido de prueba y mide el torque necesario para vencer la resistencia viscosa. El grado de torcimiento del resorte lo detecta un transductor rotatorio, el cual es proporcional a la viscosidad del fluido de prueba.

En un viscosímetro cilíndrico coaxial de rotación, el líquido se coloca en el espacio entre los cilindros interior y exterior. La medición supone registrar el torque  $T$  que se requiere para hacer girar el cilindro interno o el externo a determinadas revoluciones por unidad de tiempo. Como el torque  $T = F \cdot r$ ,  $F = \tau \cdot A$  ( $A = 2\pi rL$ ), donde  $L$  es la longitud del cilindro y  $r$  la posición radial entre el cilindro interno y el cilindro externo. Por tanto,

$$T = 2\pi r^2 L \tau \quad (3.17)$$

o el esfuerzo cortante es

$$\tau = \frac{T}{2\pi L r^2} \quad (3.18)$$

La velocidad de corte  $\gamma$  para un sistema giratorio es una función de la velocidad angular  $\omega$  ( $2\pi \text{ N}$ ):

$$\gamma = r \cdot \frac{d\omega}{dr} \quad (3.19)$$

Con la sustitución de los valores del esfuerzo cortante y de la velocidad de corte a partir de las ecuaciones 3.18 y 3.19 en la ecuación 3.1, se obtiene la relación de viscosidad

$$\frac{T}{2\pi \mu r^2 L} = r \frac{d\omega}{dr} \quad (3.20)$$

Además, para determinar la velocidad angular entre el cilindro interno y el cilindro externo, se emplea la integración como

$$\int_0^{\omega_i} d\omega = - \frac{T}{2\pi \mu L} \int_{R_0}^{R_i} r^{-3} dr \quad (3.21)$$

Utilizando las condiciones frontera, en el radio del cilindro externo  $R_0$ , la velocidad angular  $\omega = 0$ , y en el cilindro interno  $r$ ,  $\omega = \omega_i$  ( $\omega = 2\pi N$ ), la integración conduce a la ecuación 3.22 para determinar la viscosidad como se muestra:

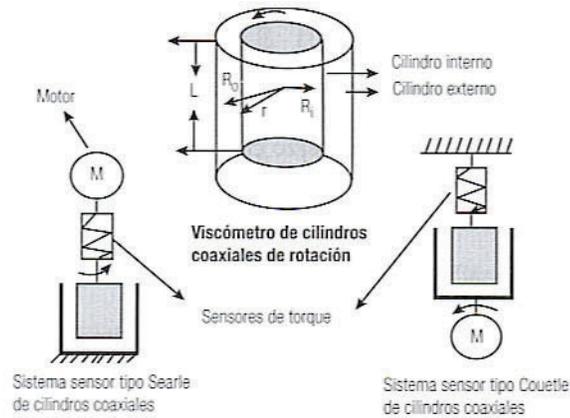
$$\mu = \frac{T}{8\pi^2NL} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \quad (3.22)$$

En un viscosímetro de un solo cilindro, el radio del cilindro externo  $R_0$  se aproxima al infinito y, por consiguiente, puede omitirse el último término de la ecuación 3.22. Muchos viscosímetros rotatorios de un solo cilindro operan suponiendo que la pared del recipiente que contiene el fluido no tiene efecto sobre el esfuerzo cortante dentro del líquido. Sin embargo, esta suposición podría no ser siempre válida para los fluidos no newtonianos y, en consecuencia, debe evaluarse con cuidado.

**3.2.2.1. Sistema de cilindros coaxiales tipo Searle.** En este tipo de viscosímetro rotatorio, el cilindro interno llamado rotor gira a una velocidad definida y el cilindro exterior llamado vaso se mantiene constante (figura 3.6). El cilindro rotatorio interno fuerza al líquido en el espacio anular a fluir, lo que le ofrece resistencia según sus características de viscosidad. Un elemento sensible al torque colocado entre el motor impulsor y la flecha del cilindro interno proporciona una medida directa de la viscosidad de la muestra. La mayoría de los viscosímetros de rotación se basan en este principio de operación. Sin embargo, estos tipos de viscosímetros presentan limitaciones cuando se van a medir muestras de baja viscosidad, ya que la fuerza centrífuga desvía el flujo de líquido desde una región de flujo laminar a una de flujo turbulento, afectando de esta manera la medición de la viscosidad.

**3.2.2.2. Sistema de cilindros coaxiales tipo Couette.** En este tipo de viscosímetro de rotación, el cilindro exterior gira a una velocidad definida y fuerza a fluir a la muestra que se encuentra en el espacio anular. La resistencia del líquido por cortar transmite un torque relacionado con la velocidad sobre el cilindro interno el cual será detectado por un sensor de torque adherido a éste. Se mide calculando qué torque contractuante se requiere para mantener el cilindro interno inmóvil.

*Ejemplo.* Un viscosímetro rotatorio de un solo cilindro con un radio de 2 cm y 5 cm de largo se está utilizando para medir la viscosidad de un líquido. A 6, 9 y 12 rpm,



**Figura 3.6.** Ilustración esquemática de un viscosímetro de rotación de cilindros coaxiales (tipos Searle y Couette).

se obtienen lecturas de torque de 2.3, 3.7 y  $5.0 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{cm}$ . Calcule la viscosidad del líquido. Se proporcionan  $R = 2 \text{ cm}$  o  $0.02 \text{ m}$ ;  $L = 5 \text{ cm}$  o  $0.05 \text{ cm}$ ;  $N_1 = 6 \text{ rpm}$  o  $0.1 \text{ rps}$ ;  $N_2 = 9 \text{ rpm}$  o  $0.15 \text{ rps}$ ;  $N_3 = 12 \text{ rpm}$  o  $0.2 \text{ rps}$ ;  $T_1 = 2.3 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{cm}$  o  $2.3 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$ ;  $T_2 = 3.7 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ ;  $T_3 = 5.0 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{cm}$  o  $5.0 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$ .

**Solución.** Sustituya los valores dados para la primera serie de datos en la ecuación 3.14:

$$\mu_1 = \frac{2.3 \times 10^{-5}}{8 \times (3.1416)^2 \times 0.1 \times 0.05} = 5.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

De manera similar para la segunda serie de datos,  $\mu_2 = 6.25 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  y la tercera serie de datos,  $\mu_3 = 6.33 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

$$\text{Viscosidad promedio } (\mu_{\text{prom}}) = 6.14 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

### 3.3. EJERCICIOS DE LABORATORIO

#### 3.3.1. Objetivos

Los objetivos de esta práctica de laboratorio son:

- Determinar la viscosidad newtoniana de un fluido de prueba utilizando un viscosímetro capilar.
- Determinar las curvas de comportamiento de flujo de materiales alimenticios tipo newtonianos, pseudoplásticos y dilatantes utilizando un viscosímetro de cilindros coaxiales.
- Determinar el efecto de la temperatura en la viscosidad aparente de material alimenticio newtoniano.

#### 3.3.2. Materiales y métodos

##### 3.3.2.1. Medición de la viscosidad de un fluido newtoniano

1. Un viscosímetro capilar como el Cannon-Fenske, de tamaño 100 (intervalo de viscosidad cinemática de 2 a 10 cS) o 150 (intervalo de viscosidad cinemática de 6 a 30 cS).
2. Baño de agua a temperatura constante.
3. Termómetro
4. Perilla succionadora de hule.
5. Cronómetro
6. Probeta graduada de 100 ml
7. Matraz volumétrico de 100 ml.
8. Matraz picnómetro
9. Agua destilada, acetona y tricloroetileno.
10. Estándares de viscosidad: aceites de silicón, agua.
11. Fluidos de prueba: jugo de manzana, leche, agua, bebidas no carbonatadas, etcétera.

**3.3.2.1.1. Procedimiento**

1. Mida con la probeta graduada 10 ml del fluido de prueba.
2. Coloque la perilla de succión en el brazo *G* del viscosímetro (figura 3.5). Invierta el viscosímetro e introduzca el brazo *A* en el fluido de prueba: Aplique succión hasta que el nivel del líquido alcance la marca grabada *E*. Regrese el viscosímetro a la posición original.
3. Introduzca el viscosímetro en el baño de agua a la temperatura deseada y deje que la temperatura se equilibre. Registre la temperatura.
4. Registre el tiempo de descarga *t* para que el fluido de prueba drene entre las marcas *C* y *E* presionando el bulbo de succión.
5. Repita la medición aplicando succión al brazo *A* para llevar el nivel del fluido de prueba por arriba de la marca *C*.
6. Enjuague el viscosímetro completamente, primero con agua destilada y luego con acetona. Seque el viscosímetro por completo antes de volverlo a usar.
7. Siga los pasos 1 a 5 anteriores para cada fluido de prueba y cada estándar de viscosidad.
8. Limpie el viscosímetro después de cada solución estándar, primero con tricloroetileno y luego con acetona. Seque con aire.
9. Determine las densidades de cada fluido de prueba vaciándolos en picnómetros tarados de 25 ml y pesando con precisión.
10. Determine la constante del viscosímetro capilar *C* utilizando datos estándar de viscosidad como los obtenidos midiendo el tiempo de descarga para un fluido de viscosidad cinemática conocida, como sigue:

$$c = v_{\text{conocida}}/t_{\text{conocida}} \quad (3.23)$$

11. Calcule la viscosidad cinemática del fluido de prueba utilizando la constante del viscosímetro y los datos del tiempo de eflujo.
12. Registre los datos en la hoja de datos 3.1.

**3.3.2.2. Medición de la viscosidad de alimentos no newtonianos**

1. Viscosímetro Brookfield: modelo LV, RV o DV.
2. Baño de agua a temperatura constante.
3. Termómetro.
4. Cuatro vasos de precipitados de 600 ml de capacidad.
5. Fluidos de prueba sugeridos: tipo pseudoplásticos, como puré de plátano, pasta de tomate, aderezo francés y mayonesa; tipo dilatante, como solución 50-55% de almidón de maíz en agua.

**3.3.2.2.1. Procedimiento para el viscosímetro de rotación**

1. Vierta alrededor de 500 ml del fluido de prueba en un vaso de precipitados de 600 ml y colóquelo en un baño de agua a la temperatura controlada deseada. Registre la temperatura del producto.
2. Presione el botón de cero automático cada vez que se conecta la fuente de poder.
3. Con cuidado fije un huso apropiado a la flecha del viscosímetro, evitando empujar hacia los lados.
4. Introduzca el número de huso presionando la tecla de acceso de número de huso.
5. Nivele el viscosímetro utilizando los tornillos de la base y el nivel de burbuja.

6. Inserte el huso en el fluido de prueba hasta la muesca de inmersión marcada en la flecha del huso.
7. Escoja la velocidad deseada del huso con la perilla de control de velocidad.
8. Calcule la constante del multiplicador del huso (SMC) y la constante de la velocidad de corte (SRC) a partir de las siguientes ecuaciones y utilizando los datos de la constante de torque (TK) del viscosímetro dados para cada modelo particular:

$$SMC = \frac{\text{Viscosidad de toda la escala} \times \text{rpm}}{TK \times 10\,000} \quad (3.24)$$

$$SRC = \frac{\text{Velocidad de corte}}{\text{rpm}} \quad (3.25)$$

9. Introduzca los valores de SRC y SMC.
10. Introduzca el huso del viscosímetro en el fluido de prueba y registre los datos de esfuerzo cortante a varias velocidades o velocidades de corte del huso.
11. Disponga la pantalla del viscosímetro para medir directamente la velocidad y registre los datos de viscosidad a varias velocidades de corte.
12. Registre los datos de cada producto en la hoja de datos 3.2.

**3.2.2.2. Efecto de la temperatura en la viscosidad del producto.** Para determinar el efecto de la temperatura en la viscosidad del producto de prueba, obtenga los datos de esfuerzo cortante y velocidad de corte a dos temperaturas más, como 40°C y 55°C, utilizando el viscosímetro de rotación. Siga el mismo procedimiento anterior para completar el experimento. Obtenga datos experimentales a varias velocidades de corte a fin de trazar las gráficas para tres distintas temperaturas. Registre los datos en la hoja de datos 3.3.

### 3.3.3. Resultados y discusión

1. Dé a conocer la constante del viscosímetro capilar  $c$  utilizando el tiempo de efusión de la solución estándar.
2. Calcule la viscosidad cinemática y la viscosidad dinámica del fluido newtoniano utilizando la constante de viscosímetro  $c$  y los datos de tiempo de descargas.
3. Trace las curvas de esfuerzo cortante y velocidad de corte para los datos de los fluidos de prueba newtonianos, pseudoplásticos y dilatantes obtenidos con el viscosímetro de cilindros coaxiales, es decir, el tipo Brookfield DV. ¿Indican estas curvas el comportamiento deseado característico de los fluidos de prueba? Si no es así, ¿por qué se desvían de su comportamiento característico?
4. Elabore las curvas de log de esfuerzo cortante contra log de velocidad de corte para los anteriores fluidos de prueba y calcule sus parámetros de la ley de la potencia como el índice de consistencia  $m$  y el índice de comportamiento de flujo  $n$  a partir los valores de la intersección y de la pendiente. Anote la ecuación específica de ley de la potencia para cada fluido.
5. Determine la viscosidad de un fluido de prueba newtoniano a tres temperaturas distintas y calcule la constante de Arrhenius  $A$  y la energía de activación  $E_a$  trazando la gráfica de  $\log \mu$  contra  $1/T$ .
6. Compare los datos de viscosidad, los valores del índice de consistencia  $m$ , y el valor del índice de comportamiento de flujo  $n$  de los fluidos de prueba a partir de los datos disponibles en la literatura y discuta los resultados como corresponde.

### 3.4. LECTURAS RECOMENDADAS Y REFERENCIAS

1. P. Singh y D. R. Heldman. "Transport of liquid foods". En *Introduction to Food Engineering*, Orlando, Florida: Academic Press.
2. D. R. Heldman y R. P. Singh. "Rheology of processed foods". En *Food Process Engineering*. Westport, Connecticut: AVI Publishing Co.
3. J. F. Kokini. "Rheological properties of foods". En *Handbook of Food Engineering* (D. R. Heldman y D. B. Lund, compiladores). Nueva York: Marcel Dekker.
4. J. R. Van Wazer, J. W. Lyons, K. Y. Kim y R. E. Colwell. *Viscosity and Flow Measurement*, Nueva York: Interscience Publishers.
5. J. F. Steffe, I. O. Mohamed y E. W. Ford. "Rheological properties of fluid foods". En *Physical and Chemical Properties of Food* (M. R. Okos, ed.), St. Joseph, Michigan: ASAE.
6. G. Schramm. *Introduction to Practical Viscometry*, Dieselstrasse, Alemania: Haake Buchler Instruments Inc.

## HOJA DE DATOS 3.1

Fecha: \_\_\_\_\_

Tipo de viscosímetro capilar: \_\_\_\_\_

Especificaciones del producto: \_\_\_\_\_

**Datos del viscosímetro de tubo capilar para fluidos de prueba newtonianos**

Producto	Densidad (g/ml)	Viscosidad (cP)	Tiempo de descarga (s)
Estándar			1.
			2.
			3.
Producto 1			1.
			2.
			3.
Producto 2			1.
			2.
			3.
Producto 3			1.
			2.
			3.

**HOJA DE DATOS 3.2**

Fecha: \_\_\_\_\_

Tipo de viscosímetro: \_\_\_\_\_

Fabricante del viscosímetro: \_\_\_\_\_

Huso núm.: \_\_\_\_\_

Especificaciones del producto: \_\_\_\_\_

**Datos del viscosímetro de rotación para fluidos de prueba pseudoplásticos y dilatantes a 25°C**

Producto	Velocidad (rpm)	Velocidad de corte (1/s)	Esfuerzo cortante (Pa)	Viscosidad (cP)
Pseudoplástico				
Dilatante				

**HOJA DE DATOS 3.3**

Fecha: \_\_\_\_\_

Tipo de viscosímetro: \_\_\_\_\_

Fabricante del viscosímetro: \_\_\_\_\_

Huso núm.: \_\_\_\_\_

Especificaciones del producto: \_\_\_\_\_

**Datos del viscosímetro de rotación para fluidos de prueba newtonianos a distintas temperaturas**

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	Velocidad de corte (1/s)	Esfuerzo cortante (Pa)	Viscosidad (cP)
25				
25				
25				
25				
40				
40				
40				
40				
55				
55				
55				
55				