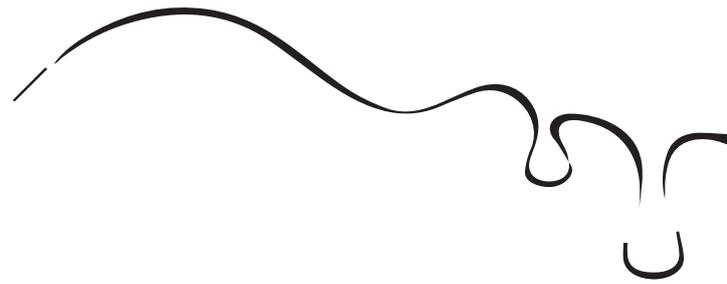




Savez
editorial



Reología y viscosidad de alimentos



William Rolando Miranda-Zamora
Diana Lastenia Espinoza Valdiviezo
Manuel Jesús Sánchez Chero
Hans Himbler Minchán Velayarce
Juan Antonio Ticona Yujra
Juan de Dios Mendoza Seclén
José Arturo Rodríguez Kong



Reología y viscosidad de alimentos

Reología y viscosidad de alimentos

William Rolando Miranda–Zamora
Diana Lastenia Espinoza Valdiviezo
Manuel Jesús Sánchez Chero
Hans Himbler Minchán Velayarce
Juan Antonio Ticona Yujra
Juan de Dios Mendoza Seclén
José Arturo Rodríguez Kong



Título: Reología y viscosidad de alimentos

Autores:

William Rolando Miranda–Zamora
Diana Lastenia Espinoza Valdiviezo
Manuel Jesús Sánchez Chero
Hans Himbler Minchán Velayarce
Juan Antonio Ticona Yujra
Juan de Dios Mendoza Seclén
José Arturo Rodríguez Kong

Autor – Editor:

Manuel Jesús Sánchez Chero
Mza I Lote 19 Urb. Fremín Avila Morón – Pimentel
Chiclayo – Lambayeque - Perú

1a. Edición Digital – Septiembre 2021
Hecho el depósito legal en la
Biblioteca Nacional del Perú N° 2021-10725

ISBN:978-9942-8957-5-2

Obra revisada previamente por la modalidad doble par ciego, en caso de requerir información sobre el proceso comunicarse al correo electrónico editor@savezeditorial.com

Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros), sin la previa autorización por escrito del titular de los derechos de autor, bajo las sanciones establecidas por la ley. El contenido de esta publicación puede ser reproducido citando la fuente.

El trabajo publicado expresa exclusivamente la opinión de los autores, de manera que no compromete el pensamiento ni la responsabilidad del Savez editorial

Prefacio

Este trabajo está pensado principalmente como una introducción al campo para estudiantes de pregrado e investigadores de la viscosidad y consistencia correspondientes al área de la reología de los alimentos. También puede contener algunos ejemplos que serían de interés para los estudiantes e investigadores, mientras que los profesionales de la industria alimentaria pueden obtener información importante que los ayudaría a resolver problemas prácticos para sus procesos. El trabajo consta de cuatro capítulos, que cubren el cálculo de los esfuerzos y deformaciones en alimentos, así como también cubre el cálculo de los perfiles de velocidad. Los cálculos están suficientemente detallados como para permitir al lector realizar estos cálculos con confianza y obtener un entendimiento y comprensión completa de los supuestos involucrados en los ejemplos planteados, para que el lector pueda tener una idea de los procedimientos. En reología la viscosidad es una medida muy importante que determina la calidad de los alimentos que se expenden en el comercio. Este resumen revisa y describe los principales cálculos disponibles en reología de alimentos en cuanto a la viscosidad.

William Rolando Miranda–Zamora
Diana Lastenia Espinoza Valdiviezo
Manuel Jesús Sánchez Chero
Hans Himbler Minchán Velayarce
Juan Antonio Ticona Yujra
Juan de Dios Mendoza Seclén
José Arturo Rodríguez Kong

Contenido

Prefacio.....	3
Reología de los alimentos:	5
Esfuerzos	5
1.1. Introducción	5
1.2. Conceptos básicos	6
1.2.1. Fuerza	6
1.2.2. Esfuerzo	7
1.3. Ejemplos de esfuerzos en alimentos	8
1.4. Ejemplos de esfuerzo de corte en alimentos	14
Bibliografía	18
Reología de los alimentos: Deformación	20
2.1. Introducción	20
2.2. Ejemplos de deformaciones longitudinales de alimentos	22
2.3. Ejemplos de deformaciones verdaderas de alimentos	26
2.4. Ejemplos de deformaciones de alimentos: axial, transversa y volumétrica.....	31
2.5. Ejemplos de deformación de corte y ángulo de deformación	42
2.6. Cociente de Poisson.....	47
2.7. Ejemplos de módulo de Poisson.....	48
2.8. Módulo.....	57
2.9. Ejemplos de los módulos global y de corte.....	58
Bibliografía	68
Viscosidad de los alimentos	69
3.1. Introducción	69
3.2. Medida de viscosidad o viscosimetría.....	70
3.3. Derivación de la ecuación de Poiseuille.....	71
Bibliografía	74
Viscosímetros de tubo capilar	76
4.1. Introducción	76
4.2. Viscosímetro Cannon-Fenske y viscosímetro Ubbelohde	89
4.3. Problemas de viscosímetros capilares.....	93
Bibliografía	127

1.1. Introducción

La diversidad de los procesos de fabricación modernos en la industria alimentaria y la importancia que se le otorga a la calidad de los alimentos exige entender y comprender la función de las propiedades de los materiales alimentarios (biológicos) que constituyen los alimentos sólidos y semisólidos. Las propiedades mecánicas se definen por lo común como el comportamiento en cuanto al binomio esfuerzo-deformación (Zulkifli *et al.*, 2020, Nishinari, 2020, Junwei *et al.*, 2018) de un material en condiciones de carga, ya sea esta estática o dinámica, en tanto que la reología que es una rama de la física se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia a condiciones controladas o específicas. Por lo común, los procedimientos o métodos para probar los materiales consisten en pruebas destructivas que producen deformaciones mayores y pruebas no destructivas que conlleva a pocas deformaciones. Las primeras, son necesarias para determinar la resistencia máxima y la extensibilidad de los almidones y las proteínas, en tanto que las segundas resultan muy convenientes para caracterizar muchos alimentos como el queso; la integración de los dos tipos de pruebas estáticas y dinámicas es provechosa para entender y comprender las relaciones entre la micro y la macro estructura y las diversas propiedades de los alimentos, como la textura.

1.2. Conceptos básicos

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

1.2.1. Fuerza

El texturómetro, analizador de textura o máquina universal (Figura 1.1) mide la fuerza que se requiere para que un alimento se deforme y la registra en gramos fuerza (gf), kilogramos fuerza (kgf) o kilopondio, libras fuerza (lbf) o Newtons ($1\text{kgf} = 9.81\text{ N}$). La fuerza es dependiente de la naturaleza del material, pero en vista de que también depende de las medidas o dimensiones de la muestra de prueba, no es una propiedad única del material (Berthaume, 2016).

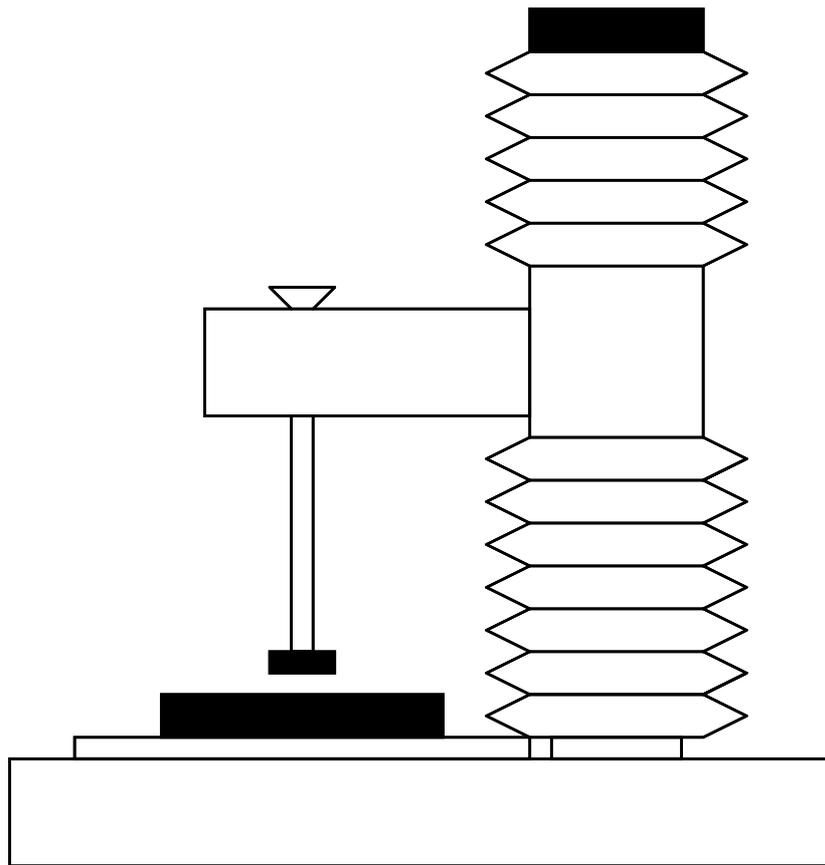


Figura 1.1. Esquema de un analizador de textura TA.XT2i.

1.2.2. Esfuerzo

La fuerza que se aplica a un alimento se distribuye por todo el alimento. Si, en cualquier punto dentro del alimento, 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. Es decir cuando la fuerza se aplica perpendicular a la superficie del alimento, como suele ser el caso con las fuerzas gravitacionales y de presión, el esfuerzo resultante se denomina esfuerzo normal. El esfuerzo queda definido en la ecuación [1.1]

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

[1.1]

donde: F = fuerza aplicada en el alimento, A = superficie de la sección transversal, τ = esfuerzo.

En la Figura 1.2 se muestra el esquema de una barra energética con cereales en la que la fuerza se aplica perpendicular a la superficie del alimento.

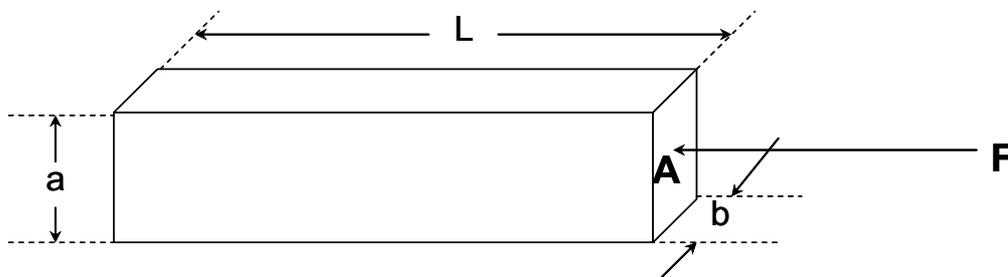


Figura 1.2. Esquema de una barra energética con cereales.

Las unidades del esfuerzo al haberse definido como la fuerza por superficie, son similares a la presión, es decir la presión hidrostática es simplemente una forma de esfuerzo normal y tiene las mismas unidades que la presión.

1.3. Ejemplos de esfuerzos en alimentos

Ejemplo 1.1

Si una barra rectangular de chocolate 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 ¿Cuál es el esfuerzo en cualquier punto de la barra de chocolate?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones de la barra rectangular de chocolate son

Largo = $L = 4 \text{ cm}$

Grosor = $b = 1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$

Altura = $a = 2 \text{ cm} = 0.02 \text{ m}$

Fuerza = 4 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo en cualquier punto de la barra de chocolate.

Solución:

El esfuerzo sobre cualquier punto de la barra de chocolate es

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

Ejemplo 1.2

Si una barra energética rectangular a base de Sacha Inchi de 1 cm de altura, 4 cm de ancho y 14 cm de largo se comprime en los extremos con una fuerza de 6 N ¿Cuál es el esfuerzo en cualquier punto de la barra energética?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones de la barra energética rectangular son

Largo = $L = 14 \text{ cm}$

Ancho = $b = 4 \text{ cm} = 0.04 \text{ m}$

Altura = $a = 1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$

Fuerza = 6 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo en cualquier punto de la barra energética.

Solución:

El esfuerzo sobre cualquier punto de la barra energética es

$$\tau = \frac{6 \text{ N}}{0.04 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}} = 15\,000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 15\,000 \text{ Pa} = 15 \text{ kPa}$$

Ejemplo 1.3

Si una barra energética de quinua–kiwicha de 2 cm de altura, 4 cm de ancho y 10 cm de largo se comprime en los extremos con una fuerza de 5 N ¿Cuál es el esfuerzo en cualquier punto de la barra energética?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones de la barra energética rectangular son

Largo = L = 10 cm

Ancho = b = 4 cm = 0.04 m

Altura = a = 2 cm = 0.02 m

Fuerza = 5 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo en cualquier punto de la barra energética.

Solución:

El esfuerzo sobre cualquier punto de la barra energética es

$$\tau = \frac{5 \text{ N}}{0.04 \text{ m} \times 0.02 \text{ m}} = 6\,250 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 6\,250 \text{ Pa} = 6.25 \text{ kPa}$$

Ejemplo 1.4

Si una barra de chocolate jumbo con forma rectangular mide 8 cm de altura, 3 cm de grueso y 14 cm de largo se comprime en los extremos con una fuerza de 3 N ¿Cuál es el esfuerzo en cualquier punto de la barra de chocolate jumbo?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones de la barra rectangular de chocolate son

Largo = L = 14 cm

Grueso = b = 3 cm = 0.03 m

Altura = a = 8 cm = 0.08 m

Fuerza = 3 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo en cualquier punto de la barra de chocolate.

Solución:

El esfuerzo sobre cualquier punto de la barra de chocolate es

$$\tau = \frac{3 \text{ N}}{0.03 \text{ m} \times 0.08 \text{ m}} = 1\,250 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1\,250 \text{ Pa} = 1.25 \text{ kPa}$$

Ejemplo 1.5

Si una barra de chocolate con forma de prisma triangular mide 2 cm de altura, 2 cm de ancho y 15 cm de largo se

comprime en los extremos con una fuerza de 4 N ¿Cuál es el esfuerzo en cualquier punto de la barra de chocolate?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones de la barra en forma de prisma triangular de chocolate son

Largo = $L = 15 \text{ cm}$

Ancho = $b = 2 \text{ cm} = 0.02 \text{ m}$

Altura = $a = 2 \text{ cm} = 0.02 \text{ m}$

Fuerza = 4 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo en cualquier punto de la barra de chocolate.

Solución:

El esfuerzo sobre cualquier punto de la barra de chocolate es

$$\tau = \frac{4 \text{ N}}{0.02 \text{ m} \times 0.02 \text{ m}} = 10\,000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10\,000 \text{ Pa} = 10 \text{ kPa}$$

Una fuerza aplicada paralela a la superficie produce un esfuerzo de corte, como se muestra en la Figura 1.3. Cuando se aplica un esfuerzo de corte a un fluido, se deforma continuamente y la deformación es permanente. Esta situación se conoce como flujo (Singh y Heldman, 2013, Hartel et al., 2008).

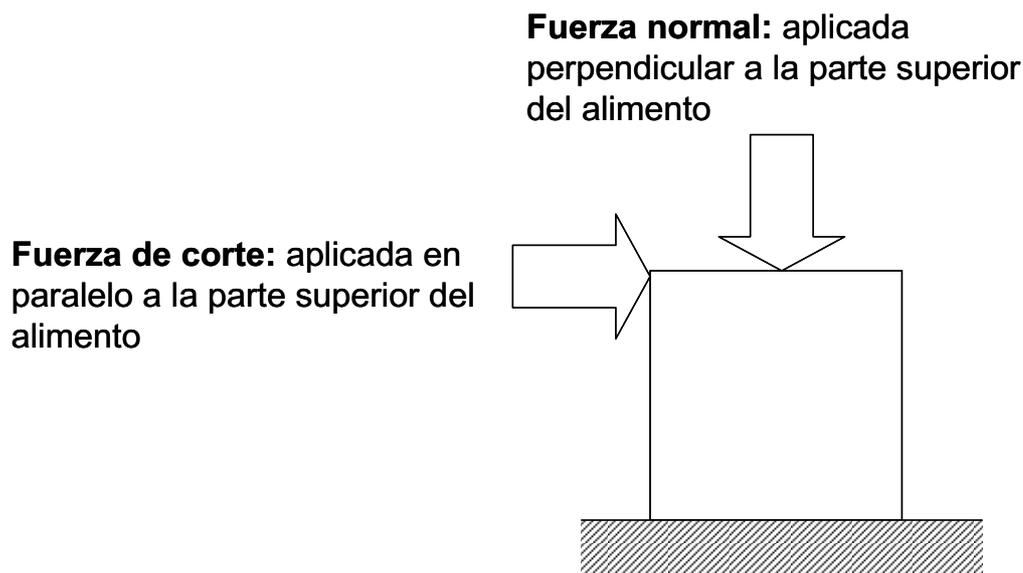


Figura 1.3. Fuerzas aplicadas a la parte superior de un alimento; la parte inferior del alimento se fija al piso.

Al determinar el esfuerzo de corte, la magnitud de la fuerzas se divide entre el área de la sección transversal del alimento que es paralela a las fuerzas. Como las fuerzas son tangenciales, en vez de perpendiculares a la superficie, este esfuerzo se denomina como tangencial.

Cuando un alimento se coloca entre un par de fuerzas opuestas que apuntan una a la otra como se muestra en la Figura 1.4, el alimento se comprime, el esfuerzo que resulta se conoce como de compresión. Ejemplo: cuando se aprieta un masmelo o bombón entre las manos se aplica un esfuerzo de compresión.

Cuando un alimento es sostenido por dos fuerzas que tiran en sentidos opuestos como se representa en la Figura 1.5, el efecto es que el alimento se estira o extiende, el esfuerzo que resulta se conoce como esfuerzo de tensión, tracción o extensión. Ejemplo: cuando se estira un fideo se aplica un esfuerzo de tensión.

Las dos fuerzas aplicadas existen a lo largo de un eje común en el esfuerzo de compresión y de tensión, por lo tanto, ambos esfuerzos son esfuerzos axiales.

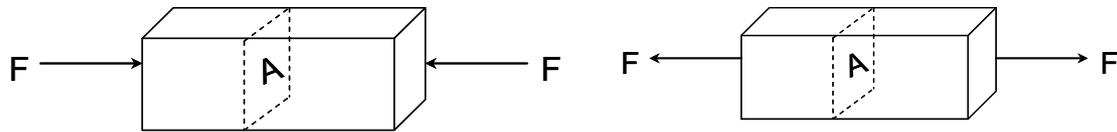


Figura 1.4. Esfuerzo de compresión. Figura 1.5. Esfuerzo de tensión.

Cuando un par de fuerzas son paralelas pero no ocurren a lo largo de un eje común, el efecto es que el alimento se tuerce a un lado. Por ejemplo, si la parte superior de un alimento rectangular se jala hacia la derecha mientras que la inferior se jala hacia la izquierda como aparece en la Figura 1.6, el alimento se convertirá en un paralelogramo, el esfuerzo se denomina como de corte.

1.4. Ejemplos de esfuerzo de corte en alimentos

Ejemplo 1.6

Un trozo de flan mide 5 cm de grosor y 5 cm de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 2 N, la placa superior se mueve 0.5 cm hacia la derecha, lo que hace que el flan se incline. ¿Cuál es el esfuerzo de corte del trozo de flan?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de flan son

Grosor = $b = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m}$

Altura = $a = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m}$

Fuerza = 2 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte en el trozo de flan.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de flan es

$$\tau = \frac{2 \text{ N}}{0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}} = 800 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 800 \text{ Pa} = 0.8 \text{ kPa}$$

Ejemplo 1.7

Un trozo de gelatina mide 6 cm de grosor y 6 cm de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 1.35 N, la placa superior se mueve 0.6 cm hacia la derecha, lo que hace que la gelatina se incline. ¿Cuál es el esfuerzo de corte del trozo de gelatina?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de gelatina son

Grosor = $b = 6 \text{ cm} = 0.06 \text{ m}$

Altura = $a = 6 \text{ cm} = 0.06 \text{ m}$

Fuerza = 1.35 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte en el trozo de gelatina.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de gelatina es

$$\tau = \frac{1.35 \text{ N}}{0.06 \text{ m} \times 0.06 \text{ m}} = 375 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 375 \text{ Pa} = 0.375 \text{ kPa}$$

Ejemplo 1.8

Un trozo de leche asada mide 7 cm de grosor y 7 cm de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 0.49 N, la placa superior se mueve 0.75 cm hacia la derecha, lo que hace que la leche asada se incline. ¿Cuál es el esfuerzo de corte del trozo de leche asada?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de leche asada son

Grosor = $b = 7 \text{ cm} = 0.07 \text{ m}$

Altura = $a = 7 \text{ cm} = 0.07 \text{ m}$

Fuerza = 0.49 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte en la leche asada.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de leche asada es

$$\tau = \frac{0.49 \text{ N}}{0.07 \text{ m} \times 0.07 \text{ m}} = 100 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 100 \text{ Pa} = 0.1 \text{ kPa}$$

Ejemplo 1.9

Un trozo de torta helada mide 10 cm de grosor y 10 cm de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 1 N, la placa superior se mueve 0.25 cm hacia la derecha, lo que

hace que la torta helada se incline. ¿Cuál es el esfuerzo de corte del trozo de la torta helada?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de torta helada son

Grosor = $b = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m}$

Altura = $a = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m}$

Fuerza = 1 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte en la torta helada.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de torta helada es

$$\tau = \frac{1 \text{ N}}{0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}} = 100 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 100 \text{ Pa} = 0.1 \text{ kPa}$$

Ejemplo 1.10

Un trozo de torta helada irlandesa mide 0.09 m de grosor y 0.09 m de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 1.15 N , la placa superior se mueve 0.75 cm hacia la derecha, lo que hace que la torta helada irlandesa se incline. ¿Cuál es el esfuerzo de corte del trozo de la torta helada irlandesa?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de torta helada irlandesa son

Grosor = $b = 0.09 \text{ m}$

Altura = a = 0.09 m

Fuerza = 1.15 N

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte en la torta helada irlandesa.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de torta helada irlandesa es

$$\tau = \frac{1.15 \text{ N}}{0.09 \text{ m} \times 0.09 \text{ m}} = 142 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 142 \text{ Pa} = 0,142 \text{ kPa}$$

Bibliografía

- Berthaume, M.A. (2016). Food mechanical properties and dietary ecology. *American Journal of Physical Anthropology*, 159, 79–104.
- Hartel, R.W., Connelly, R.K., Howell Jr., T.A, Hyslop, D.B. (2008). *Math concepts for food engineering*. Second edition. CRC Press.
- Junwei, L., Yunhai, M., Jin, T., Zichao, M., Lidong, W., Jiangtao, Y. (2018). Mechanical properties and microstructure of potato peels. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1395–1413.
- Nishinari, K. (2020). *Textural characteristics of world foods*. John Wiley and Sons Ltd.
- Singh, R.P., Heldman, D.R. (2013). *Introduction to food engineering*. 5th Edition. Academic Press.

Zulkifli, N., Hashim, N., Harith, H.H., Mohamad Shukery, M.F. (2020). Finite element modelling for fruit stress analysis - A review. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 29–37.

2.1. Introducción

Si sometemos al mismo esfuerzo dos alimentos uno largo y uno corto, es de esperar que el primero cambie más que el segundo. La deformación dependerá tanto de la naturaleza del alimento como de sus medidas o dimensiones. La deformación es la magnitud del cambio longitudinal dividido entre la dimensión inicial, por ejemplo si una de las dimensiones de un alimento es L_0 (longitud inicial u original) y ΔL (cambio longitudinal), la propiedad que está en función únicamente del material será (Sharma *et al.*, 1999)

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L_0}$$

[2.1]

siendo ε_L la deformación.

Las deformaciones de compresión [Figura 2.1(a)] y de tensión o tracción [Figura 2.1(b)] observadas en la se les conoce frecuentemente como deformaciones de ingeniería.

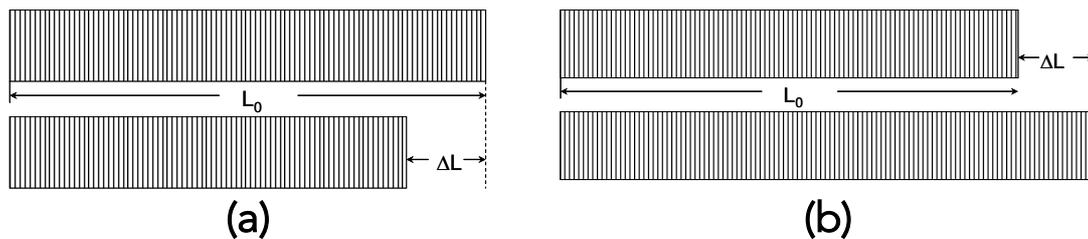


Figura 2.1. Principio de la deformación de (a) compresión y de (b) tensión.

Cuando se somete a esfuerzo un alimento de cualquier forma, como cuando se encuentra bajo presión hidrostática, su volumen cambia. Esto se conoce como deformación volumétrica o compresión por todos los lados y se determina como el cambio de volumen (ΔV) dividido entre el volumen inicial (V_0), ya sea a presión absoluta o manométrica.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0}$$

[2.2]

siendo ε_v la deformación.

La deformación volumétrica o compresión por todos los lados se observa en la Figura 2.2.

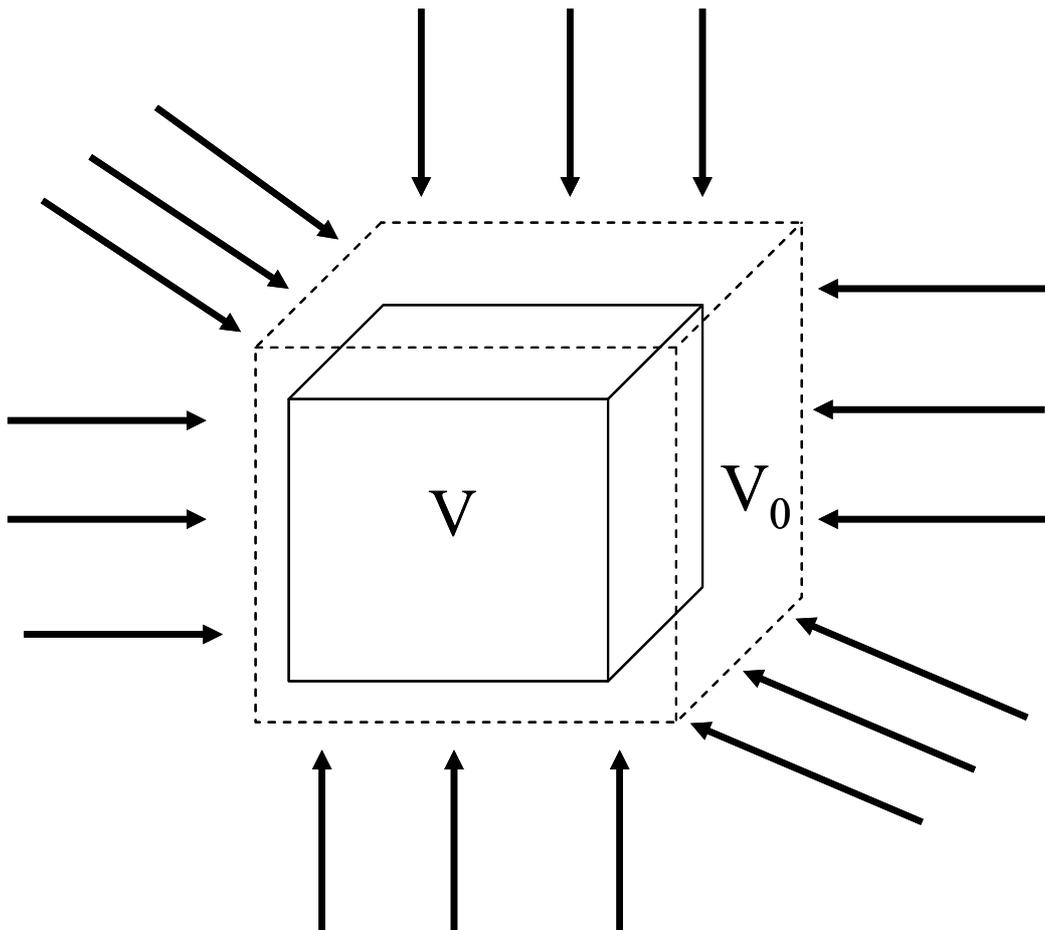


Figura 2.2. Principio de la deformación volumétrica o compresión por todos los lados.

2.2. Ejemplos de deformaciones longitudinales de alimentos

Ejemplo 2.1

Un fideo de 3 pulgadas de longitud se estira hasta 4.5 pulgadas. ¿Cuál es la deformación sobre este fideo?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del fideo son

Longitud inicial = $L_0 = 3$ pulg

Longitud final = $L = 4.5$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.1] es usada para determinar la deformación en el fideo.

Solución:

La deformación longitudinal en el fideo es

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{4.50 - 3.00}{3.00} = \frac{1.50}{3.00} = 0.50$$

Ejemplo 2.2

Una goma de mascar de 2 pulgadas de longitud se estira hasta 3 pulgadas. ¿Cuál es la deformación sobre esta goma de mascar?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones de la goma de mascar son

Longitud inicial = L_0 = 2 pulg

Longitud final = L = 3 pulg

Enfoque:

La ecuación [2.1] es usada para determinar la deformación en la goma de mascar.

Solución:

La deformación longitudinal en la goma de mascar es

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{3 - 2}{2} = \frac{1}{2} = 0.5$$

Ejemplo 2.3

Un caramelo masticable de 1 pulgada de longitud se estira hasta 1.25 pulgadas. ¿Cuál es la deformación sobre este caramelo masticable?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del caramelo masticable son

Longitud inicial = $L_0 = 1$ pulg

Longitud final = $L = 1.25$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.1] es usada para determinar la deformación en el caramelo masticable.

Solución:

La deformación longitudinal en el caramelo masticable es

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{1.25 - 1}{1} = \frac{0.25}{1} = 0.25$$

Ejemplo 2.4

Una lámina de queso de 1.75 pulgada de longitud se estira hasta 1.95 pulgadas. ¿Cuál es la deformación sobre esta lámina de queso?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones de la lámina de queso son

Longitud inicial = $L_0 = 1.75$ pulg

Longitud final = $L = 1.95$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.1] es usada para determinar la deformación en la lámina de queso.

Solución:

La deformación longitudinal en la lámina de queso es

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{1.95 - 1.75}{1.75} = \frac{0.20}{1.75} = 0.11$$

Ejemplo 2.5

Un fideo de 2 pulgada de longitud se estira hasta 2.35 pulgadas. ¿Cuál es la deformación sobre este fideo?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del fideo son

Longitud inicial = $L_0 = 2$ pulg

Longitud final = $L = 2.35$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.1] es usada para determinar la deformación en el fideo.

Solución:

La deformación longitudinal en el fideo es

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.35 - 2}{2} = \frac{0.35}{2} = 0.175$$

La deformación de ingeniería se usa ampliamente. La deformación de ingeniería es sólo una aproximación de la

deformación verdadera. La deformación verdadera se calcula

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

[2.3]

2.3. Ejemplos de deformaciones verdaderas de alimentos

Ejemplo 2.6

Un fideo de 3 pulgadas de longitud se estira hasta 4.5 pulgadas. ¿Cuál es la deformación verdadera sobre este fideo?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del fideo son

Longitud inicial = $L_0 = 3$ pulg

Longitud final = $L = 4.5$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.3] es usada para determinar la deformación verdadera en el fideo.

Solución:

La deformación verdadera en el fideo es

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{4.50}{3.00}\right) = 0.41$$

Ejemplo 2.7

Una goma de mascar de 2 pulgadas de longitud se estira hasta 3 pulgadas. ¿Cuál es la deformación verdadera sobre esta goma de mascar?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones de la goma de mascar son

Longitud inicial = $L_0 = 2$ pulg

Longitud final = $L = 3$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.3] es usada para determinar la deformación verdadera en la goma de mascar.

Solución:

La deformación verdadera en la goma de mascar es

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{3}{2}\right) = 0.41$$

Ejemplo 2.8

Un caramelo masticable de 1 pulgada de longitud se estira hasta 1.25 pulgadas. ¿Cuál es la deformación verdadera sobre este caramelo masticable?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del caramelo masticable son

Longitud inicial = $L_0 = 1$ pulg

Longitud final = $L = 1.25$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.3] es usada para determinar la deformación

verdadera en el caramelo masticable.

Solución:

La deformación verdadera en el caramelo masticable es

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{1.25}{1}\right) = 0.22$$

Ejemplo 2.9

Una lámina de queso de 1.75 pulgada de longitud se estira hasta 1.95 pulgadas. ¿Cuál es la deformación verdadera sobre esta lámina de queso?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones de la lámina de queso son

Longitud inicial = $L_0 = 1.75$ pulg

Longitud final = $L = 1.95$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.3] es usada para determinar la deformación verdadera en la lámina de queso.

Solución:

La deformación verdadera en la lámina de queso es

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{1.95}{1.75}\right) = 0.11$$

Ejemplo 2.10

Un fideo de 2 pulgada de longitud se estira hasta 2.35 pulgadas. ¿Cuál es la deformación verdadera sobre este fideo?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del fideo son

Longitud inicial = $L_0 = 2$ pulg

Longitud final = $L = 2.35$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.3] es usada para determinar la deformación verdadera en el fideo.

Solución:

La deformación verdadera en el fideo es

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{2.35}{2}\right) = 0.16$$

Cuando un alimento se somete a una deformación de tensión o de compresión, la longitud aumenta o disminuye a lo largo del eje del esfuerzo. A este cambio se denomina deformación axial.

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0}$$

[2.4]

Siendo ε_A la deformación axial.

Cuando un alimento se comprime, por lo general se hace más grueso; cuando se estira, comúnmente se adelgaza. Así, para cualquier deformación axial, existe frecuentemente una deformación compensatoria en ángulos rectos a la fuerza, que se conoce como deformación transversa (lateral).

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0}$$

[2.5]

Siendo ε_T la deformación transversa o lateral.

La Figura 2.3 muestra el principio de la deformación axial y la deformación transversa.

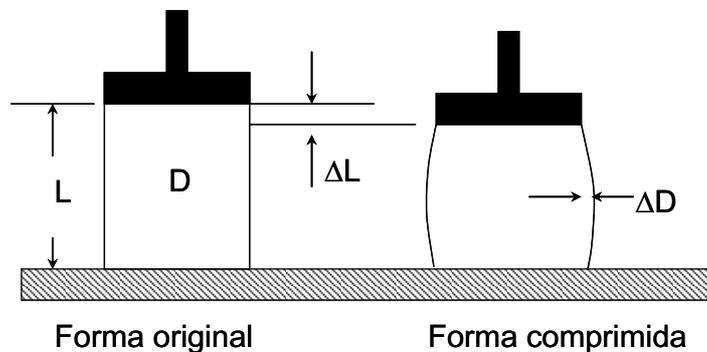


Figura 2.3. Principio de la deformación axial y la deformación transversa.

2.4. Ejemplos de deformaciones de alimentos: axial, transversa y volumétrica

Ejemplo 2.11

Un cilindro de queso de 2 pulgadas de altura y 1 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. Determine la deformación axial y la deformación transversa.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso son

Altura inicial = $L_0 = 2$ pulg

Altura final = $L = 1.80$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1$ pulg

Diámetro final = $D = 1.04$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente en el cilindro de queso.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.00 - 1.80}{2.00} = 0.1$$

La deformación transversa en el cilindro de queso es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.04 - 1.00}{1.00} = 0.04$$

Ejemplo 2.12

Un cilindro de queso cheddar de 2.5 pulgadas de altura y 1.5 pulgada de diámetro se comprime a lo largo de su eje hasta una longitud de 2.0 pulgadas. El diámetro del cilindro aumenta a 1.54 pulgadas. Determine la deformación axial y la deformación transversa.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso cheddar son

Altura inicial = $L_0 = 2.5$ pulg

Altura final = $L = 2.0$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1.5$ pulg

Diámetro final = $D = 1.54$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente en el cilindro de queso cheddar.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso cheddar es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.5 - 2.0}{2.5} = 0.2$$

La deformación transversa en el cilindro de queso cheddar es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.54 - 1.50}{1.5} = 0.03$$

Ejemplo 2.13

Un cilindro de queso parmesano de 2.55 pulgadas de altura y 1.55 pulgada de diámetro se comprime a lo largo de su eje hasta una longitud de 2.15 pulgadas. El diámetro del cilindro aumenta a 1.64 pulgadas. Determine la deformación axial y la deformación transversa.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso parmesano son

Altura inicial = $L_0 = 2.55$ pulg

Altura final = $L = 2.15$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1.55$ pulg

Diámetro final = $D = 1.64$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente en el cilindro de queso parmesano.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso parmesano es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.55 - 2.15}{2.55} = 0.16$$

La deformación transversa en el cilindro de queso parmesano es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.64 - 1.55}{1.55} = 0.06$$

Ejemplo 2.14

Un cilindro de queso roquefort de 2.25 pulgadas de altura y 1.35 pulgada de diámetro se comprime a lo largo de su eje hasta una longitud de 1.95 pulgadas. El diámetro del cilindro aumenta a 1.44 pulgadas. Determine la deformación axial y la deformación transversa.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso roquefort son

Altura inicial = $L_0 = 2.25$ pulg

Altura final = $L = 1.95$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1.35$ pulg

Diámetro final = $D = 1.44$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente en el cilindro de queso roquefort.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso roquefort es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.25 - 1.95}{2.25} = 0.13$$

La deformación transversa en el cilindro de queso roquefort es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.44 - 1.35}{1.35} = 0.07$$

Ejemplo 2.15

Un cilindro de queso azul de 2.28 pulgadas de altura y 1.38 pulgada de diámetro se comprime a lo largo de su eje hasta una longitud de 1.97 pulgadas. El diámetro del cilindro aumenta a 1.47 pulgadas. Determine la deformación axial y la deformación transversa.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso azul son

Altura inicial = $L_0 = 2.28$ pulg

Altura final = $L = 1.97$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1.38$ pulg

Diámetro final = $D = 1.47$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente en el cilindro de queso azul.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso azul es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.28 - 1.97}{2.28} = 0.14$$

La deformación transversa en el cilindro de queso azul es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.47 - 1.38}{1.47} = 0.07$$

Ejemplo 2.16

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 4.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 3.92 pulg³. Determinar la deformación volumétrica a esta presión.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 4.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 3.92 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable.

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{4.00 - 3.92}{4.00} = \frac{0.08}{4.00} = 0.02$$

Ejemplo 2.17

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 3.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 2.92 pulg³. Determinar la deformación volumétrica a esta presión.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 3.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 2.92 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable.

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{3.00 - 2.92}{3.00} = \frac{0.08}{3.00} = 0.03$$

Ejemplo 2.18

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 5.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 4.97 pulg³. Determinar la deformación volumétrica a esta presión.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 5.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 4.97 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable.

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{5.00 - 4.97}{5.00} = \frac{0.03}{5.00} = 0.01$$

Ejemplo 2.19

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 2.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 1.93 pulg³. Determinar la deformación volumétrica a esta presión.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 2.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 1.93 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable.

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{2.00 - 1.93}{2.00} = \frac{0.07}{2.00} = 0.04$$

Ejemplo 2.20

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 6.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 5.91 pulg³. Determinar la deformación volumétrica a esta presión.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 6.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 5.91 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable.

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{6.00 - 5.91}{6.00} = \frac{0.09}{6.00} = 0.02$$

La deformación de corte (γ) es una distorsión que ocurre cuando las fuerzas opuestas no están alineadas entre sí. La deformación de corte es igual a la tangente del ángulo de deformación (θ) causada por el esfuerzo de corte:

$$\gamma = \frac{\Delta L}{L_0} = \text{tang}(\theta)$$

[2.6]

En la Figura 2.4 se muestra el principio de la deformación de corte.

Para deformaciones pequeñas, $\gamma \approx \theta$, cuando el ángulo de deformación se encuentra en radianes.

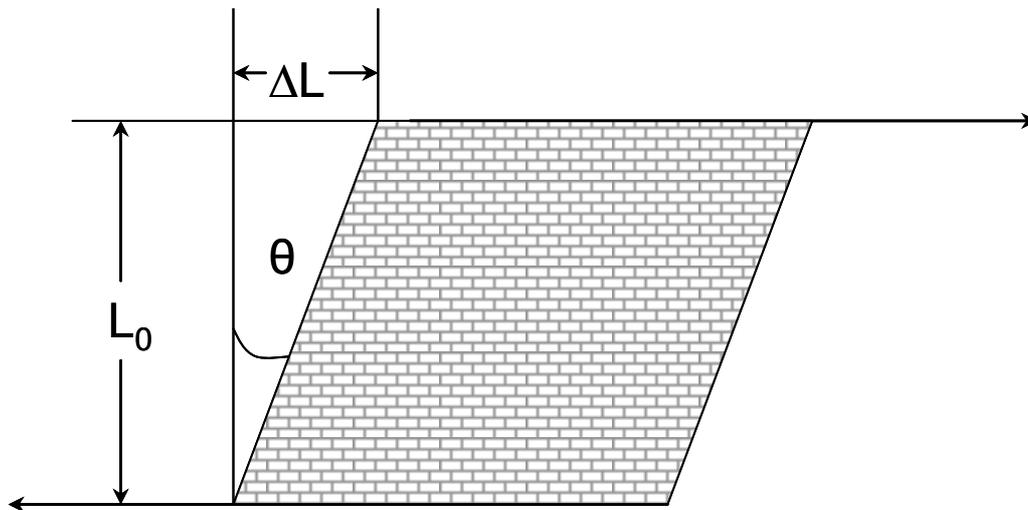


Figura 2.4. Deformación de corte.

2.5. Ejemplos de deformación de corte y ángulo de deformación

Ejemplo 2.21

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. Determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de gelatina son

Grosor = $L_0 = 1.5$ pulg

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.1$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.6] es usada para determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación en el trozo de gelatina.

Solución:

La deformación de corte en el trozo de gelatina es

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

y el ángulo de deformación es

$$\theta = \text{tang}^{-1}(0.067) = 0.067 \text{ rad} = 3.81^\circ$$

Ejemplo 2.22

Un trozo de flan de 1.7 pulgadas de grosor se encuentra entre dos placas horizontales. La placa superior se mueve 0.2 pulgadas hacia la derecha, lo que hace que el flan se incline. Determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de flan son

Grosor = $L_0 = 1.7$ pulg

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.2$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.6] es usada para determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación en el trozo de flan.

Solución:

La deformación de corte en el trozo de flan es

$$\gamma = \frac{0.20}{1.7} = 0.118$$

y el ángulo de deformación es

$$\theta = \text{tang}^{-1}(0.118) = 0.117 \text{ rad} = 6.71^\circ$$

Ejemplo 2.23

Un trozo de leche asada de 1.8 pulgadas de grosor se encuentra entre dos placas horizontales. La placa superior se mueve 0.15 pulgadas hacia la derecha, lo que hace que la leche asada se incline. Determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de leche asada son

Grosor = $L_0 = 1.8$ pulg

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.15$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.6] es usada para determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación en el trozo de leche asada.

Solución:

La deformación de corte en el trozo de leche asada es

$$\gamma = \frac{0.15}{1.8} = 0.083$$

y el ángulo de deformación es

$$\theta = \tan^{-1}(0.083) = 0.083 \text{ rad} = 4.76^\circ$$

Ejemplo 2.24

Un trozo de gelatina de 1.9 pulgadas de grosor se encuentra entre dos placas horizontales. La placa superior se mueve 0.25 pulgadas hacia la derecha, lo que hace que la gelatina se incline. Determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de gelatina son

Grosor = $L_0 = 1.9$ pulg

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.25$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.6] es usada para determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación en el trozo de gelatina.

Solución:

La deformación de corte en el trozo de gelatina es

$$\gamma = \frac{0.25}{1.9} = 0.132$$

y el ángulo de deformación es

$$\theta = \text{tang}^{-1}(0.132) = 0.131 \text{ rad} = 7.50^\circ$$

Ejemplo 2.25

Un trozo de gelatina de 2 pulgadas de grosor se encuentra entre dos placas horizontales. La placa superior se mueve 0.35 pulgadas hacia la derecha, lo que hace que la gelatina se incline. Determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de gelatina son

Grosor = $L_0 = 2.0$ pulg

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.35$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.6] es usada para determinar la deformación de corte y el ángulo de deformación en el trozo de gelatina.

Solución:

La deformación de corte en el trozo de gelatina es

$$\gamma = \frac{0.35}{2.0} = 0.175$$

y el ángulo de deformación es

$$\theta = \text{tang}^{-1}(0.175) = 0.173 \text{ rad} = 9.93^\circ$$

2.6. Cociente de Poisson

Es el cociente entre la deformación transversa y la deformación axial (Pratapa *et al.*, 2019, Grotte *et al.*, 2002). El cociente de Poisson (μ) mide en qué grado los cambios de longitud se acompañan de cambios de las dimensiones no axiales, es decir, el diámetro de un cilindro (Hu *et al.*, 2019). Por lo general, varía de 0 (sin arqueamiento) a un máximo de 0.5 (un arqueamiento igual a la mitad de la compresión). El cociente de Poisson se calcula como (Shirmohammadi *et al.*, 2018):

$$\mu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_A} = \frac{\Delta D/D_0}{\Delta L/L_0}$$

[2.7]

2.7. Ejemplos de módulo de Poisson

Ejemplo 2.26

Un cilindro de queso de 2 pulgadas de altura y 1 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. Determine el módulo de Poisson.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso son

Altura inicial = $L_0 = 2$ pulg

Altura final = $L = 1.80$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1$ pulg

Diámetro final = $D = 1.04$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente y luego se procede a usar la ecuación [2.7] para determinar el módulo de Poisson en el cilindro de queso.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.00 - 1.80}{2.00} = 0.1$$

La deformación transversa en el cilindro de queso es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.04 - 1.00}{1.00} = 0.04$$

El módulo de Poisson en el cilindro de queso es

$$\mu = \frac{0.04}{0.1} = 0.4$$

Ejemplo 2.27

Un cilindro de queso cheddar de 2.5 pulgadas de altura y 1.5 pulgada de diámetro se comprime a lo largo de su eje hasta una longitud de 2.0 pulgadas. El diámetro del cilindro aumenta a 1.54 pulgadas. Determine el módulo de Poisson.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso cheddar son

Altura inicial = $L_0 = 2.5$ pulg

Altura final = $L = 2.0$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1.5$ pulg

Diámetro final = $D = 1.54$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente y luego se procede a usar la ecuación [2.7] para determinar el módulo de Poisson en el cilindro de queso cheddar.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso cheddar es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.5 - 2.0}{2.5} = 0.2$$

La deformación transversa en el cilindro de queso cheddar es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.54 - 1.50}{1.5} = 0.03$$

El módulo de Poisson en el cilindro de queso cheddar es

$$\mu = \frac{0.03}{0.2} = 0.13$$

Ejemplo 2.28

Un cilindro de queso parmesano de 2.55 pulgadas de altura y 1.55 pulgada de diámetro se comprime a lo largo de su eje hasta una longitud de 2.15 pulgadas. El diámetro del cilindro aumenta a 1.64 pulgadas. Determine el módulo de Poisson.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso parmesano son

Altura inicial = $L_0 = 2.55$ pulg

Altura final = $L = 2.15$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1.55$ pulg

Diámetro final = $D = 1.64$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente y luego se procede a usar la ecuación [2.7] para determinar el módulo de Poisson en el cilindro de queso parmesano.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso parmesano es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.55 - 2.15}{2.55} = 0.16$$

La deformación transversa en el cilindro de queso parmesano es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.64 - 1.55}{1.55} = 0.06$$

El módulo de Poisson en el cilindro de queso parmesano es

$$\mu = \frac{0.06}{0.16} = 0.37$$

Ejemplo 2.29

Un cilindro de queso roquefort de 2.25 pulgadas de altura y 1.35 pulgada de diámetro se comprime a lo largo de su eje hasta una longitud de 1.95 pulgadas. El diámetro del cilindro aumenta a 1.44 pulgadas. Determine el módulo de Poisson.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso roquefort son

Altura inicial = $L_0 = 2.25$ pulg

Altura final = $L = 1.95$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1.35$ pulg

Diámetro final = $D = 1.44$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente y luego se procede a usar la ecuación [2.7] para determinar el módulo de Poisson en el cilindro de queso roquefort.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso roquefort es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.25 - 1.95}{2.25} = 0.13$$

La deformación transversa en el cilindro de queso roquefort es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.44 - 1.35}{1.35} = 0.07$$

El módulo de Poisson en el cilindro de queso roquefort es

$$\mu = \frac{0.07}{0.13} = 0.5$$

Ejemplo 2.30

Un cilindro de queso azul de 2.28 pulgadas de altura y 1.38 pulgada de diámetro se comprime a lo largo de su eje hasta una longitud de 1.97 pulgadas. El diámetro del cilindro aumenta a 1.47 pulgadas. Determine el módulo de Poisson.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de queso azul son

Altura inicial = $L_0 = 2.28$ pulg

Altura final = $L = 1.97$ pulg

Diámetro inicial = $D_0 = 1.38$ pulg

Diámetro final = $D = 1.47$ pulg

Enfoque:

La ecuación [2.4] y la ecuación [2.5] son usadas para determinar la deformación axial y transversa respectivamente y luego se procede a usar la ecuación [2.7] para determinar el módulo de Poisson en el cilindro de queso azul.

Solución:

La deformación axial en el cilindro de queso azul es

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{2.28 - 1.97}{2.28} = 0.14$$

La deformación transversa en el cilindro de queso azul es

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{1.47 - 1.38}{1.47} = 0.07$$

El módulo de Poisson en el cilindro de queso azul es

$$\mu = \frac{0.07}{0.14} = 0.48$$

2.8. Módulo

El módulo es una medida de la resistencia o rigidez a la deformación de un alimento. Debido a que el denominador de un módulo es siempre adimensional, las unidades de cualquier módulo son las mismas unidades de esfuerzo (fuerza por unidad de área) por ejemplo en el sistema internacional de unidades: Pa = N/m².

El módulo global (K) para cambios volumétricos se define como el cociente entre la presión hidrostática (P) y la deformación volumétrica (ϵ_v):

$$K = \frac{P}{\epsilon_v}$$

[2.8]

El módulo de corte (G) es el cociente entre el esfuerzo de corte (τ) y la deformación de corte (γ):

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

[2.9]

2.9. Ejemplos de los módulos global y de corte

Ejemplo 2.31

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 4.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 3.92 pulg³. Determinar el módulo global.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 4.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 3.92 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable y luego se usa la ecuación [2.8] para determinar el módulo global (K).

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{4.00 - 3.92}{4.00} = \frac{0.08}{4.00} = 0.02$$

El módulo global en el cilindro de acero inoxidable es

$$K = \frac{P}{\varepsilon_v} = \frac{2 \text{ atm}}{0.02} = 100 \text{ atm}$$

Ejemplo 2.32

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 3.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 2.92 pulg³. Determinar el módulo global.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 3.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 2.92 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable y luego se usa la ecuación [2.8] para determinar el módulo global (K).

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{3.00 - 2.92}{3.00} = \frac{0.08}{3.00} = 0.03$$

El módulo global en el cilindro de acero inoxidable es

$$K = \frac{P}{\varepsilon_v} = \frac{2 \text{ atm}}{0.03} = 75 \text{ atm}$$

Ejemplo 2.33

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 5.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 4.97 pulg³. Determinar el módulo global.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 5.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 4.97 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable y luego se usa la ecuación [2.8] para determinar el módulo global (K).

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{5.00 - 4.97}{5.00} = \frac{0.03}{5.00} = 0.01$$

El módulo global en el cilindro de acero inoxidable es

$$K = \frac{P}{\varepsilon_v} = \frac{2 \text{ atm}}{0.01} = 333.33 \text{ atm}$$

Ejemplo 2.34

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 2.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 1.93 pulg³. Determinar el módulo global.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 2.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 1.93 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable y luego se usa la ecuación [2.8] para determinar el módulo global (K).

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{2.00 - 1.93}{2.00} = \frac{0.07}{2.00} = 0.04$$

El módulo global en el cilindro de acero inoxidable es

$$K = \frac{P}{\varepsilon_v} = \frac{2 \text{ atm}}{0.04} = 57.14 \text{ atm}$$

Ejemplo 2.35

Se encuentra que un cilindro de acero inoxidable ocupa 6.00 pulg³. Enseguida se sumerge en un tanque de agua y se aumenta la presión a 2 atm. El volumen de éste cambia a 5.91 pulg³. Determinar el módulo global.

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del cilindro de acero inoxidable son

Volumen inicial = $V_0 = 6.00 \text{ pulg}^3$

Volumen final = $V = 5.91 \text{ pulg}^3$

Enfoque:

La ecuación [2.2] es usada para determinar la deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable y luego se usa la ecuación [2.8] para determinar el módulo global (K).

Solución:

La deformación volumétrica en el cilindro de acero inoxidable es

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{6.00 - 5.91}{6.00} = \frac{0.09}{6.00} = 0.02$$

El módulo global en el cilindro de acero inoxidable es

$$K = \frac{P}{\varepsilon_v} = \frac{2 \text{ atm}}{0.02} = 133.33 \text{ atm}$$

Ejemplo 2.36

Un trozo de flan mide 5 cm de grosor y 5 cm de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 2 N, la placa superior se mueve 0.5 cm hacia la derecha, lo que hace que el flan se incline. ¿Cuál es el módulo de corte del trozo de flan?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de flan son

Grosor = $b = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m}$

Altura = $a = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m}$

Fuerza = 2 N

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.5 \text{ cm} = 0.005 \text{ m}$

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte, la ecuación [2.6] para determinar la deformación de corte y la ecuación [2.9] se utiliza para determinar el módulo de corte.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de flan es

$$\tau = \frac{2 \text{ N}}{0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}} = 800 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 800 \text{ Pa} = 0.8 \text{ kPa}$$

La deformación de corte en el trozo de flan es

$$\gamma = \frac{0.005}{0.05} = 0.1$$

El módulo de corte en el trozo de flan es

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{0.8 \text{ kPa}}{0.1} = 8 \text{ kPa}$$

Ejemplo 2.37

Un trozo de gelatina mide 6 cm de grosor y 6 cm de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 1.35 N, la placa superior se mueve 0.6 cm hacia la derecha, lo que hace que la gelatina se incline. ¿Cuál es el módulo de corte del trozo de gelatina?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de gelatina son

Grosor = $b = 6 \text{ cm} = 0.06 \text{ m}$

Altura = $a = 6 \text{ cm} = 0.06 \text{ m}$

Fuerza = 1.35 N

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.6 \text{ cm} = 0.006 \text{ m}$

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte, la ecuación [2.6] para determinar la deformación de corte y la ecuación [2.9] se utiliza para determinar el módulo de corte.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de gelatina es

$$\tau = \frac{1.35 \text{ N}}{0.06 \text{ m} \times 0.06 \text{ m}} = 375 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 375 \text{ Pa} = 0.375 \text{ kPa}$$

La deformación de corte en el trozo de gelatina es

$$\gamma = \frac{0.006}{0.06} = 0.1$$

El módulo de corte en el trozo de gelatina es

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{0.375 \text{ kPa}}{0.1} = 3.75 \text{ kPa}$$

Ejemplo 2.38

Un trozo de leche asada mide 7 cm de grosor y 7 cm de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 0.49 N, la placa superior se mueve 0.75 cm hacia la derecha, lo que hace que la leche asada se incline. ¿Cuál es el módulo de corte del trozo de leche asada?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de leche asada son

Grosor = $b = 7 \text{ cm} = 0.07 \text{ m}$

Altura = $a = 7 \text{ cm} = 0.07 \text{ m}$

Fuerza = 0.49 N

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.75 \text{ cm} = 0.0075 \text{ m}$

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte, la ecuación [2.6] para determinar la deformación de corte y la ecuación [2.9] se utiliza para determinar el módulo de corte.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de leche asada es

$$\tau = \frac{0.49 \text{ N}}{0.07 \text{ m} \times 0.07 \text{ m}} = 100 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 100 \text{ Pa} = 0.1 \text{ kPa}$$

La deformación de corte en el trozo de leche asada es

$$\gamma = \frac{0.0075}{0.07} = 0.107$$

El módulo de corte en el trozo de leche asada es

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{0.1 \text{ kPa}}{0.107} = 0.93 \text{ kPa}$$

Ejemplo 2.39

Un trozo de torta helada mide 10 cm de grosor y 10 cm de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 1 N, la placa superior se mueve 0.25 cm hacia la derecha, lo que hace que la torta helada se incline. ¿Cuál es el módulo de corte del trozo de la torta helada?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de torta helada son

Grosor = $b = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m}$

Altura = $a = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m}$

Fuerza = 1 N

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.25 \text{ cm} = 0.0025 \text{ m}$

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte, la ecuación [2.6] para determinar la deformación de corte y la ecuación [2.9] se utiliza para determinar el módulo de corte.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de torta helada es

$$\tau = \frac{1 \text{ N}}{0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}} = 100 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 100 \text{ Pa} = 0.1 \text{ kPa}$$

La deformación de corte en el trozo de torta helada es

$$\gamma = \frac{0.0025}{0.1} = 0.025$$

El módulo de corte en el trozo de torta helada es

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{0.1 \text{ kPa}}{0.025} = 4 \text{ kPa}$$

Ejemplo 2.40

Un trozo de torta helada irlandesa mide 0.09 m de grosor y 0.09 m de altura se encuentra entre dos placas horizontales, la placa inferior permanece fija. Al aplicarle una fuerza de 1.15 N, la placa superior se mueve 0.75 cm hacia la derecha, lo que hace que la torta helada irlandesa se incline. ¿Cuál es el módulo de corte del trozo de la torta helada irlandesa?

Teniendo en cuenta:

Las dimensiones del trozo de torta helada irlandesa son

Grosor = $b = 0.09$ m

Altura = $a = 0.09$ m

Fuerza = 1.15 N

Cambio longitudinal = $\Delta L = 0.75$ cm = 0.0075 m

Enfoque:

La ecuación [1.1] es usada para determinar el esfuerzo de corte, la ecuación [2.6] para determinar la deformación de corte y la ecuación [2.9] se utiliza para determinar el módulo de corte.

Solución:

El esfuerzo de corte en el trozo de torta helada irlandesa es

$$\tau = \frac{1.15 \text{ N}}{0.09 \text{ m} \times 0.09 \text{ m}} = 142 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 142 \text{ Pa} = 0.142 \text{ kPa}$$

La deformación de corte en el trozo de torta helada irlandesa es

$$\gamma = \frac{0.0075}{0.09} = 0.083$$

El módulo de corte en el trozo de torta helada irlandesa es

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{0.142 \text{ kPa}}{0.083} = 1.70 \text{ kPa}$$

Bibliografía

- Grotte, M., Duprat, F., Piétri, E., Loonis, D. (2002). Young's modulus, Poisson's ratio, and lame's coefficients of golden delicious apple. *International Journal of Food Properties*, 5(2), 333–349.
- Hu, Z., Hassan, M.M. (2019). Effect of Poisson's ratio on material property characterization by nanoindentation with a cylindrical flat-tip indenter. *Journal of Materials Research*, 1–10.
- Pratapa, P.P., Liu, K., Paulino, G.H. (2019). Geometric mechanics of origami patterns exhibiting Poisson's ratio switch by breaking mountain and valley assignment. *Physical Review Letters* 122, 155501.
- Sharma, S.K., Mulvaney, S.J., Rizvi, S.S.H. (1999). *Food engineering: theory and laboratory experiments*. John Wiley & Sons.
- Shirmohammadi, M., Shirmohammadi, M., Yarlagađa Maryam Shirmohammadi, P.K.D.V., Yarlagađa, P.K.D.V. (2018). Determining of Poisson's ratio and Young's modulus of Pumpkin tissue- using laser measurement sensors. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 11507–11515.

3.1. Introducción

La viscosidad es una medida de resistencia al flujo de un fluido (Schultze-Jena et al., 2019). Aunque las moléculas de un fluido están en constante movimiento aleatorio, la velocidad neta en una dirección particular es cero a menos que se aplique alguna fuerza para hacer fluir el fluido. La magnitud de la fuerza necesaria para inducir el flujo a una velocidad determinada está relacionada con la viscosidad de un fluido (Sarghini y Erdogan, 2016). El flujo ocurre cuando las moléculas de fluido se deslizan una tras otra en una dirección particular en cualquier plano dado. Por lo tanto, debe haber una diferencia en la velocidad, un gradiente de velocidad, entre las moléculas adyacentes. En cualquier plano particular paralelo a la dirección del flujo, las moléculas que están encima y debajo de ese plano ejercen una resistencia a la fuerza que impulsa a una molécula a moverse más rápido que la otra. Esta resistencia de un material al flujo o a la deformación se conoce como estrés. El esfuerzo por cizalladura ($\tau = \sigma$) Es el término que se le da al esfuerzo inducido cuando las moléculas se deslizan una sobre otra a lo largo de un plano definido. El gradiente de velocidad ($-dv/dr = \dot{\gamma}$) Es una medida de la rapidez con que una molécula se desliza a través de otra, por lo tanto, también se conoce como velocidad de cizalladura. La posición desde la cual se mide

la distancia para determinar la velocidad de cizalladura es el punto en la corriente de flujo donde la velocidad es máxima, por lo tanto, a medida que la distancia r aumenta desde este punto de referencia, v disminuye y el gradiente de velocidad es una cantidad negativa. Debido a que el esfuerzo cortante siempre es positivo, expresar la velocidad de corte como $-dv/dr$ satisface la igualdad en la ecuación del esfuerzo cortante como una función de la velocidad de corte.

Los fluidos que exhiben un aumento lineal en el esfuerzo cortante con la velocidad de cizalladura (ecuación [3.1]) se denominan fluidos newtonianos (Benbettaïeb et al., 2020). La constante de proporcionalidad ($\mu = \eta$) Se llama viscosidad.

$$\tau = \mu \left(-\frac{dv}{dr} \right)$$

[3.1]

3.2. Medida de viscosidad o viscosimetría

La viscosidad de un líquido se puede medir usando una variedad de enfoques y métodos (Bista et al., 2019).

Los instrumentos utilizados para medir las propiedades de flujo de los fluidos se denominan viscosímetros. La viscosidad newtoniana se puede medir fácilmente ya que solo se necesita utilizar una velocidad de cizallamiento y, por lo tanto, los viscosímetros para este fin son relativamente simples en comparación con los que se

utilizan para evaluar fluidos no newtonianos (Mckenna y Lyng, 2013). Los viscosímetros requieren un mecanismo para inducir flujo que debe medirse, un mecanismo para medir la fuerza aplicada y la geometría del sistema en el que se produce el flujo debe ser simple en el diseño de modo que la fuerza y el flujo se puedan traducir fácilmente en un esfuerzo cortante y velocidad de corte.

3.3. Derivación de la ecuación de Poiseuille

El principio de funcionamiento de los viscosímetros capilares o de tubo se basa en la ecuación de Poiseuille, si el fluido es newtoniano.

La Figura 3.1 muestra un tubo de longitud L y radio R . Existe una presión P_1 en la entrada y P_2 existe en el extremo del tubo. A una distancia r del centro, se aísla un anillo de grosor dr , y en este punto, la velocidad del fluido es v , la velocidad del punto. El esfuerzo de cizalladura en este punto es el flujo/área resistente a la fuerza del fluido sometido a cizallamiento. La fuerza que resiste el flujo en el fluido que ocupa el área del anillo es la caída de presión por el área del anillo, y el área del plano donde se cizalla el fluido es el área circunferencial del cilindro que se forma cuando el anillo se proyecta longitudinalmente, L (Toledo *et al.*, 2018).

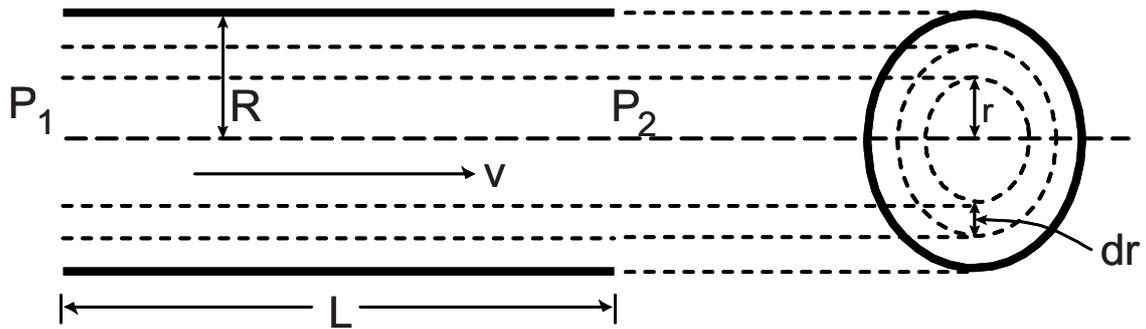


Figura 3.1. Elemento de control diferencial para el análisis del flujo de fluido a través de un tubo.

$$\tau = \frac{(P_1 - P_2)(\pi r^2)}{2\pi r L} = \frac{(P_1 - P_2)r}{2L}$$

[3.2]

Sustituyendo la ecuación [3.2] en la ecuación [3.1]:

$$\frac{(P_1 - P_2)r}{2L} = \mu \left(-\frac{dv}{dr} \right)$$

Separando variables e integrando:

$$\int dv = \frac{(P_1 - P_2)}{2L\mu} \int -r dr$$

$$v = \frac{(P_1 - P_2)}{2L\mu} \left(-\frac{r^2}{2} \right) + C$$

La constante de integración se puede determinar aplicando la condición de frontera: en $r = R$, $v = 0$.

$$C = \frac{(P_1 - P_2)R^2}{4L\mu}$$

$$v = \frac{(P_1 - P_2)}{4L\mu} (R^2 - r^2) = \frac{\Delta P}{4L\mu} (R^2 - r^2)$$

[3.3]

La ecuación [3.3] da la velocidad del punto en una corriente de flujo para cualquier fluido que fluya dentro de un tubo cilíndrico. La velocidad del punto no es muy fácil de medir. Sin embargo, una velocidad promedio definida como la velocidad de flujo volumétrico/área se puede medir fácilmente. La ecuación [3.3] se expresará en términos de la velocidad promedio. Considere una tubería de radio R y un volumen de control que son las paredes de un cilindro hueco de espesor dr dentro de la tubería, que se muestra en la Figura 3.2.

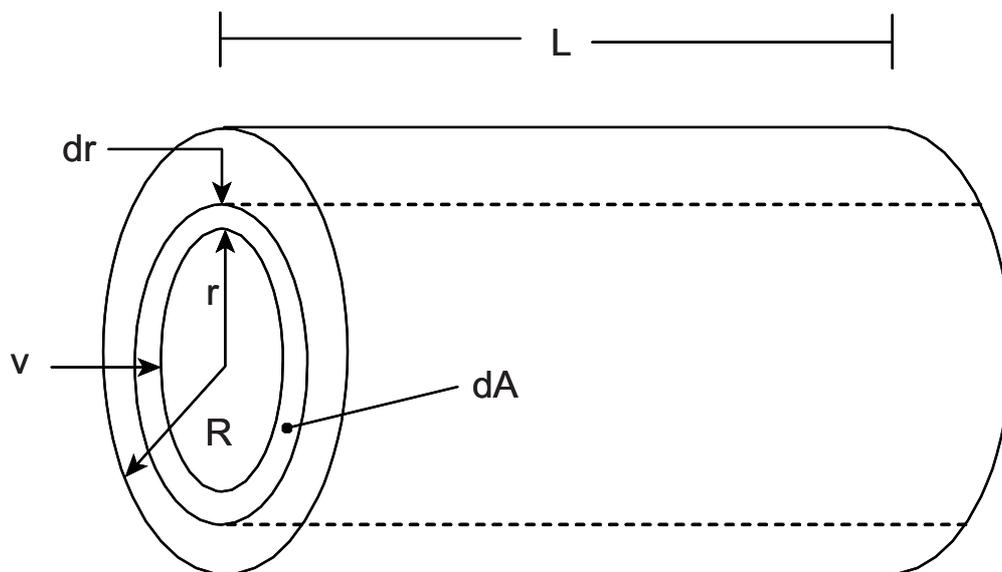


Figura 3.2. Tubo que muestra el anillo de espesor dr usado como elemento de control para el análisis del flujo de fluido.

El área de la sección transversal del anillo de grosor dr es $dA = \pi [(r + dr)^2 - r^2] = \pi (r^2 + 2rdr + (dr)^2 - r^2) = 2\pi r dr + (dr)^2$. Como dr es pequeño $(dr)^2$ es insignificante por lo tanto, $dA = 2\pi r dr$. La velocidad de flujo volumétrico (volumen/tiempo) a través del volumen de control es $v dA = 2\pi r v dr$. El volumen total que pasa por la tubería será la

integral de la tasa volumétrica de flujo a través del volumen de control de $r = 0$ a $r = R$. Sustituyendo la ecuación [3.3] por \bar{v} :

$$\bar{v}(\pi R^2) = \frac{(P_1 - P_2)}{4L\mu} (2\pi) \int_0^R (R^2 - r^2) r dr$$

Reordenando e integrando:

$$\bar{v} = \frac{(P_1 - P_2)}{2L\mu R^2} \left[\frac{R^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^R$$

Sustituyendo límites, combinando términos y sustituyendo ΔP por $(P_1 - P_2)$:

$$\bar{v} = \frac{(P_1 - P_2)R^2}{8L\mu} = \frac{\Delta P R^2}{8L\mu}$$

[3.4]

La ecuación [3.4] es la ecuación de Poiseuille y se puede usar para determinar la viscosidad de un fluido newtoniano a partir de los datos de caída de presión cuando se permite que el fluido fluya a través de un tubo o un capilar.

Bibliografía

Benbettaïeb, N., Mahfoudh, R., Moundanga, S., Brachais, C.-H., Chambin, O., & Debeaufort, F. (2020). Modeling of the release kinetics of phenolic acids embedded in gelatin/chitosan bioactive-packaging films: Influence of both water activity and viscosity of the food simulant

- on the film structure and antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.05.199
- Bista, A., Hogan, S. A., O'Donnell, C. P., Tobin, J. T., & O'Shea, N. (2019). Evaluation and validation of an inline Coriolis flowmeter to measure dynamic viscosity during laboratory and pilot-scale food processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 211–218. doi:10.1016/j.ifset.2019.05.004
- Mckenna, B. M., & Lyng, J. G. (2013). Principles of food viscosity analysis. *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality*, 129–162. doi:10.1533/9780857098856.1.129
- Sarghini, F., & Erdogdu, F. (2016). A computational study on heat transfer characteristics of particulate canned foods during end-over-end rotational agitation: Effect of rotation rate and viscosity. *Food and Bioprocess Processing*, 100, 496–511. doi:10.1016/j.fbp.2016.07.009
- Schultze-Jena, A., Boon, M. A., Vroon, R. C., Bussmann, P. J. T., Janssen, A. E. M., & van der Padt, A. (2019). High viscosity preparative chromatography for food applications. *Separation and Purification Technology*, 116386. doi:10.1016/j.seppur.2019.116386
- Toledo, R.T., Singh, R.K., Kong, F. (2018). *Fundamentals of Food Process Engineering*. Fourth edition Springer.

4.1. Introducción

El viscosímetro capilar mide la viscosidad al medir el tiempo que tarda el material de prueba de fluido en pasar a través de un tubo de diámetro muy pequeño, un tubo capilar. Si bien es concebible utilizar cualquier tubo capilar, existen tubos que se producen comercialmente para este fin. Estos tubos se llaman viscosímetros capilares.

La medición del tubo capilar se basa en el esquema que se muestra en la Figura 4.1. Como se muestra, la presión (ΔP) es suficiente para superar las fuerzas de corte dentro del líquido y producir un flujo de una velocidad dada. Las fuerzas de corte operan en todas las superficies líquidas internas para toda la longitud L del tubo y la distancia r desde el centro del tubo.

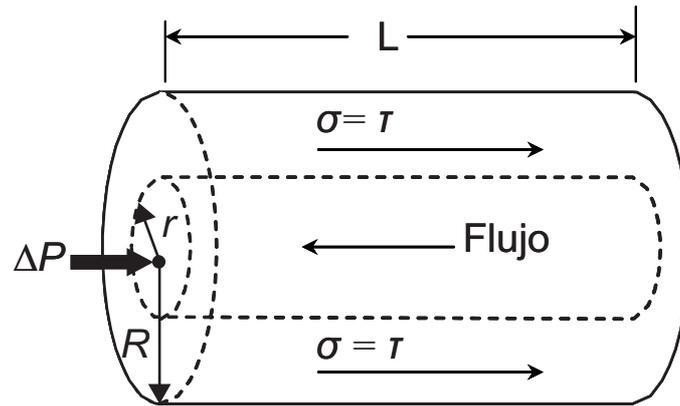


Figura 4.1. Equilibrio de fuerza para una sección del tubo capilar.

Fuente: Singh y Heldman (2013).

La ecuación [4.1] proporciona la base para el diseño y la operación de cualquier viscosímetro de tubo capilar.

Para un tubo con longitud L y radio R , la medición de un caudal volumétrico $v = Q$ a una presión ΔP permitirá determinar la viscosidad μ :

$$\mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8LQ}$$

[4.2]

Como la ecuación [4.2] se deriva para un fluido newtoniano, cualquier combinación de caudal y caída de presión dará el mismo valor de viscosidad.

El diseño básico consiste en un tubo de vidrio en forma de U con porciones capilares en un brazo de la "U". Esta porción tiene un bulbo central grande y dos líneas de calibración grabadas. Se abre cerca de la parte superior para que la succión se pueda aplicar de forma conveniente. El otro lado tiene una abertura más grande

en la parte superior en la que se vierte el material de prueba cuando se prepara para una medición. Una representación simplificada se da en la Figura 4.2.

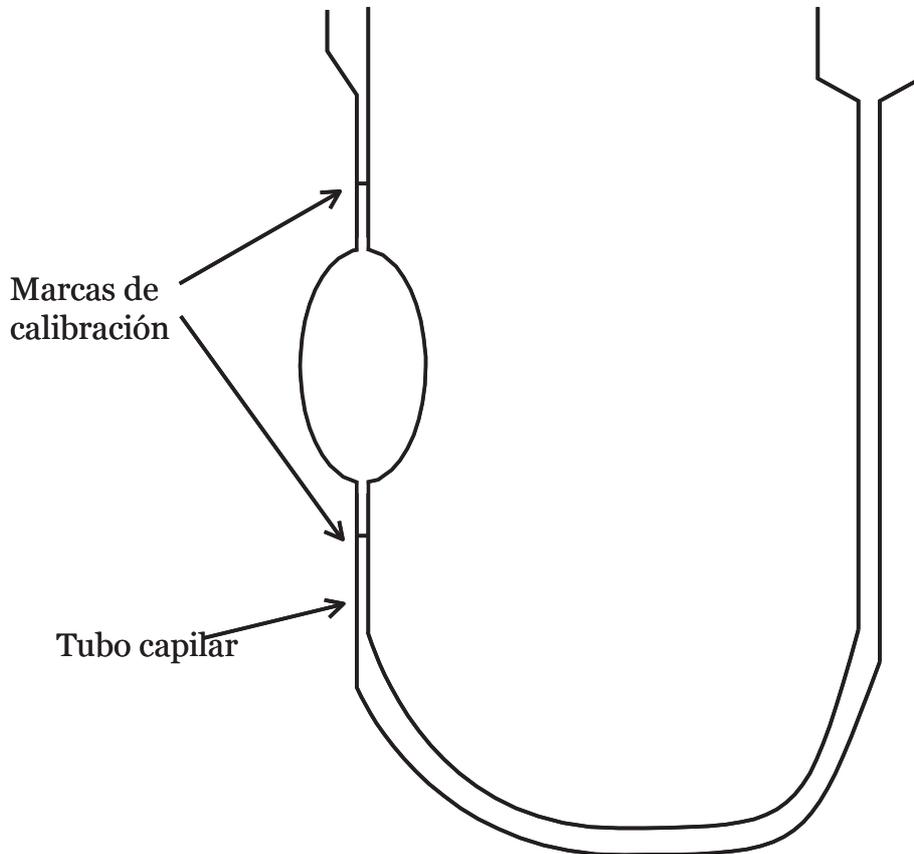


Figura 2.4. Representación simplificada de un viscosímetro capilar.

Para medir el tiempo de flujo, el fluido de prueba se vierte en el lado apropiado (Figura 4.3a) para que ocupe la parte inferior de la "U" y para que el menisco en el lado capilar esté debajo de la marca de calibración inferior (Figura 4.3b). Luego, la succión se aplica al lado del capilar para que el líquido se dirija hacia arriba por encima de la marca de calibración superior (Figura 4.3c). Cuando se libera el fluido, fluye por gravedad a través del capilar (Figura 4.3d), de modo que los niveles en los dos lados volverán a estar a la misma altura (Figura 4.3b). El tiempo que le toma al

menisco en el lado capilar pasar las dos marcas de calibración es el tiempo que se mide (con un cronómetro).

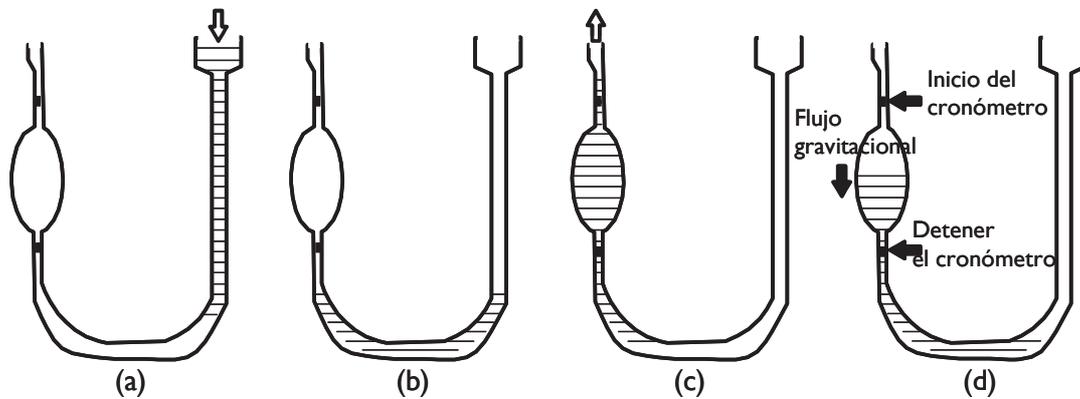


Figura 4.3. Concepto de medición de la viscosidad capilar.

Los viscosímetros capilares que tienen este diseño se llaman viscosímetros Ostwald. En la Figura 4.4 se muestra un viscosímetro Ostwald. El viscosímetro Ostwald fue diseñado en 1885 por el científico alemán ganador del Nobel de química en 1909 Friedrich Wilhelm Ostwald (Bhattacharyya, 2012) (Figura 4.5).



Figura 4.4. Viscosímetro Ostwald.

Fuente: Adaptado de Monotaro (2019) y Poggio *et al.* (2015).



Figura 4.5. Friedrich Wilhelm Ostwald.
Fuente: Oppenheim (2003).

A mediados de la década de 1930, dos profesores de Ingeniería Química de la Universidad Penn State, el Dr. Michael Cannon y el Dr. Merrell R. Fenske (Figura 4.6), trabajaron en un proyecto de investigación del gobierno de los Estados Unidos que caracteriza las propiedades físicas de los productos derivados del petróleo.



Figura 4.6. Dr. Merrell R. Fenske.

Fuente: National Academy of Engineering (2019).

El Dr. Michael Cannon y el Dr. Merrell R. Fenske utilizaron un viscosímetro de vidrio manual Ostwald, común en ese momento, para realizar mediciones de viscosidad cinemática para su proyecto. Pronto, sin embargo, descubrieron errores de medición asociados con el viscosímetro. Descubrieron que incluso la menor inclinación del viscosímetro en el baño de temperatura constante afectaba la precisión de la medición de la viscosidad. El problema se debió a que el depósito de flujo de salida (bulbo más grande del viscosímetro) no estaba en el mismo plano vertical que el bulbo de sincronización (bulbo más pequeño del viscosímetro). Los profesores teorizaron que el problema podría resolverse doblando el viscosímetro a una geometría diferente, por lo que el Dr. Cannon le pidió a la tienda de vidrio de Penn State (que fabricaba cristalería científica para el departamento de química de la universidad) que doblara varios viscosímetros Ostwald en una geometría que él creía que podría eliminar

los problemas de alineación vertical. Después de una prueba y error, el Dr. Cannon probó un viscosímetro prototipo en su laboratorio de Penn State que proporcionó los resultados deseados. Esta nueva geometría del viscosímetro se conoció más tarde como el viscosímetro de rutina Cannon-Fenske. Aunque los profesores no se dieron cuenta en ese momento, el viscosímetro de rutina Cannon-Fenske revolucionaría la medición de la viscosidad cinemática y finalmente conduciría al desarrollo no solo de una empresa, sino de toda una industria. Se ha convertido en el viscosímetro de vidrio manual más utilizado en el mundo. La Cannon Instrument Company (Figura 4.7) se ha ganado el reconocimiento internacional por la calidad de sus productos y servicios relacionados con la viscosidad desde su fundación en 1938 por el científico, inventor y educador Dr. Michael R. Cannon. Este mismo año el Dr. Michael Cannon y el Dr. Merrell Fenske publicaron un artículo científico sobre la medida de la viscosidad (Cannon y Fenske, 1938).



Figura 4.7. La Cannon Instrument Company.
Fuente: Cannon Instrument Company (2019)

El Dr. Cannon, que ya es miembro activo de ASTM D02, llevó su nuevo viscosímetro a una reunión del comité y lo presentó. Muchos colegas expresaron interés en su trabajo y en el viscosímetro Cannon-Fenske. Siempre emprendedor, el Dr. Cannon recolectó los nombres de aquellos interesados en probar el nuevo viscosímetro y regresó a la universidad. Hizo que la tienda de vidrio fabricara más viscosímetros, pero a medida que crecía el interés en su diseño, surgió un problema. La fabricación de los viscosímetros del Dr. Cannon afectó la capacidad de la tienda para fabricar otros aparatos científicos. El Decano de la universidad finalmente le dijo al Dr. Cannon que buscara otra forma de fabricar sus viscosímetros. Según cuenta la historia, el Dr. Cannon fue a su casa y le informó a su esposa que el garaje ya no era para estacionar su automóvil. Subcontrató la producción de los viscosímetros de vidrio, pero realizó la calibración, limpieza y empaque en su propio garaje. Esto marcó el nacimiento de la *Scientific Development Company* para trabajar en proyectos especiales. A medida que pasó el tiempo y su negocio continuó creciendo, el Dr. Cannon contrató a uno de sus estudiantes de posgrado, el Dr. Robert E. Manning (Figura 4.8), para ayudarlo con la calibración, el embalaje y el envío de los viscosímetros de vidrio. Finalmente, el Dr. Cannon también decidió expandir su línea de productos agregando baños de temperatura constante.



Figura 4.8. Dr. Robert E. Manning.
Fuente: Cannon Instrument Company (2017).

En un viscosímetro capilar tipo Cannon-Fenske, que se muestra en la Figura 4.9, permitimos que la fuerza gravitacional proporcione la presión para que el líquido fluya a través del tubo capilar de vidrio.

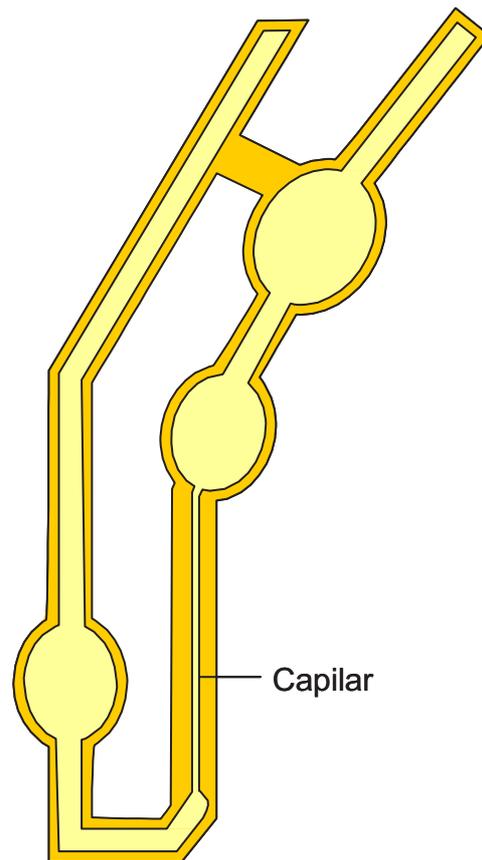


Figura 4.9. Un viscosímetro Cannon-Fenske.
Fuente: Singh y Heldman (2013).

Podemos usar una variación simple de la formulación matemática desarrollada para el viscosímetro de tubo capilar. Al reconocer que la caída de presión necesaria para inducir el flujo es

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{A}$$

[4.3]

o

$$\Delta P = \rho g h$$

[4.4]

donde ρ es la densidad del fluido y h es la altura disponible para la caída libre en el viscosímetro (Figura 4.10). El tamaño del capilar se elige para minimizar el tiempo de flujo de salida para los líquidos viscosos.

y el caudal volumétrico a través del tubo capilar es

$$Q = \frac{\text{Volumen de bulbo}}{\text{Tiempo de descarga}} = \frac{V}{t}$$

[4.5]

entonces, la ecuación [2.5] se convierte en

$$\mu = \frac{\pi \rho g R^4 t}{8V}$$

[4.6]

La ecuación [4.5] ilustra que la viscosidad de un líquido medida por un tubo capilar de vidrio será función del volumen del líquido en el bulbo, la densidad del fluido, la aceleración debida a la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) y la longitud del tubo L . Podemos determinar la viscosidad midiendo el período de tiempo para que el líquido drene del bulbo.

La viscosidad luego se calcula utilizando la expresión anterior para ΔP en la ecuación [4.1] de la siguiente manera:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{ghR^2}{8L\bar{v}}$$

[4.7]

La relación μ/ρ es la viscosidad cinemática.

La unidad más común de viscosidad o viscosidad dinámica es el centipoise, una unidad basada en la fuerza por velocidad. La "unidad base", el poise (100 centipoise por poise) rara vez se usa.

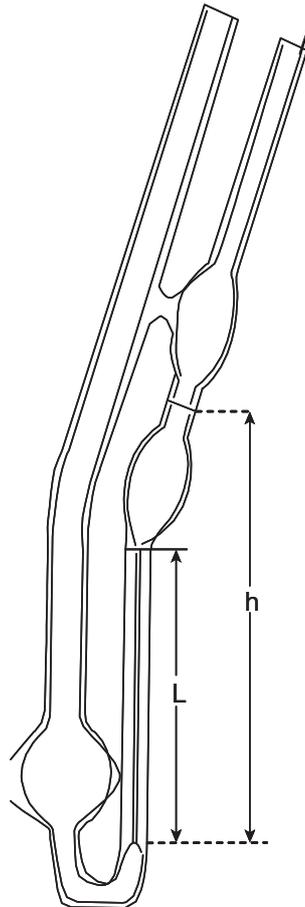


Figura 4.10. Diagrama de un viscosímetro capilar de vidrio que muestra los componentes y parámetros utilizados en el ajuste de los datos del viscosímetro a la ecuación de Poiseuille.

La unidad más común de viscosidad cinemática es el centistokes, cS, centipoise por unidad de densidad. De nuevo, la unidad base, los stokes, S, (100 cS/S), rara vez se usa.

La viscosidad se obtiene desde el momento del flujo de salida del fluido a través del viscosímetro. Para operar el viscosímetro, el fluido es pipeteado en el tubo grande del viscosímetro hasta que la bombilla más baja esté medio llena. El fluido se introduce en el tubo pequeño a aproximadamente la mitad del bulbo superior.

Cuando se libera la succión del tubo pequeño, fluye fluido y se inicia el cronometraje cuando el menisco fluido pasa a través de la primera marca. Cuando el menisco fluido pasa la segunda marca, el tiempo se detiene y se registra el tiempo de salida. La porción inferior del tubo pequeño del viscosímetro es un capilar de radio R y longitud L . Si t_e es el tiempo de flujo de salida, la velocidad promedio v será L/t_e . Sustituyendo en la ecuación [4.7]:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{ghR^2}{8L} t_e$$

[4.8]

Para cada viscosímetro, la longitud y el diámetro del capilar, y la altura disponible para la caída libre, son específicos, por lo tanto, estos factores se pueden agrupar en una constante, k_v , para un viscosímetro particular. La viscosidad cinemática se puede expresar como:

$$\frac{\mu}{\rho} = k_v t_e$$

[4.9]

La constante del viscosímetro se determina a partir del tiempo de flujo de salida de un fluido de viscosidad y densidad conocidas.

4.2. Viscosímetro Cannon-Fenske y viscosímetro Ubbelohde

Los más utilizados son el viscosímetro Cannon-Fenske y el viscosímetro Ubbelohde, y estos son los dos que se describirán aquí.

El viscosímetro Cannon-Fenske que se muestra en la Figura 4.11. El tubo en U tiene una curva en el centro. Hay varios "bulbos" en "U", lo que permite que se pruebe un mayor volumen de líquido y esto también significa una medición de tiempo larga y precisa. Las marcas de sincronización son claramente visibles en la Figura 4.11.

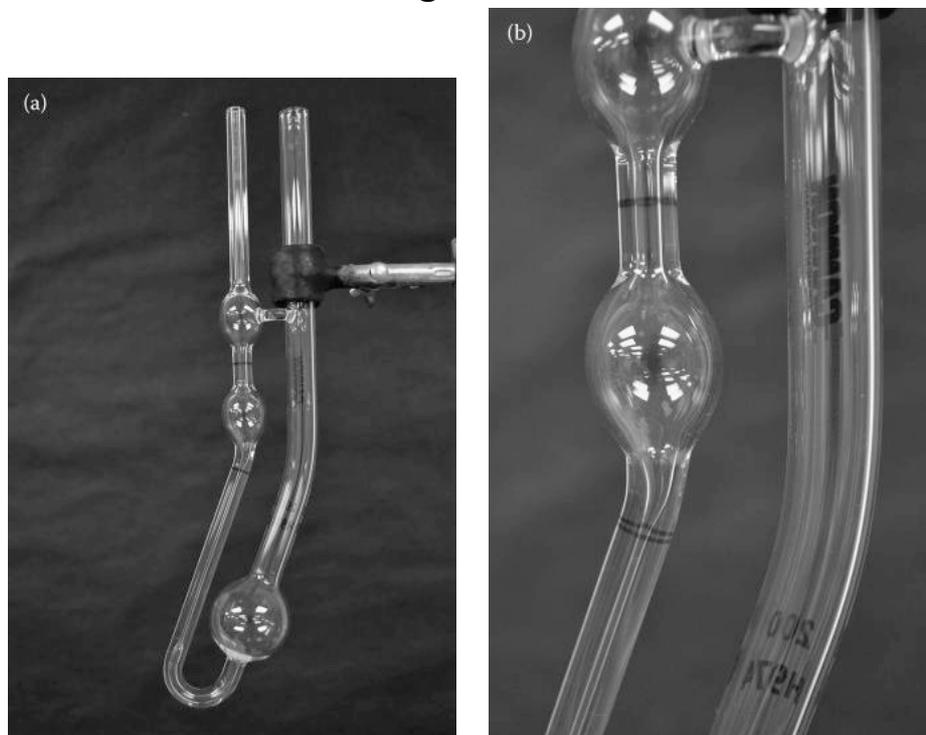


Figura 4.11. (a) Viscosímetro capilar Cannon-Fenske. (b) Vista de primer plano, que muestra las marcas de

sincronización. Tenga en cuenta el estrechamiento del diámetro cerca de la marca de sincronización inferior.

Fuente: Kenkel (2013).

Para Leo Ubbelohde (Figura 4.12), la viscosidad fue una fascinación de por vida. Mientras Ubbelohde inspeccionaba la viscosimetría en general, las limitaciones del dispositivo de Ostwald eran demasiado evidentes: a medida que el nivel del líquido disminuía, disminuía su velocidad en el capilar (lo que requería una corrección de energía cinética) y la diferencia en la curvatura del menisco en la parte superior e inferior. Del capilar introdujo un error sistemático pero indeterminado. Esto significaba usar volúmenes muy precisos; las mediciones en función de la temperatura fueron excepcionalmente tediosas debido a la expansión térmica.

Ubbelohde identificó la forma del líquido en la base del capilar como un parámetro crítico que afecta la velocidad del líquido que emerge del capilar. Al colocar un bulbo con una sección transversal hemisférica precisa debajo del capilar, el líquido fluyó como una película a lo largo de las paredes, cancelando efectivamente las fuerzas capilares. Un segundo bulbo más grande sobre el capilar actuó como el depósito.



Figura 4.12. Leo Ubbelohde.
Fuente: Sella (2017).

Su nuevo viscosímetro era fácil de usar. Se vertió un líquido en el bulbo del depósito inferior y se introdujo en el bulbo por encima del capilar por succión. Luego se registró el tiempo que tarda el líquido en viajar entre las marcas M y M¹ (Figura 4.13). Al ajustar las dimensiones del aparato con extrema precisión, recomendó explícitamente la fabricación comercial (Ubbelohde, 1937; Ubbelohde, 1936), la viscosidad absoluta podría calcularse simplemente multiplicando o dividiendo el tiempo por una potencia de 10. Un conjunto de "Ubbelohdes" de

diferentes tamaños podría medir viscosidades en seis órdenes de magnitud en minutos.

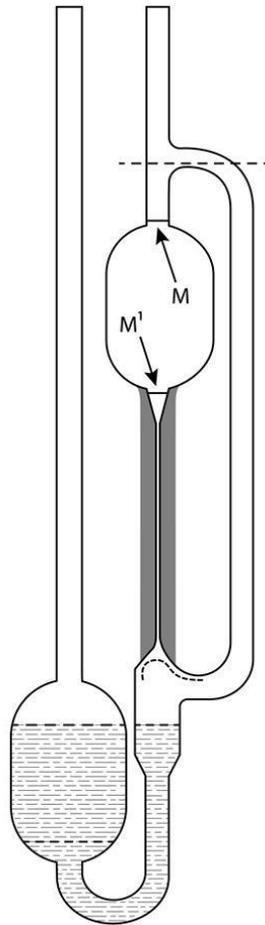


Figura 4.13. Esquema de un viscosímetro Ubbelohde , que muestra las marcas de sincronización M y M¹.

Fuente: Sella (2017).

El viscosímetro Ubbelohde se muestra en la Figura 4.14. En este diseño, la "U" es completamente vertical y, como el viscosímetro Cannon-Fenske, también tiene varias bombillas para contener el fluido. Las marcas de sincronización también son claramente visibles en la Figura 4.14.

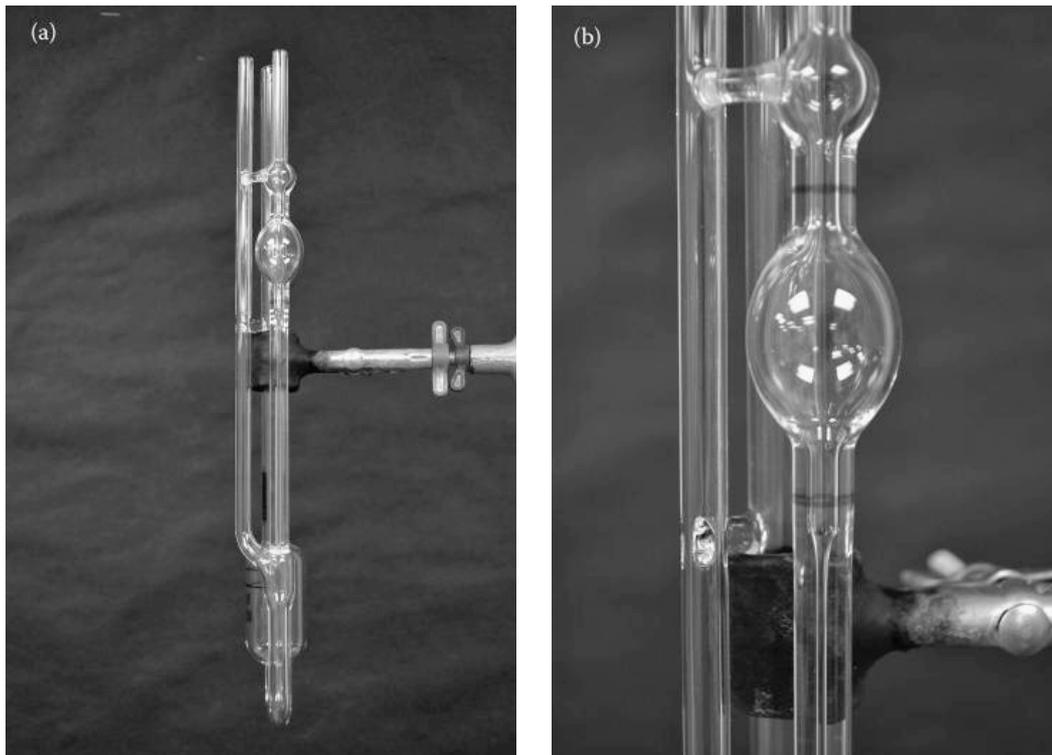


Figura 4.14. (a) Viscosímetro capilar Ubbelohde. (b) Vista de primer plano, que muestra las marcas de sincronización. Fuente: Kenkel (2013).

4.3. Problemas de viscosímetros capilares

Ejemplo 4.1

Se está utilizando un viscosímetro de tubo capilar para medir la viscosidad de la miel a 30°C. El radio del tubo es de 2.5 cm y la longitud es de 25 cm. Se han recopilado los siguientes datos:

ΔP (Pa)	\dot{Q} (cm ³ /s)
10.0	1.25
12.5	1.55
15.0	1.80
17.5	2.05
20.0	2.55

Determinar la viscosidad de la miel a partir de los datos

recogidos.

Dado

Datos necesarios para calcular los valores de viscosidad de la ecuación [4.2], por ejemplo,

$$\Delta P = 10 \text{ Pa}$$

$$R = 2.5 \text{ cm} = 0.025 \text{ m}$$

$$L = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m}$$

$$\dot{Q} = 1.25 \text{ cm}^3/\text{s} = 1.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Enfoque

La viscosidad para cada combinación de diferencia de presión (ΔP) y velocidad de flujo (\dot{Q}) se puede calcular a partir de la ecuación [4.2].

Solución

1. Usando la ecuación [4.2], se puede calcular un valor de viscosidad para cada combinación de ΔP - \dot{Q} ; por ejemplo,

$$\mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L \dot{Q}} = \frac{\pi \cdot 10 \text{ Pa} \cdot (0.025 \text{ m})^4}{8 \cdot 0.25 \text{ m} \cdot (1.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})} = 4.909 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

2. Al repetir el mismo cálculo en cada combinación de ΔP - \dot{Q} , se obtiene la siguiente información:

ΔP (Pa)	\dot{Q} (m ³ /s)	μ (Pa s)
10.0	1.25×10^{-6}	4.909
12.5	1.55×10^{-6}	4.948
15.0	1.80×10^{-6}	5.113
17.5	2.05×10^{-6}	5.238
20.0	2.55×10^{-6}	4.812

3. Aunque existe cierta variabilidad con la presión (ΔP), no

hay indicios de una tendencia constante, y la mejor estimación de la viscosidad sería la media aritmética.

$$\mu = 5.004 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Ejemplo 4.2

Se está utilizando un viscosímetro de tubo capilar para medir la viscosidad de un jugo despectinizado de manzana de 75°Brix a 50°C. El radio del tubo es de 3.1 cm y la longitud es de 20 cm. Los siguientes datos han sido recogidos.

ΔP (Pa)	Q (cm ³ /s)
10	125
12	165
15	180
17.5	200
20	230

Determinar la viscosidad del jugo despectinizado de manzana de 75°Brix a partir de los datos recogidos.

Dado

Datos necesarios para calcular los valores de viscosidad de la ecuación [4.2], por ejemplo,

$$\Delta P = 10 \text{ Pa}$$

$$R = 3.1 \text{ cm} = 0.031 \text{ m}$$

$$L = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$$

$$Q = 125 \text{ cm}^3/\text{s} = 1.25 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Enfoque

La viscosidad para cada combinación de diferencia de

presión (ΔP) y velocidad de flujo (\dot{Q}) se puede calcular a partir de la ecuación [4.2].

Solución

1. Usando la ecuación [4.2], se puede calcular un valor de viscosidad para cada combinación de ΔP - \dot{Q} ; por ejemplo,

$$\mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L \dot{Q}} = \frac{\pi \cdot 10 \text{ Pa} \cdot (0.031 \text{ m})^4}{8 \cdot 0.20 \text{ m} \cdot (1.25 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s})} = 0.145 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

2. Al repetir el mismo cálculo en cada combinación de ΔP - \dot{Q} , se obtiene la siguiente información:

ΔP (Pa)	\dot{Q} (m ³ /s)	μ (Pa s)
10	1.25×10^{-4}	0.145
12	1.65×10^{-4}	0.132
15	1.80×10^{-4}	0.151
17.5	2.00×10^{-4}	0.159
20	2.30×10^{-4}	0.158

3. Aunque existe cierta variabilidad con la presión (ΔP), no hay indicios de una tendencia constante, y la mejor estimación de la viscosidad sería la media aritmética.

$$\mu = 0.149 \text{ Pa} \cdot \text{s} \times \frac{10 \text{ P}}{1 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 1.5 \text{ P}$$

Ejemplo 4.3

Se está utilizando un viscosímetro de tubo capilar para medir la viscosidad de un jugo de naranja filtrado de 18°Brix a 50°C. El radio del tubo es de 3.1 cm y la longitud es de 20 cm. Los siguientes datos han sido recogidos.

ΔP (Pa)	\dot{Q} (cm ³ /s)
10.3	10000
12.5	14000
16	20000
17	23000
20	25000

Determinar la viscosidad del jugo de naranja filtrado de 18°Brix a partir de los datos recogidos.

Dado

Datos necesarios para calcular los valores de viscosidad de la ecuación [4.2], por ejemplo,

$$\Delta P = 10.3 \text{ Pa}$$

$$R = 3.1 \text{ cm} = 0.031 \text{ m}$$

$$L = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$$

$$\dot{Q} = 10000 \text{ cm}^3/\text{s} = 1.00 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

Enfoque

La viscosidad para cada combinación de diferencia de presión (ΔP) y velocidad de flujo (\dot{Q}) se puede calcular a partir de la ecuación [4.2].

Solución

1. Usando la ecuación [4.2], se puede calcular un valor de viscosidad para cada combinación de ΔP - \dot{Q} ; por ejemplo,

$$\mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L \dot{Q}} = \frac{\pi \cdot 10.3 \text{ Pa} \cdot (0.031 \text{ m})^4}{8 \cdot 0.20 \text{ m} \cdot (1.00 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s})} = 0.0019 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

2. Al repetir el mismo cálculo en cada combinación de ΔP - \dot{Q} , se obtiene la siguiente información:

ΔP (Pa)	\dot{Q} (m ³ /s)	μ (Pa s)
-----------------	-------------------------------	--------------

10.3	10000	0.0019
12.5	14000	0.0016
16	20000	0.0015
17	23000	0.0013
20	25000	0.0015

3. Aunque existe cierta variabilidad con la presión (ΔP), no hay indicios de una tendencia constante, y la mejor estimación de la viscosidad sería la media aritmética.

$$\mu = 0.0015 \text{ Pa} \cdot \text{s} \times \frac{10^3 \text{ cP}}{1 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 1.5 \text{ cP}$$

Ejemplo 4.4

Se está utilizando un viscosímetro de tubo capilar para medir la viscosidad de huevo crudo entero con 75% de humedad a 50°C. El radio del tubo es de 2.5 cm y la longitud es de 15.5 cm. Los siguientes datos han sido recogidos.

ΔP (Pa)	Q (cm ³ /s)
12.5	4830
18.5	4900
20.8	5140
22.6	5350
24.5	5680

Determinar la viscosidad de huevo crudo entero con 75% de humedad a partir de los datos recogidos.

Dado

Datos necesarios para calcular los valores de viscosidad de la ecuación [4.2], por ejemplo,

$$\Delta P = 12.5 \text{ Pa}$$

$$R = 2.5 \text{ cm} = 0.025 \text{ m}$$

$$L = 15.5 \text{ cm} = 0.155 \text{ m}$$

$$\dot{Q} = 4830 \text{ cm}^3/\text{s} = 4.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Enfoque

La viscosidad para cada combinación de diferencia de presión (ΔP) y velocidad de flujo (\dot{Q}) se puede calcular a partir de la ecuación [4.2].

Solución

1. Usando la ecuación [4.2], se puede calcular un valor de viscosidad para cada combinación de ΔP - \dot{Q} ; por ejemplo,

$$\mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L \dot{Q}} = \frac{\pi \cdot 12.5 \text{ Pa} \cdot (0.025 \text{ m})^4}{8 \cdot 0.155 \text{ m} \cdot (4.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})} = 0.0026 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

2. Al repetir el mismo cálculo en cada combinación de ΔP - \dot{Q} , se obtiene la siguiente información:

ΔP (Pa)	\dot{Q} (m ³ /s)	μ (Pa s)
12.5	4.83×10^{-3}	0.0026
18.5	4.90×10^{-3}	0.0037
20.8	5.14×10^{-3}	0.0040
22.6	5.35×10^{-3}	0.0042
24.5	5.68×10^{-3}	0.0043

3. Aunque existe cierta variabilidad con la presión (ΔP), no hay indicios de una tendencia constante, y la mejor estimación de la viscosidad sería la media aritmética.

$$\mu = 0.0038 \text{ Pa} \cdot \text{s} \times \frac{10^3 \text{ cP}}{1 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 3.8 \text{ cP}$$

Ejemplo 4.5

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 2 cm de diámetro. La caída de presión es de 330 Pa, la viscosidad del fluido es de 5 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 300 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 2 cm

Longitud del tubo = 300 cm

Caída de presión = 330 Pa

Viscosidad = 5 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0; 0.25; 0.5; 0.75$ y 1 cm.

$r = 0$ cm $v = 0.055$ cm/s

$r = 0.25$ cm $v = 0.0516$ cm/s

$r = 0.5$ cm $v = 0.0413$ cm/s

$r = 0.75$ cm $v = 0.0241$ cm/s

$r = 1$ cm $v = 0$ cm/s

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.1.

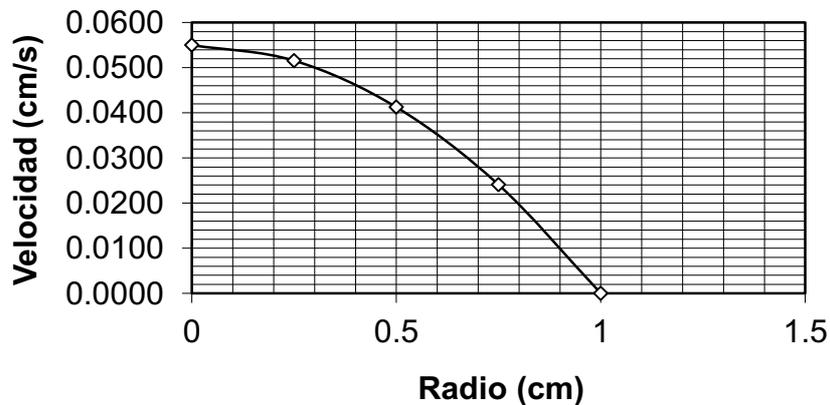


Figura E4.1. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.0275 cm/s; este valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$\bar{v} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.055 \text{ cm/s}}{2} = 0.0275 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.6

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 3 cm de diámetro. La caída de presión es de 350 Pa, la viscosidad del fluido es de 4 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 250 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 3 cm

Longitud del tubo = 250 cm

Caída de presión = 350 Pa

Viscosidad = 4 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0; 0.375; 0.75; 1.125$ y 1.5 cm.

$r = 0$ cm $v = 0.1969$ cm/s

$r = 0.375$ cm $v = 0.1846$ cm/s

$r = 0.75$ cm $v = 0.1477$ cm/s

$r = 1.125$ cm $v = 0.0861$ cm/s

$r = 1.5$ cm $v = 0$ cm/s

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.2.

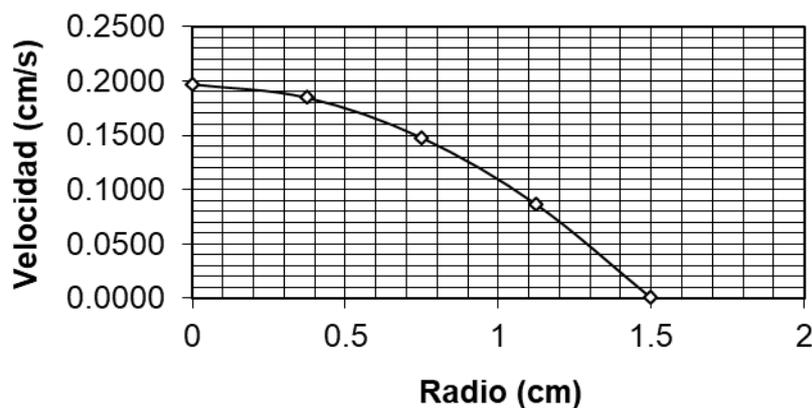


Figura E4.2. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.0984 cm/s; este valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$v = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.1969 \text{ cm/s}}{2} = 0.0984 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.7

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 4 cm de diámetro. La caída de presión es de 380 Pa, la viscosidad del fluido es de 7 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 600 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 4 cm

Longitud del tubo = 600 cm

Caída de presión = 380 Pa

Viscosidad = 7 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0; 0.5; 1; 1.5$ y 2 cm.

$r = 0$ cm $v = 0.0905$ cm/s

$r = 0.5$ cm $v = 0.0848$ cm/s

$r = 1$ cm $v = 0.0679$ cm/s

$$r = 1.5 \text{ cm} \quad v = 0.0396 \text{ cm/s}$$

$$r = 2 \text{ cm} \quad v = 0 \text{ cm/s}$$

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.3.

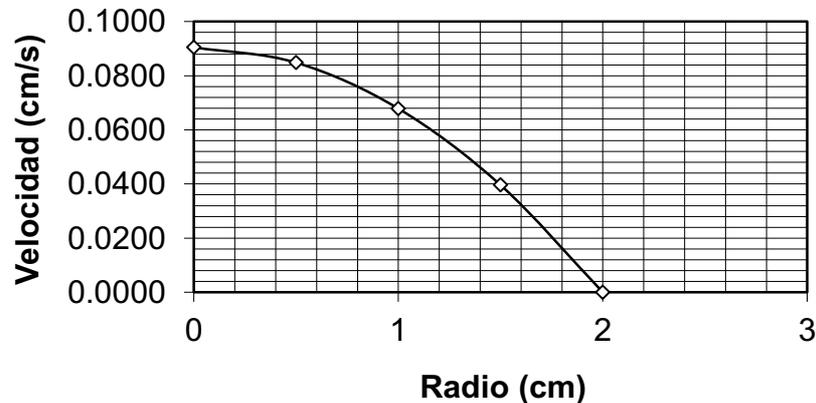


Figura E4.3. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.0452 cm/s; este valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$\bar{v} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.0905 \text{ cm/s}}{2} = 0.0452 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.8

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 5 cm de diámetro. La caída de presión es de 450 Pa, la viscosidad del fluido es de 10 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 700 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 5 cm

Longitud del tubo = 700 cm

Caída de presión = 450 Pa

Viscosidad = 10 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0; 0.625; 1.25; 1.875$ y 2.5 cm.

$r = 0$ cm $v = 0.1004$ cm/s

$r = 0.625$ cm $v = 0.0942$ cm/s

$r = 1.25$ cm $v = 0.0753$ cm/s

$r = 1.875$ cm $v = 0.0439$ cm/s

$r = 2.5$ cm $v = 0$ cm/s

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.4.

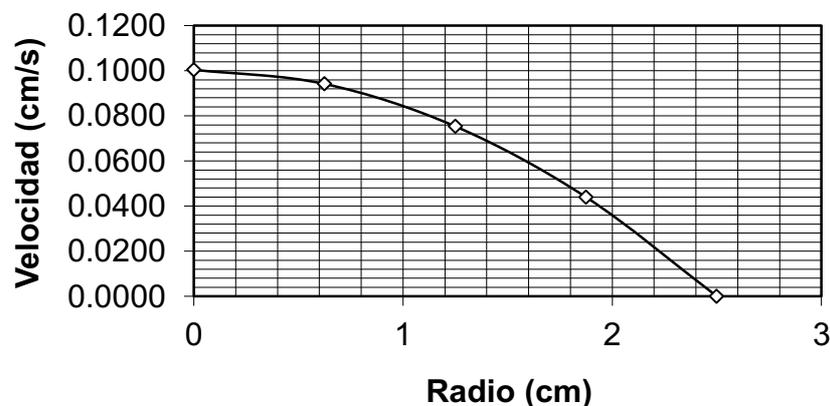


Figura E4.4. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.0502 cm/s; este

valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$v = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.1004 \text{ cm/s}}{2} = 0.0502 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.9

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 2.5 cm de diámetro. La caída de presión es de 345 Pa, la viscosidad del fluido es de 6 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 390 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 2.5 cm

Longitud del tubo = 390 cm

Caída de presión = 345 Pa

Viscosidad = 6 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0; 0.3125; 0.625; 0.9375$ y 1.25 cm.

$r = 0 \text{ cm } v = 0.0576 \text{ cm/s}$
 $r = 0.3125 \text{ cm } v = 0.054 \text{ cm/s}$
 $r = 0.625 \text{ cm } v = 0.0432 \text{ cm/s}$
 $r = 0.9375 \text{ cm } v = 0.0252 \text{ cm/s}$
 $r = 1.25 \text{ cm } v = 0 \text{ cm/s}$

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.5.

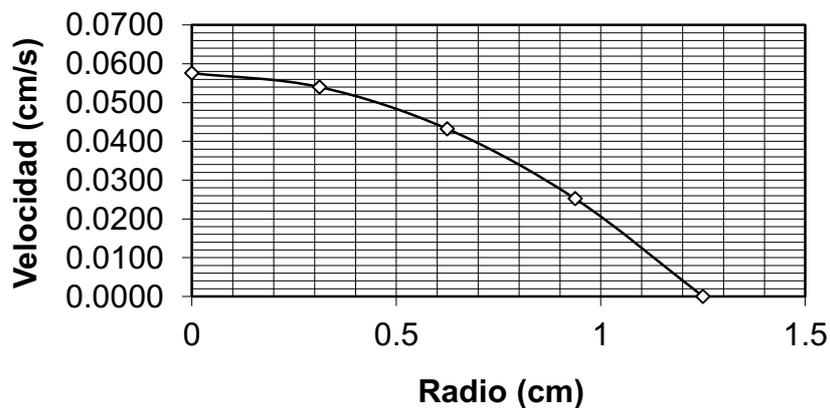


Figura E4.5. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.0288 cm/s ; este valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$\bar{v} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.0576 \text{ cm/s}}{2} = 0.0288 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.10

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 6 cm de diámetro. La caída de presión es de 240 Pa, la viscosidad del fluido es de 12 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 500 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 6 cm

Longitud del tubo = 500 cm

Caída de presión = 240 Pa

Viscosidad = 12 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0; 0.75; 1.5; 2.25$ y 3 cm.

$r = 0$ cm $v = 0.09$ cm/s

$r = 0.75$ cm $v = 0.0844$ cm/s

$r = 1.5$ cm $v = 0.0675$ cm/s

$r = 2.25$ cm $v = 0.0394$ cm/s

$r = 3$ cm $v = 0$ cm/s

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.6.

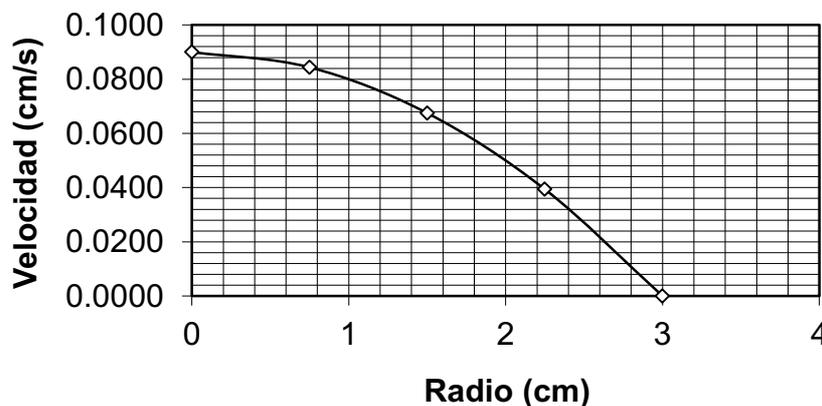


Figura E4.6. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.045 cm/s; este valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$v = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.09 \text{ cm/s}}{2} = 0.045 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.11

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 8 cm de diámetro. La caída de presión es de 250 Pa, la viscosidad del fluido es de 14 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 450 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 8 cm

Longitud del tubo = 450 cm

Caída de presión = 250 Pa

Viscosidad = 14 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0, 1, 2, 3$ y 4 cm.

$r = 0$ cm $v = 0.1587$ cm/s

$r = 1$ cm $v = 0.1488$ cm/s

$r = 2$ cm $v = 0.1190$ cm/s

$r = 3$ cm $v = 0.0694$ cm/s

$r = 4$ cm $v = 0$ cm/s

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.7.

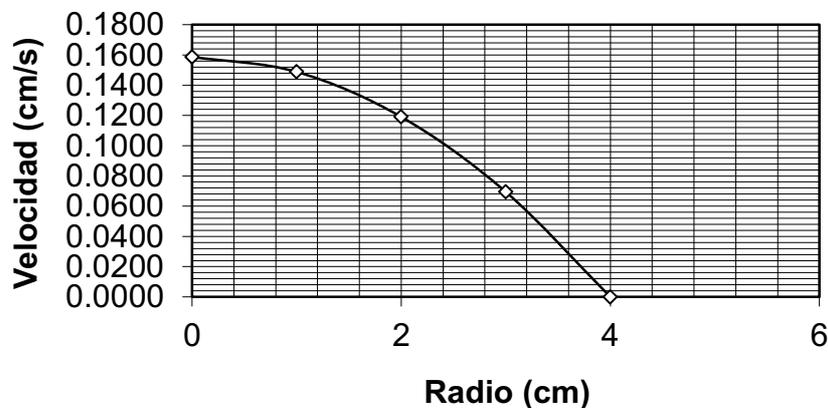


Figura E4.7. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.0794 cm/s; este valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$\bar{v} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.1587 \text{ cm/s}}{2} = 0.0794 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.12

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 6.5 cm de diámetro. La caída de presión es de 240 Pa, la viscosidad del fluido es de 7.5 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 400 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y

construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 6.5 cm

Longitud del tubo = 400 cm

Caída de presión = 240 Pa

Viscosidad = 7.5 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0$; 0.8125; 1.625; 2.4375 y 3.25 cm.

$r = 0$ cm $v = 0.2113$ cm/s

$r = 0.8125$ cm $v = 0.198$ cm/s

$r = 1.625$ cm $v = 0.1584$ cm/s

$r = 2.4375$ cm $v = 0.0924$ cm/s

$r = 3.25$ cm $v = 0$ cm/s

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.8.

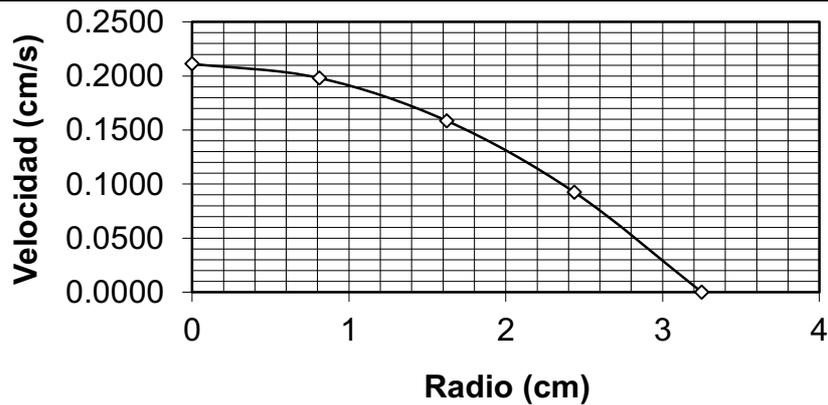


Figura E4.8. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.1056 cm/s; este valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$\bar{v} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.2113 \text{ cm/s}}{2} = 0.1056 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.13

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 3.5 cm de diámetro. La caída de presión es de 350 Pa, la viscosidad del fluido es de 6 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 250 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 3.5 cm

Longitud del tubo = 250 cm

Caída de presión = 350 Pa

Viscosidad = 6 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en

diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0; 0.4375; 0.875; 1.3125$ y 1.75 cm.

$$r = 0 \text{ cm } v = 0.1786 \text{ cm/s}$$

$$r = 0.4375 \text{ cm } v = 0.1675 \text{ cm/s}$$

$$r = 0.875 \text{ cm } v = 0.134 \text{ cm/s}$$

$$r = 1.3125 \text{ cm } v = 0.0782 \text{ cm/s}$$

$$r = 1.75 \text{ cm } v = 0 \text{ cm/s}$$

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.9.

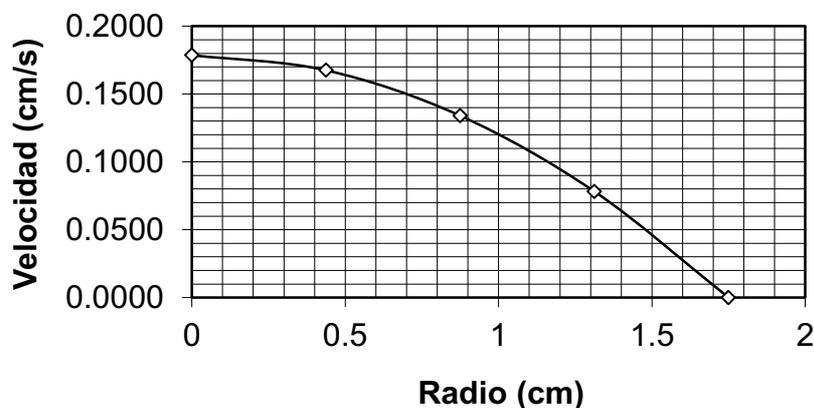


Figura E4.9. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.0893 cm/s; este valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$\bar{v} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.1786 \text{ cm/s}}{2} = 0.0893 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.14

Un fluido fluye en un tubo cilíndrico de 3.6 cm de diámetro. La caída de presión es de 450 Pa, la viscosidad del fluido es de 7.8 Pa s, y la tubería tiene una longitud de 350 cm. Calcule la velocidad media y la velocidad del fluido en diferentes ubicaciones radiales en la tubería y construya su perfil de velocidad.

Dado

Diámetro de la tubería = 3.6 cm

Longitud del tubo = 350 cm

Caída de presión = 450 Pa

Viscosidad = 7.8 Pa s

Enfoque

Usaremos la ecuación [3.3] para calcular la velocidad en diferentes ubicaciones radiales.

Solución

1. De la ecuación [3.3]

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

La velocidad se calcula a $r = 0; 0.45; 0.9; 1.35$ y 1.8 cm.

$r = 0$ cm $v = 0.1335$ cm/s

$r = 0.45$ cm $v = 0.1252$ cm/s

$r = 0.9$ cm $v = 0.1001$ cm/s

$r = 1.35$ cm $v = 0.0584$ cm/s

$r = 1.8$ cm $v = 0$ cm/s

2. El perfil de velocidad se muestra en la Figura E4.10.

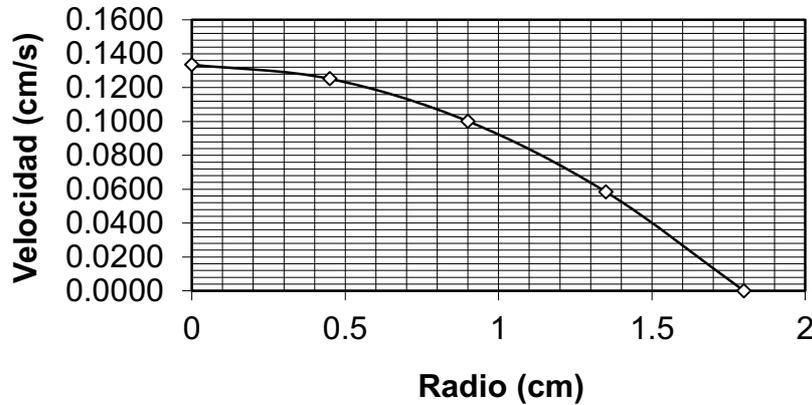


Figura E4.10. Perfil de velocidad del fluido.

3. La velocidad media se calcula como 0.0668 cm/s; este valor es la mitad de la velocidad máxima.

$$\bar{v} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} = \frac{0.1335 \text{ cm/s}}{2} = 0.0668 \text{ cm/s}$$

Ejemplo 4.15

Se sabe que un líquido de calibración dado tiene una viscosidad cinemática de 15.61 cS a 25°C. La prueba de este líquido en un viscosímetro capilar dio un tiempo de 139 s. Luego se probó un líquido desconocido con el mismo viscosímetro y se encontró que daba un tiempo de 238 s. ¿Cuál es la viscosidad cinemática del líquido desconocido?

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad cinemática del líquido desconocido,

$$\nu = 15.61 \text{ cS}$$

$$t = 139 \text{ s}$$

$$t_e = 238 \text{ s}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución

Para un viscosímetro particular, la constante, k_v , del capilar se puede calcular

$$k_v = \frac{15.61 \text{ cS}}{139 \text{ s}} = 0.112 \text{ cS/s}$$

Entonces se puede calcular la viscosidad del líquido desconocido usando la ecuación [4.9]

$$\nu = k_v t_e = 0.112 \text{ cS/s} \times 238 \text{ s} = 26.7 \text{ cS}$$

Ejemplo 4.16

Se sabe que un líquido de calibración dado tiene una viscosidad cinemática de 13.62 cS a 25°C. La prueba de este líquido en un viscosímetro capilar dio un tiempo de 128 s. Luego se probó un líquido desconocido con el mismo viscosímetro y se encontró que daba un tiempo de 235 s. ¿Cuál es la viscosidad cinemática del líquido desconocido?

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad cinemática del

líquido desconocido,

$$\nu = 13.62 \text{ cS}$$

$$t = 128 \text{ s}$$

$$t_e = 235 \text{ s}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución

Para un viscosímetro particular, la constante, k_v , del capilar se puede calcular

$$k_v = \frac{13.62 \text{ cS}}{128 \text{ s}} = 0.106 \text{ cS/s}$$

Entonces se puede calcular la viscosidad del líquido desconocido usando la ecuación [4.9]

$$\nu = k_v t_e = 0.106 \text{ cS/s} \times 235 \text{ s} = 25 \text{ cS}$$

Ejemplo 4.17

Se sabe que un líquido de calibración dado tiene una viscosidad cinemática de 14.52 cS a 25°C. La prueba de este líquido en un viscosímetro capilar dio un tiempo de 143 s. Luego se probó un líquido desconocido con el mismo viscosímetro y se encontró que daba un tiempo de 256 s. ¿Cuál es la viscosidad cinemática del líquido desconocido?

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad cinemática del líquido desconocido,

$$\nu = 14.52 \text{ cS}$$

$$t = 143 \text{ s}$$

$$t_e = 256 \text{ s}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución

Para un viscosímetro particular, la constante, k_v , del capilar se puede calcular

$$k_v = \frac{14.52 \text{ cS}}{143 \text{ s}} = 0.102 \text{ cS/s}$$

Entonces se puede calcular la viscosidad del líquido desconocido usando la ecuación [4.9]

$$\nu = k_v t_e = 0.102 \text{ cS/s} \times 256 \text{ s} = 26 \text{ cS}$$

Ejemplo 4.18

Se sabe que un líquido de calibración dado tiene una viscosidad cinemática de 10.52 cS a 25°C. La prueba de este líquido en un viscosímetro capilar dio un tiempo de 156 s. Luego se probó un líquido desconocido con el mismo viscosímetro y se encontró que daba un tiempo de 346 s. ¿Cuál es la viscosidad cinemática del líquido

desconocido?

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad cinemática del líquido desconocido,

$$v = 10.52 \text{ cS}$$

$$t = 156 \text{ s}$$

$$t_e = 346 \text{ s}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución

Para un viscosímetro particular, la constante, k_v , del capilar se puede calcular

$$k_v = \frac{10.52 \text{ cS}}{156 \text{ s}} = 0.067 \text{ cS/s}$$

Entonces se puede calcular la viscosidad del líquido desconocido usando la ecuación [4.9]

$$v = k_v t_e = 0.067 \text{ cS/s} \times 346 \text{ s} = 23.3 \text{ cS}$$

Ejemplo 4.19

Se sabe que un líquido de calibración dado tiene una viscosidad cinemática de 12.51 cS a 25°C. La prueba de este líquido en un viscosímetro capilar dio un tiempo de 168 s. Luego se probó un líquido desconocido con el

mismo viscosímetro y se encontró que daba un tiempo de 259 s. ¿Cuál es la viscosidad cinemática del líquido desconocido?

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad cinemática del líquido desconocido,

$$\nu = 12.51 \text{ cS}$$

$$t = 168 \text{ s}$$

$$t_e = 259 \text{ s}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución

Para un viscosímetro particular, la constante, k_v , del capilar se puede calcular

$$k_v = \frac{12.51 \text{ cS}}{168 \text{ s}} = 0.074 \text{ cS/s}$$

Entonces se puede calcular la viscosidad del líquido desconocido usando la ecuación [4.9]

$$\nu = k_v t_e = 0.074 \text{ cS/s} \times 259 \text{ s} = 19.3 \text{ cS}$$

Ejemplo 4.20

Se sabe que un líquido de calibración dado tiene una viscosidad cinemática de 13.71 cS a 25°C. La prueba de

este líquido en un viscosímetro capilar dio un tiempo de 221 s. Luego se probó un líquido desconocido con el mismo viscosímetro y se encontró que daba un tiempo de 234 s. ¿Cuál es la viscosidad cinemática del líquido desconocido?

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad cinemática del líquido desconocido,

$$v = 13.71 \text{ cS}$$

$$t = 221 \text{ s}$$

$$t_e = 234 \text{ s}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución

Para un viscosímetro particular, la constante, k_v , del capilar se puede calcular

$$k_v = \frac{13.71 \text{ cS}}{221 \text{ s}} = 0.062 \text{ cS/s}$$

Entonces se puede calcular la viscosidad del líquido desconocido usando la ecuación [4.9]

$$v = k_v t_e = 0.062 \text{ cS/s} \times 234 \text{ s} = 14.5 \text{ cS}$$

Ejemplo 4.21

Un viscosímetro capilar de vidrio cuando se usa en un fluido con una viscosidad de 10 cP permitió que el fluido fluyera en 1.5 minutos. Este mismo viscosímetro utilizado en otro fluido permitió un tiempo de flujo de salida de 2.5 minutos. Si las densidades de los dos fluidos son las mismas, calcule la viscosidad del segundo fluido.

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad o viscosidad dinámica del segundo fluido,

$$\mu = 10 \text{ cP}$$

$$t_e = 1.5 \text{ min}$$

$$t_{e2} = 2.5 \text{ min}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución:

Usando la ecuación [4.9] para resolver la constante del viscosímetro:

$$k_v = \frac{\mu}{\rho t_e} = \frac{10 \text{ cP}}{\rho \times 1.5 \text{ min}}$$

Para el segundo fluido:

$$\mu = \rho \left[\frac{10 \text{ cP}}{\rho \times 1.5 \text{ min}} \right] [2.5 \text{ min}] = 16.67 \text{ cP}$$

Ejemplo 4.22

Un viscosímetro capilar de vidrio cuando se usa en un fluido con una viscosidad de 11 cP permitió que el fluido fluyera en 2.5 minutos. Este mismo viscosímetro utilizado en otro fluido permitió un tiempo de flujo de salida de 3.5 minutos. Si las densidades de los dos fluidos son las mismas, calcule la viscosidad del segundo fluido.

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad o viscosidad dinámica del segundo fluido,

$$\mu = 11 \text{ cP}$$

$$t_e = 2.5 \text{ min}$$

$$t_{e2} = 3.5 \text{ min}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución:

Usando la ecuación [4.9] para resolver la constante del viscosímetro:

$$k_v = \frac{\mu}{\rho t_e} = \frac{11 \text{ cP}}{\rho \times 2.5 \text{ min}}$$

Para el segundo fluido:

$$\mu = \rho \left[\frac{11 \text{ cP}}{\rho \times 2.5 \text{ min}} \right] [3.5 \text{ min}] = 15.40 \text{ cP}$$

Ejemplo 4.23

Un viscosímetro capilar de vidrio cuando se usa en un fluido con una viscosidad de 15 cP permitió que el fluido fluyera en 4.5 minutos. Este mismo viscosímetro utilizado en otro fluido permitió un tiempo de flujo de salida de 6.5 minutos. Si las densidades de los dos fluidos son las mismas, calcule la viscosidad del segundo fluido.

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad o viscosidad dinámica del segundo fluido,

$$\mu = 15 \text{ cP}$$

$$t_e = 4.5 \text{ min}$$

$$t_{e2} = 6.5 \text{ min}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución:

Usando la ecuación [4.9] para resolver la constante del viscosímetro:

$$k_v = \frac{\mu}{\rho t_e} = \frac{15 \text{ cP}}{\rho \times 4.5 \text{ min}}$$

Para el segundo fluido:

$$\mu = \rho \left[\frac{15 \text{ cP}}{\rho \times 4.5 \text{ min}} \right] [6.5 \text{ min}] = 21.67 \text{ cP}$$

Ejemplo 4.24

Un viscosímetro capilar de vidrio cuando se usa en un fluido con una viscosidad de 18 cP permitió que el fluido fluyera en 2.5 minutos. Este mismo viscosímetro utilizado en otro fluido permitió un tiempo de flujo de salida de 5.5 minutos. Si las densidades de los dos fluidos son las mismas, calcule la viscosidad del segundo fluido.

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad o viscosidad dinámica del segundo fluido,

$$\mu = 18 \text{ cP}$$

$$t_e = 2.5 \text{ min}$$

$$t_{e2} = 5.5 \text{ min}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución:

Usando la ecuación [4.9] para resolver la constante del viscosímetro:

$$k_v = \frac{\mu}{\rho t_e} = \frac{18 \text{ cP}}{\rho \times 2.5 \text{ min}}$$

Para el segundo fluido:

$$\mu = \rho \left[\frac{18 \text{ cP}}{\rho \times 2.5 \text{ min}} \right] [5.5 \text{ min}] = 39.6 \text{ cP}$$

Ejemplo 4.25

Un viscosímetro capilar de vidrio cuando se usa en un fluido con una viscosidad de 8 cP permitió que el fluido fluyera en 2.5 minutos. Este mismo viscosímetro utilizado en otro fluido permitió un tiempo de flujo de salida de 4.5 minutos. Si las densidades de los dos fluidos son las mismas, calcule la viscosidad del segundo fluido.

Dado

Datos necesarios para calcular la viscosidad o viscosidad dinámica del segundo fluido,

$$\mu = 8 \text{ cP}$$

$$t_e = 2.5 \text{ min}$$

$$t_{e2} = 4.5 \text{ min}$$

Enfoque

Primero, la constante de calibración del viscosímetro se determina a partir de los datos de calibración y luego la viscosidad del líquido desconocido con la ecuación [4.9]

Solución:

Usando la ecuación [4.9] para resolver la constante del viscosímetro:

$$k_v = \frac{\mu}{\rho t_e} = \frac{8 \text{ cP}}{\rho \times 2.5 \text{ min}}$$

Para el segundo fluido:

$$\mu = \rho \left[\frac{8 \text{ cP}}{\rho \times 2.5 \text{ min}} \right] [4.5 \text{ min}] = 14.4 \text{ cP}$$

Bibliografía

- Bhattacharyya, P. (2012). Wilhelm Ostwald–The scientist. *Resonance* 17(5).
- Cannon Instrument Company. (2017). In memory of Dr. Robert E. Manning. <https://www.cannoninstrument.com/en/news/2017/March/dr-manning-memorial-service--206>. Accessed 30 Nov 2019.
- Cannon Instrument Company. (2019). CAV® 4.2 Dual-Bath Kinematic Viscometer. <https://www.cannoninstrument.com/en/image/getthumbnail/1450>. Accessed 30 Nov 2019.
- Cannon, M.R., Fenske, M.R. (1938). Viscosity Measurement. *Industrial and Engineering Chemistry Analytical Edition*, 10(6), 297–301.
- Fundamentals of Food Process Engineering
- Kenkel, J. (2013). *Analytical chemistry for technicians*. Fourth Edition. CRC Press.
- Monotaro. (2019). Ostwald viscometer. <https://d10b75yp86lc36.cloudfront.net/Monotaro3/pi/full/mono33230976-100112-02.jpg>. Accessed 27 Nov 2019.
- National Academy of Engineering. (2019). Merrell R. Fenske. <https://www.nae.edu/File.aspx?id=34544&v=9d1abbd0>. Accessed 30 Nov 2019.

- Oppenheim, C. (2003). Newspaper Copyright Developments: A European Union and United Kingdom perspective. *IFLA Journal* 29(4):317-320.
- Poggio, C., Ceci, M., Beltrami, R., Colombo, M., Dagna, A. (2015). Viscosity of endodontic irrigants: Influence of temperature. *Dental Research Journal* 12:425-30.
- Sella, A. (2017). Ubbelohde's viscometer. Measuring viscosity is a sticky subject. Royal Society of Chemistry.
- Singh, R.P.,Heldman, D.R. (2013). Introduction to food engineering. 5th Edition. Academic Press.
- Ubbelohde, L. (1936). Viscosimeter. US Patent US2048305A.
- Ubbelohde, L. (1937). The principle of the suspended level: applications to the measurement of viscosity and other properties of liquids. *Industrial and Engineering Chemistry Analytical Edition*, 9(2), 85–90.



William Rolando Miranda-Zamora
 Universidad Nacional de Frontera
<https://orcid.org/0000-0002-0829-2568>
 wmiranda@unf.edu.pe
 Investigador CONCYTEC. Profesor Asociado de la UNF, Sullana, Piura, Perú. Exprofesor de la Universidad Nacional de Piura. Doctor en Ingeniería Industrial (UNP), Maestro en Agricultura Sostenible (UNP), Ingeniero Agroindustrial e Industrias Alimentarias (UNP) y Estudios de Maestría en Tecnología de Alimentos (UNALM). Con gran trayectoria en investigación en el área de la ingeniería de los alimentos con énfasis en el tratamiento térmico



Diana Lastenia Espinoza Valdiviezo
 Universidad Nacional de Frontera
<https://orcid.org/0000-0003-4866-0035>
 dianaespinozaveld@gmail.com
 Bachiller en Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Frontera. Preparada para enfrentar retos profesionales, con sólidos y modernos conocimientos técnicos, gran capacidad de creatividad, adaptación, iniciativa y energía para proponer y establecer objetivos innovadores que promuevan el cambio y el crecimiento. Proactiva y con gran facilidad para las relaciones interpersonales.



Manuel Jesús Sánchez Chero
 Universidad Nacional de Frontera
<https://orcid.org/0000-0003-1646-3037>
 msanchezch@unf.edu.pe
 Ingeniero de Sistemas, Magister en docencia universitaria, doctorado en educación, Docente Asociado adscrito a la Facultad de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Frontera, Investigador Renacyt con registro P0011796, en el grupo de Carlos Monge Medrano, Nivel III. Con amplia experiencia en publicaciones y proyectos de investigación en el área de Ingeniería.



Hans Himbler Minchán Velayarce
 Universidad Nacional de Jaén
<https://orcid.org/0000-0001-9033-9734>
 hans_minchan@unj.edu.pe
 Ingeniero en Industrias Alimentarias (UNPRG), Magister en Agronegocios (Universidad AUSTRAL), Exprofesor de la Universidad Nacional de Frontera, Sullana (UNF). Docente Auxiliar adscrito a la Facultad de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Jaén (UNJ). Investigador principal y coinvestigador en proyectos del Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura. Con amplia experiencia en investigación en el área de Ciencia y Tecnología de los Alimentos.



Juan Antonio Ticona Yujra
 Universidad Nacional de Jaén
<https://orcid.org/0000-0003-3348-0621>
 jticonay@unj.edu.pe
 Ingeniero Pesquero (UNJBG), Magister en Gestión de la Calidad e Inocuidad de Alimentos (UNPRG), Ex docente de la Universidad Nacional de Jaén, Ex docente de la Universidad Nacional de Moquegua. Investigador principal en proyectos del Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura, Consultor externo en empresas privadas relacionado a ISO 9001, ISO 22000 en alimentos y con amplia experiencia en investigación en el área de Ciencia y Tecnología de los Alimentos.



Juan de Dios Mendoza Seclén
 Universidad Nacional de Jaén
<https://orcid.org/0000-0002-5096-4604>
 juan.mendoza@unj.edu.pe
 Ingeniero en Industrias Alimentarias (UNAS), Magister en Proyectos de Inversión (UNPRG), Ex docente de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque. Docente Auxiliar adscrito a la Facultad de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Jaén (UNJ). Con amplia experiencia en el área de Panificación Industrial, Ciencia y Tecnología de los Alimentos.



José Arturo Rodríguez Kong
 Universidad Señor de Sipán
<https://orcid.org/0000-0002-9526-8231>
 Arturokong@gmail.com
 Ingeniero Industrial de la Universidad Privada del Norte, Maestría en Ciencias Económicas mención en Gestión Empresarial, estudios concluidos del Doctorado en Administración de la Universidad Nacional de Trujillo. Especialización en Gestión del Talento Humano, Diplomado en Estrategias didácticas en la enseñanza de educación superior en la Universidad Nacional de Trujillo. Docente Universitario con amplia experiencia en proyectos de investigación y publicaciones científicas.



ISBN: 978-9942-8957-5-2

