

## Determinación del módulo de Young

## Determination of Young's modulus

Martín Ortiz-Domínguez<sup>a</sup>, Arturo Cruz-Avilés<sup>b</sup>

---

### Abstract:

In this laboratory practice, the deflection of a beam with rectangular geometry, when a load is applied at the end of the cantilever beam, is determined through the differential equation of the elasticity of a beam, to determine Young's modulus.

### Keywords:

Young's modulus, deflection, radius of curvature, maximum normal stress.

---

### Resumen:

En la presente práctica de laboratorio se determina la deflexión de una viga con geometría rectangular, cuando se aplica una carga en el extremo de la viga en voladizo, a través de la ecuación diferencial de la elástica de una viga, para determinar el módulo de Young.

### Palabras Clave:

Módulo de Young, deflexión, radio de curvatura, esfuerzo normal máximo

---

### Introducción

El módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Es uno de los métodos más extendidos para conocer la elasticidad de un material. Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero: si se flexiona una viga, aumenta la deformación. Tanto el módulo de Young como el límite elástico son distintos para los diversos

materiales. El módulo de elasticidad es una constante elástica que, al igual que el límite elástico, puede encontrarse empíricamente mediante ensayo de tracción del material o deflexión. Además de este módulo de elasticidad longitudinal, puede definirse el módulo de elasticidad transversal de un material (Módulo de cizalla).

Para entender el funcionamiento de los ensayos de deflexión y aprovechar al máximo las posibilidades de la viga en voladizo, debemos conocer todos y cada uno de los métodos a utilizar para obtener nuestros objetivos de una forma óptima. En este caso, el módulo de Young hace referencia al científico Thomas Young, quien estudió este concepto durante el siglo XIX. Sin embargo, el método fue desarrollado hasta 1727 por Leonhard Euler

---

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Escuela Superior de Ciudad Sahagún, UAEH, Tepeapulco, Hidalgo, México, ORCID: 0000-0003-4475-9804, Email: martin\_ortiz@uaeh.edu.mx;

<sup>b</sup> Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Escuela Superior de Ciudad Sahagún, UAEH, Tepeapulco, Hidalgo, México, ORCID: 0000-0003-0455-1646, Email: arturo\_cruz8085@uaeh.edu.mx;

y no se puso en práctica su forma actual hasta 1782 cuando Giordani Riccati realizó los primeros experimentos. Una parte importante en la mecánica de sólidos es el estudio de la flexión, propagación de grietas y pandeo de vigas, que son cuerpos sólidos alargados (longitud mucho mayor que el ancho) con sección transversal recta y constante. Las estructuras son deformadas cuando se aplica un esfuerzo, y dichos esfuerzos son originados por cargas de origen estático, dinámico, térmico, hidrodinámico, etc. Para deducir el módulo de Young, es necesario considerar el esquema de una viga rectangular en voladizo de sección rectangular se presenta en la Figura 1. (Beléndez, et al., 2002; Beléndez, et al. 2002; Cengel & Cimbala, 2006; Gere & Timoshenko, 1998; Gere, 2002; Sthymoorthy, 1998; Timoshenko y Goodier, 1998)

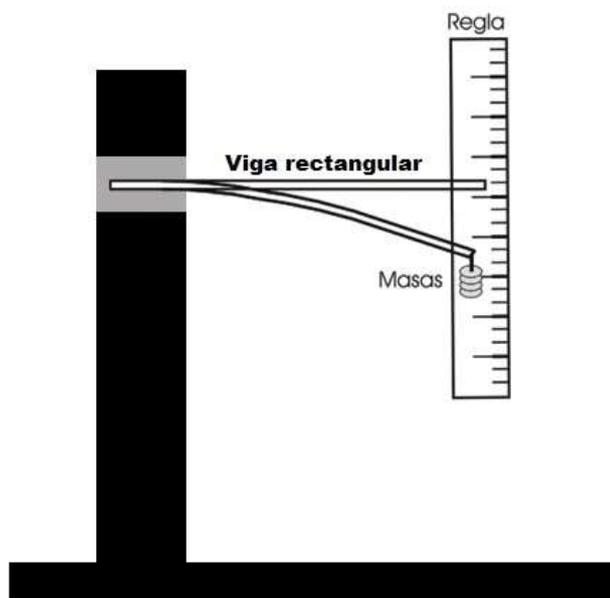


Figura 1. Flexión de una viga en voladizo de sección rectangular cuando se le aplica una carga concentrada en el extremo libre.

Fuente: Elaboración propia.

### Objetivo general

Determinar la deflexión de una viga con geometría rectangular, cuando se aplica una carga en el extremo de la viga en voladizo, a través de la ecuación diferencial de la elástica de una viga, para determinar el módulo de Young.

### Objetivos específicos

- Determinar la deformación unitaria longitudinal normal ( $\varepsilon = c / \rho$ ), a través de la deflexión de un elemento diferencial de una viga, para determinar la el esfuerzo normal máximo causado por la flexión  $\sigma_{m\acute{a}x} = Mc / I$ .
- Determinar la ecuación diferencial de la elástica de una viga ( $d^2y / dx^2 = M / EI$ ), empleando el esfuerzo normal máximo y el radio de curvatura en la longitud de arco  $ds$ , para determinar la deflexión de la viga.

### Aplicaciones prácticas

#### Estudios de deflexión

La determinación de la deflexión ( $y = P(-x^3 + 3L^2x - 2L^3) / 6EI$ , con  $P =$  carga aplicada,  $x =$  distancia de la sección al extremo izquierdo de la viga,  $L =$  longitud de la viga,  $E =$  módulo de Young e  $I =$  segundo momento de inercia de la sección transversal con respecto al eje neutro) es de interés particular, ya que las especificaciones de diseño incluyen generalmente un valor máximo admisible para la deflexión (ver Figura 2). Por ejemplo, al diseñar elementos de máquina para trabajos de precisión, tales como tornos, prensas, limadoras, etc., las deformaciones deben permanecer por debajo de las tolerancias admisibles de trabajo que se va a realizar. Los estudios estáticos pueden calcular desplazamientos, fuerzas de reacción, deformaciones unitarias, tensiones y la distribución del factor de seguridad. El material falla en ubicaciones donde las tensiones exceden cierto nivel. Los cálculos del factor de seguridad se basan en el criterio de fallos. Los estudios estáticos ayudan a evitar fallos provocados por tensiones altas. Un factor de seguridad más pequeño que la unidad indica un fallo del material. Factores de seguridad mayores en una región indican tensiones bajas y la posibilidad de eliminar algún material de esta región. De este modo podemos optimizar nuestro diseño para ahorrar material a la hora de fabricar y, por lo tanto, reducir el coste unitario de nuestro producto.

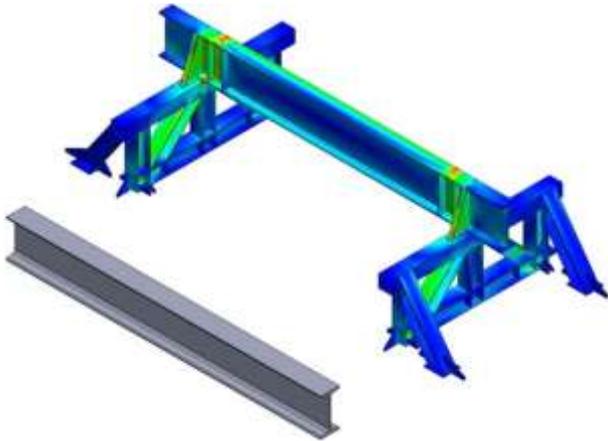


Figura 2. Deflexión de una viga apoyada en dos puntos.  
Fuente: Elaboración propia.

### Estudios de pandeo

El pandeo, por definición, es un desplazamiento amplio y repentino ocasionado por cargas axiales (ver Figura 3). Por lo que analizar la estabilidad de la estructura, esto es, su capacidad para soportar una carga dada sin experimentar un cambio súbito en su configuración es fundamental. Los análisis se refieren principalmente a las columnas, es decir, al estudio y diseño de elementos prismáticos verticales que soportan cargas axiales. Es decir, si se perturba su equilibrio, el sistema retornará a su posición original de equilibrio siempre que  $P$  no exceda un cierto valor  $P_{cr}$ , llamado carga crítica. Por ejemplo, la fórmula de Euler para columnas articuladas (ver Figura 3) se define como:  $P_{cr} = \pi^2 EI / L^2$ , donde  $L$  = longitud de la columna articulada,  $E$  = módulo de Young e  $I$  = segundo momento de inercia de la sección transversal con respecto al eje neutro.

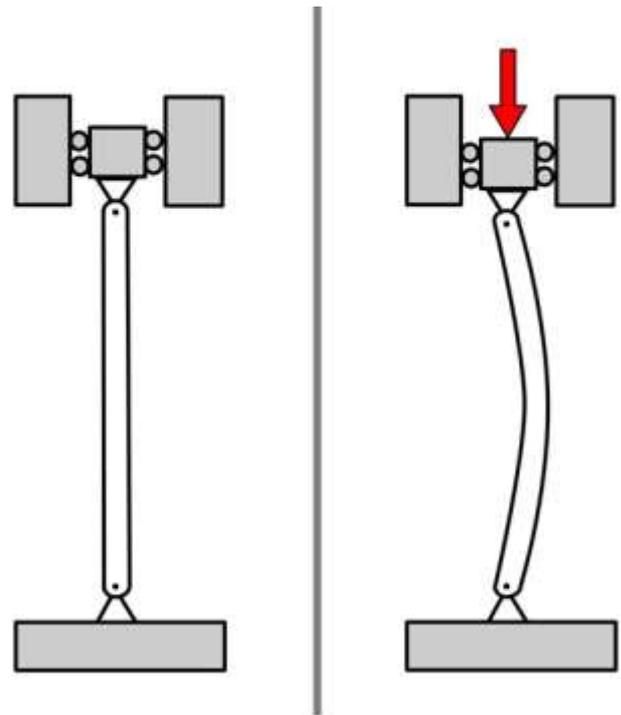


Figura 3. Pandeo de una columna articulada.  
Fuente: Elaboración propia.

### Fractura frágil

Durante la propagación de una grieta se produce lo que se denomina liberación de energía de deformación elástica, o sea, parte de la energía que es almacenada en el material (Teoría de Clapeyron) cuando es deformado elásticamente. También se forman nuevas superficies en las caras de la grieta cuando ésta se extiende, lo cual origina un incremento en la energía superficial del sistema. Griffith desarrolló un criterio para la propagación de una grieta elíptica realizando un balance energético entre estas dos energías. Demostró que la tensión crítica que se requiere para propagar una grieta en un material frágil viene dada por:  $\sigma_c = (2E\gamma_s / \pi a)^{1/2}$  con  $E$  = módulo de Young,  $\gamma_s$  = energía superficial específica y  $a$  = mitad de la longitud. Por ejemplo, la fractura en unión trunnion adapter-trommel provoca falla y fuga de material, por lo que determinar el módulo de Young es fundamental para prevenir fallas en los pernos que unen el molino con el trommel, permitiendo llegar a mantenimientos programados (ver Figura 4).

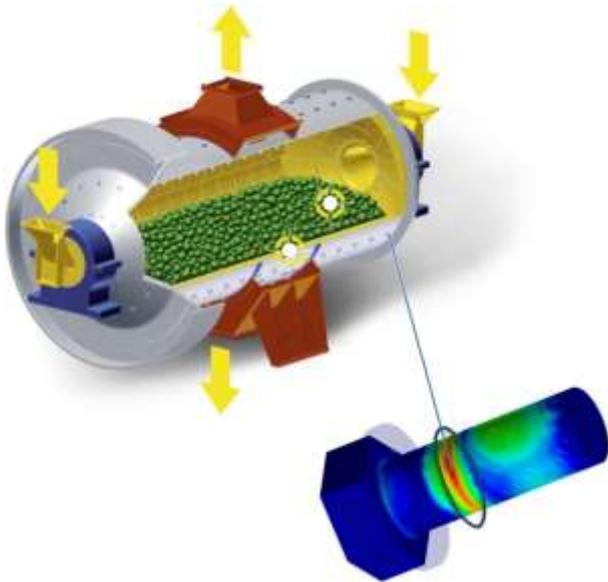


Figura 4. Molino de bolas.  
Fuente: Elaboración propia.

### Teoría

Una de las más importantes aplicaciones del estudio de la deformación de las vigas es (ver Figura 5), por otra parte, la obtención de ecuaciones de deformación que, junto con las condiciones de equilibrio estático, permitan resolver las vigas estáticamente indeterminadas.

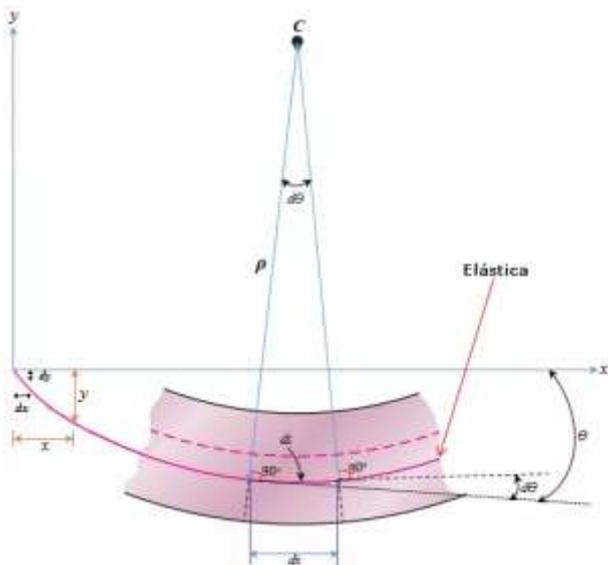


Figura 5. Vista frontal de un elemento diferencial de una viga.  
Fuente: Elaboración propia.

La vista lateral de la superficie neutra de una viga deformada se llama curva elástica, o simplemente, elástica de la viga. Es la curva que forma el eje longitudinal, inicialmente recto. Se muestra sumamente exagerada en la Figura 6. En esta sección se deduce la ecuación de dicha curva, y cómo calcular el desplazamiento vertical o deflexión y de cualquier punto en función de su abscisa  $x$ . Se supone siempre que las deformaciones son tan pequeñas que no hay diferencia apreciable entre la longitud inicial de la viga y la proyección de su longitud deformada. En consecuencia, la curva elástica es muy llana y su pendiente en cualquier punto también es muy pequeña, de la Figura 6, se tiene que:

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx} \quad (1)$$

Sabemos que la  $\tan \theta$  se define como:

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (2)$$

Por otro lado el seno como Serie de Taylor en torno a  $a = 0$  es:

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots \quad (3)$$

Asimismo, el coseno como Serie de Taylor en torno a  $a = 0$  es:

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \frac{\theta^6}{6!} + \dots \quad (4)$$

Sustituyendo las Ecs. (3) y (4) en la Ec. (2), resulta en:

$$\tan \theta = \frac{\theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots}{1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \frac{\theta^6}{6!} + \dots} \quad (5)$$

Si el ángulo  $\theta \ll 1$  es muy pequeño debido a que no hay diferencia apreciable entre la longitud inicial de la viga y la proyección de su longitud deformada, en ese sentido, la Ec. (5) se reescribe como:

$$\tan \theta \approx \frac{\theta}{1} \approx \theta \quad (6)$$

Sustituyendo la Ec. (6) en la Ec. (1) obtenemos:

$$\theta = \frac{dy}{dx} \quad (7)$$

Derivando ambos lados de la Ec. (7) con respecto a  $x$ , se tendría:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{dy}{dx} \right) \quad (8)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (9)$$

De la Figura 5, tenemos que el arco  $ds$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$ds = \rho d\theta \quad (10)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{\rho} \quad (11)$$

Siendo  $\rho$  el radio de curvatura en la longitud de arco  $ds$ . Como la curva elástica es casi recta, el  $ds$  arco es prácticamente igual  $dx$ . En estas condiciones, se cumple lo siguiente:

$$\frac{d\theta}{ds} \approx \frac{d\theta}{dx} \quad (12)$$

De las Ecs. (11) y (12), es evidente que:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{1}{\rho} \quad (13)$$

Sabemos que la deformación unitaria longitudinal normal máxima para flexión se expresa como:

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = \frac{c}{\rho} \quad (14)$$

Donde  $c$  es la distancia máxima a la superficie neutra (que corresponde a la superficie superior o inferior del elemento). Multiplicando por el módulo de Young ( $E$ ) en ambos lados de la Ec. (14), se tiene:

$$E\varepsilon_{m\acute{a}x} = E \frac{c}{\rho} \quad (15)$$

De acuerdo con la ley de Hooke, tenemos que el esfuerzo normal:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = E\varepsilon_{m\acute{a}x} \quad (16)$$

Sustituyendo la Ec. (16) en la Ec. (15), se obtuvo la siguiente relación

$$\sigma_{m\acute{a}x} = E \frac{c}{\rho} \quad (17)$$

Por otro lado, el esfuerzo normal máximo causado por la flexión se expresa como:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} \quad (18)$$

Siendo  $M$  el momento flector e  $I$  el segundo momento de área de la sección transversal con respecto al eje neutro.

Por otro lado, igualando las Ecs. (17) y (18), resulta

$$E \frac{c}{\rho} = \frac{Mc}{I} \quad (19)$$

Reduciendo términos

$$\frac{E}{\rho} = \frac{M}{I} \quad (20)$$

De la Ec. (20) se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (21)$$

Ahora igualando las Ecs. (13) y (21) resulta en:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{M}{EI} \quad (22)$$

Finalmente, sustituyendo la Ec. (9) en la Ec. (22), se tendría

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (23)$$

La Ec. (23) es la ecuación diferencial de la elástica de una viga. El producto de  $EI$ , que se llama rigidez a la flexión, es normalmente constante a lo largo de la viga. Con ayuda de la Ec. (23) y la viga en voladizo  $AB$  de sección transversal uniforme que se presenta en la Figura 6, que soporta una carga  $P$  en su extremo libre  $A$ , se determina la deflexión de la viga y el módulo de Young.

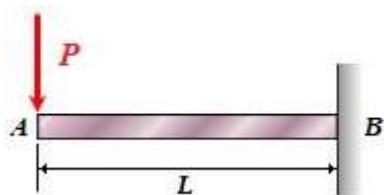


Figura 6. Viga en voladizo de longitud  $L$ .  
Fuente: Elaboración propia.

Usando el diagrama de cuerpo libre de la porción  $AC$  de la viga (ver Figura 7), en donde  $C$  está a una distancia  $x$  del extremo  $A$ , se tiene que el momento flector es:

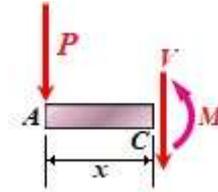


Figura 7. Porción  $AC$  de la viga en voladizo.  
Fuente: Elaboración propia.

$$M = -Px \quad (24)$$

El signo negativo de la Ec. (24), es debido a que en el punto  $C$ , la viga gira en sentido contrario a las manecillas del reloj, esto es debido a que cuando se aplica la carga en el punto  $A$ , la viga en el punto  $C$  tiende a elevarse en sentido anti-horario, y por convención de signos, decimos que si la gira en sentido anti-horario el momento lo vamos a considerar negativo. Ahora, sustituyendo a  $M$  en la Ec. (23):

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Px}{EI} \quad (25)$$

Integrando en  $x$ ,

$$EI \frac{d}{dx} \left( \frac{dy}{dx} \right) = -Px \quad (26)$$

Separando variables

$$EI d \left( \frac{dy}{dx} \right) = -Pxdx \quad (27)$$

Integrando:

$$EI \int d \left( \frac{dy}{dx} \right) = -P \int xdx + C_1 \quad (28)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2}Px^2 + C_1 \quad (29)$$

Se observa ahora que en el extremo fijo **B** de la Figura 8, se tiene  $x = L$  y  $\theta = dy/dx = 0$ . Siempre debemos considerar las condiciones a la frontera que conocemos, sólo en el punto **B** es donde conocemos el valor de la deflexión. Sustituyendo estos valores en la Ec. (29) y despejando a  $C_1$ , se tiene:

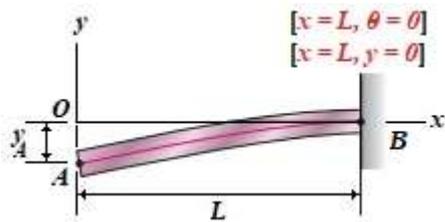


Figura 8. Deflexión  $y_A$  de la viga en voladizo.  
Fuente: Elaboración propia.

$$EI(0) = -\frac{1}{2}P(L)^2 + C_1 \quad (30)$$

$$C_1 = \frac{1}{2}PL^2 \quad (31)$$

Sustituyendo la Ec. (31) en la Ec. (29):

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2}Px^2 + \frac{1}{2}PL^2 \quad (32)$$

Separando variables en la Ec. (32) de nueva cuenta:

$$EI dy = -\frac{1}{2}Px^2 dx + \frac{1}{2}PL^2 dx \quad (33)$$

Integrando la Ec. (33)

$$EI \int dy = -\frac{1}{2}P \int x^2 dx + \frac{1}{2}PL^2 \int dx + C_2 \quad (34)$$

$$EIy = -\frac{1}{6}Px^3 + \frac{1}{2}PL^2x + C_2 \quad (35)$$

Pero en el punto **B** se tiene  $x = L, y = 0$ . Se tiene

$$EI(0) = -\frac{1}{6}P(L)^3 + \frac{1}{2}PL^2(L) + C_2 \quad (36)$$

$$C_2 = \frac{1}{6}PL^3 - \frac{1}{2}PL^3 = -\frac{1}{3}PL^3 \quad (37)$$

Sustituyendo la Ec. (37) en la Ec. (35), se obtiene la ecuación de la curva elástica:

$$EIy = -\frac{1}{6}Px^3 + \frac{1}{2}PL^2x - \frac{1}{3}PL^3 \quad (38)$$

o

$$y = \frac{P}{6EI}(-x^3 + 3L^2x - 2L^3) \quad (39)$$

Despejando el módulo de Young de la Ec. (39), se tiene:

$$E = \frac{P}{6Iy}(-x^3 + 3L^2x - 2L^3) \quad (40)$$

### Materiales y procedimiento

Esta práctica permite que los estudiantes puedan estimar el módulo de Young con ayuda de una viga en voladizo (ver Figura 9).

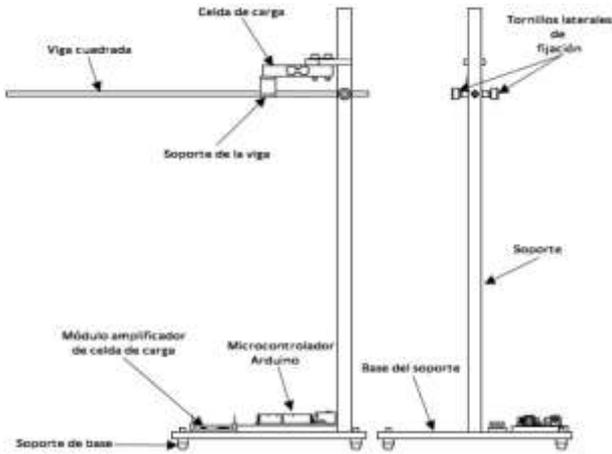


Figura 9. Equipo empleado para determinar el módulo de Young.

Fuente: Elaboración propia.

El aparato de prueba de la viga en voladizo consta de un soporte de base, un módulo amplificador de celda de carga, un microcontrolador Arduino, un soporte, un soporte de la viga, una celda de carga y una viga cuadrada.

1.- Base y soporte: integrado por una base de soporte grande en forma rectangular y un soporte cuadrado. El soporte se utiliza para sujetar a la viga en voladizo.

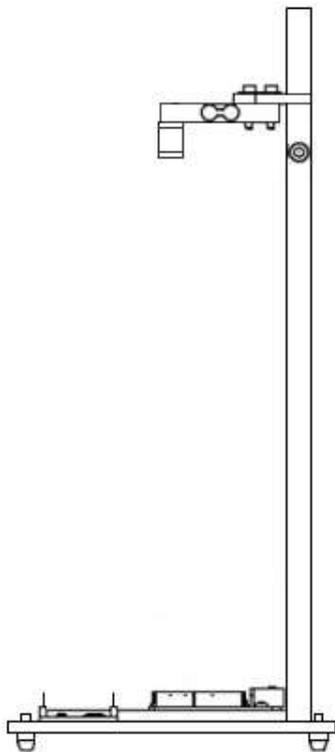


Figura 10. Base y soporte.

Fuente: Elaboración propia.

2.- Viga cuadrada de acero AISI 1018: es empleada para determinar su módulo de Young.



Figura 11. Viga cuadrada de acero AISI 1018.

Fuente: Elaboración propia.

3.- Masas con geometría cilíndrica: son usadas para provocar la deflexión de la viga en voladizo.



Figura 12. Masas con geometría cilíndrica. (Material de laboratorio, 2020)

4.- Báscula de precisión: permite determinar la masa de la esfera de acero. Asimismo, podemos obtener una legibilidad en el rango de 1 mg (0.001 g) a 1 g, o de 0-3 decimales.



Figura 13. Báscula de precisión. (Equipo de laboratorio, 2020)

Equipo de protección individual a utilizar:

- Bata blanca
- Botas de seguridad
- Guantes de látex blandos
- Gafas de protección

Aspectos importantes del dispositivo a utilizar (ver Figura 5):

1. Asegurarse de que no tenga ninguna carga (pesa) en el extremo de la viga antes de encender el dispositivo.
2. La celda de carga soporta un peso máximo de 1 kg.
3. La celda de carga esta calibrada para estimar el módulo de Young ( $E$ ) con un peso máximo de 0.24 Kg. Si excede la carga máxima de calibración, NO se garantiza un buen resultado.

Procedimiento para llevar a cabo el experimento de deflexión de la viga en voladizo. Lee cuidadosamente los siguientes pasos, si tienes alguna duda pregunta a tu docente o encargado de laboratorio correspondiente:

1. Leer el manual teórico de la práctica proporcionado por el docente o encargado de laboratorio para entender los principios fundamentales del sistema mecánico (viga en voladizo).
2. Visualizar y conocer todos los componentes del dispositivo (ver Figura 9).
3. Identificar los componentes del paso 2 en el sistema físico (viga en voladizo).
4. Seleccionar una masa (pesa) de la Tabla 1. Verificar los ensayos posibles de acuerdo a la masa elegida.

**Nota: Asegurarse de utilizar las unidades del sistema internacional (SI).**

5. Realizar los cálculos correspondientes con la ecuación de la curva elástica (ver Ec. (40)) y

obtenga el módulo de elasticidad ( $E$ ) de la viga de sección cuadrada. Para todos los ensayos posibles considerar las siguientes dimensiones constantes de la viga: base = 5 mm, altura = 5 mm y largo = 52 cm.

$$E = \frac{P}{6I_y} (-x^3 + 3L^2x - 2L^3) \quad (40)$$

6. Colocar cuidadosamente la viga de sección cuadrada en el dispositivo como se muestra en la Figura 9, a una distancia  $L$  definida en el paso 5.
7. Fijar la viga se sección cuadrada con los tornillos laterales, utilice la herramienta adecuada para realizar este paso.
8. Conectar el cable de comunicación USB al microcontrolador Arduino.
9. Conectar el cable USB a un puerto de computadora para su alimentación del dispositivo. **(NO colocar la carga en la viga).**
10. Visualizar las indicaciones que muestra el display del dispositivo para colocar la carga, o esperar a que muestre el primer dato de estimación. Ejemplo:  $E [GPa] \approx 0.005$ .
11. Evitar que la viga este oscilando después de colocar la carga (pesa), con el fin de evitar una lectura errónea y fatigar la celda de carga.
12. Esperar entre dos a cinco segundos aproximadamente para obtener el valor del módulo estimado. **Registrar el dato de la estimación.** Verificar el módulo estimado con el gráfico de Ashby (ver Figura 14) para un acero AISI 1018.

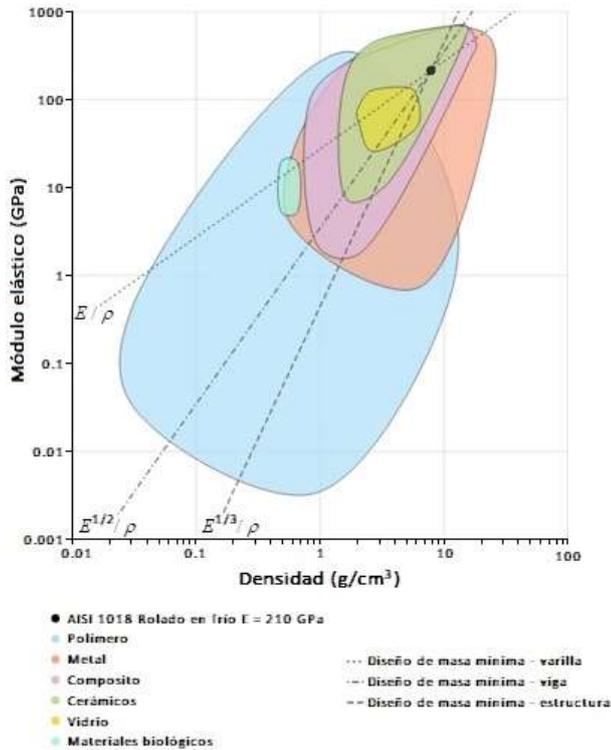


Figura 14. Gráfico de Ashby para un acero AISI 1018. Fuente: Elaboración propia.

13. Para realizar otro ensayo retirar la carga (pesa) actual o añadir más carga (pesa) según sea el caso (ver Tabla 1). Repetir los pasos del 10 al 12. Si ya no se realizará ningún ensayo realizar los pasos del 16 en adelante.
14. Si la carga fue colocada antes del paso 10, **RETIRAR LA CARGA** y oprimir el botón reset del microcontrolador Arduino.
15. Una vez reiniciado el microcontrolador repetir los pasos del 10 al 13.
16. Para finalizar los ensayos, retire cuidadosamente la carga aplicada.
17. Esperar a que el display muestre un valor estimado (sin carga) de  $E [GPa] \approx 0.005$  o aproximadamente de cero.
18. Desconectar el cable USB del puerto de la computadora.

19. Desconectar el cable de comunicación USB del microcontrolador Arduino.

## Resultados

Las lecturas se pueden tabular en la forma descrita en las Tabla 1. Los resultados se pueden calcular de acuerdo con la teoría dada en la Sección 7.

Tabla 1. Datos de ensayos posibles con diferentes rangos de carga-deflexión.

Fuente: Elaboración propia.

Número de ensayos posibles	Masa ideal pesas (g)	Masa real (g)	Fuerza aplicada ideal (N)	Deflexión $y_{\max}$ (mm)
1	20	20.01	0.1962	0.5
2	40	40.33	0.3924	1
3	50	51.11	0.4905	1.2
4	70	70.4	0.6867	1.5
5	100	102.18	0.9810	2
6	120	121.53	1.1772	3
7	140	142.9	1.3734	3.8
8	150	153.17	1.4715	4
9	170	172.90	1.6677	4.2
10	190	192.83	1.8639	4.8
11	200	203.88	1.9620	5
12	220	224.03	2.1582	5.2
13	240 máx	243.77	2.3544	6

## Cálculos

Calcule con ayuda de la Ec. (40) el módulo de Young y registre en las Tabla 2 el resultado registrado por el dispositivo mostrado en la Figura 5.

Tabla 2. Resultados. Fuente: Elaboración propia.

Número de ensayos posibles	Módulo de Young Ec. (40)	Módulo de Young (Equipo)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

9		
10		
11		
12		
13		
14		

Registre las siguientes dimensiones:

Altura

$$a = 5 \text{ mm}$$

Base

$$b = 5 \text{ mm}$$

Longitud

$$L = 52 \text{ cm}$$

Módulo de Young

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Cargas en la simulación

Fuerza aplicada ideal (N)
0.1962
0.3924
0.4905
0.6867
0.9810
1.1772
1.3734
1.4715
1.6677
1.8639
1.9620
2.1582
2.3544

Con ayuda del software SolidWorks (SOLIDWORKS® Simulation es un paquete de herramientas de análisis estructural fáciles de usar que utilizan el análisis de elementos finitos (FEA) para predecir el comportamiento físico real de un producto mediante la prueba virtual de modelos CAD. El paquete proporciona capacidades de análisis estáticos lineales y no lineales, y de análisis dinámicos) determine la deflexión máxima de la viga en voladizo.

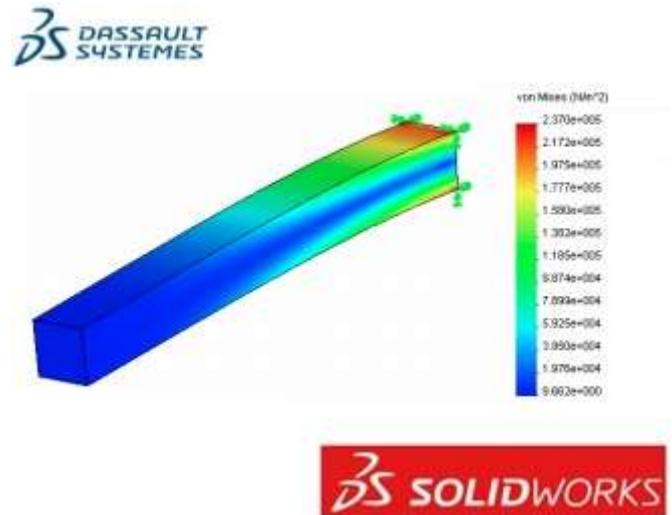


Figura 15. Deflexión máxima de la viga.  
Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

Se Determinó la deformación unitaria longitudinal normal ( $\varepsilon = c / \rho$ ), a través de la deflexión de un elemento diferencial de una viga, para determinar la el esfuerzo normal máximo causado por la flexión  $\sigma_{m\acute{a}x} = Mc / I$ . Asimismo se encontró la ecuación diferencial de la elástica de una viga ( $d^2y / dx^2 = M / EI$ ), empleando el esfuerzo normal máximo y el radio de curvatura en la longitud de arco  $ds$ , para determinar la deflexión de la viga.

## Agradecimientos

El trabajo descrito en el presente artículo fue financiado por la beca otorgada por PROMEP. Asimismo, le agradezco al Dr. Jorge Zuno Silva, quien es Director de la Escuela Superior de Ciudad Sahagún-UAEH, México, por todas las facilidades para concluir este trabajo.

## Referencias

- Beléndez, T., Neipp, C. y Beléndez, A., (2002). *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 24, 399.
- Beléndez, T., Neipp, C. y Beléndez, A., (2002). *Eur. J. Phys.* 29, 371.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., (2006). *Fluid Mechanics*, Capítulo 5.
- Equipo para laboratorio, (2020). *Balanza de precisión*, recuperado de: [Balanza de Precision - 1000g / 0.01g \(equipoparalaboratorio.mx\)](http://equipoparalaboratorio.mx)
- Gere, J. y Timoshenko, S., (1998). *Mecánica de Materiales*, Thomson Editores, México.
- Gere J., (2002). *Mecánica de Materiales*. 5ª edición. Thomson Learning Editores.
- Material de laboratorio, (2020), Soporte de laboratorio de tres puntas con sujetador, recuperado de: [Pinzas para Bureta - ¿Qué es, cómo funciona y para qué sirve? 🧪 \(materialeslaboratorio.com\)](http://materialeslaboratorio.com)
- Sthyamoorthy, M., (1998). *Nonlinear Analysis of Structures*, CRC Press LLC, Boca Raton.
- Timoshenko, S. y Goodier, J.N, (1998). *Theory of Elasticity*, Mc Graw Hill, New York.