



LA FORMACIÓN DE INGENIEROS:
UN COMPROMISO PARA EL
DESARROLLO Y LA SOSTENIBILIDAD

15 al 18
DE SEPTIEMBRE

20
20

www.acofi.edu.co/eiei2020

ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DEL BALSO Y EL PVC USANDO UN TORSIÓMETRO DE BAJO COSTO Y CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES

Juan Diego Guerrero Mejía, Jeisi Jelizeth Martínez Chinchilla, Edwin Arnoldo Mosquera Gutiérrez, Raúl Andrés Parada Sepúlveda, Jeisson Stiven Vargas Gamboa, Valentina Villán Pacheco, José Benjumea, David Sebastián Cotes Prieto

**Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia**

Resumen

Las propiedades mecánicas de los materiales pueden determinarse a partir del estudio de sus respuestas frente a cargas externas. Estas permiten describir o predecir el comportamiento y resistencia de elementos que hacen parte de sistemas, por ello es de vital importancia determinarlas con el fin de emplear dichos materiales en los diferentes problemas de ingeniería estructural y seleccionar cuál es el recurso más factible tanto funcional como económicamente. Este trabajo de investigación, desarrollado en el marco de la asignatura mecánica de sólidos del programa de pregrado en ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander, expone los resultados de ensayos a torsión realizados a probetas de madera balsa y Policloruro de Vinilo (PVC), El objetivo del trabajo fue determinar el módulo de rigidez de ambos materiales usando un torsiómetro de bajo costo y la técnica de correlación de imágenes digitales. El torsiómetro fue diseñado por los docentes a cargo del curso y tuvo un costo a la institución realmente bajo en comparación a los equipos disponibles en el mercado. Antes de realizar el ensayo de cada probeta, se determinó un rango de carga máximo permitido con el fin de no sobrepasar el límite lineal-elástico de cada material, con base en propiedades teóricas obtenidas de la literatura y aplicando los conocimientos teóricos adquiridos en la asignatura. El componente tecnológico aplicado en los ensayos consistió en la captura de datos de desplazamiento usando patrones discretos y estocásticos en el software GOM Correlate 2019. De igual manera para los resultados de cada patrón se emplearon diversas formas de análisis, como la relación de la deformación unitaria y el esfuerzo cortante mediante gráficas, y operaciones algebraicas. Los resultados obtenidos experimentalmente de módulo de rigidez concuerdan con los reportados en la literatura, por lo cual se concluye que la metodología propuesta es válida y consiste en una oportunidad viable para la introducción de los estudiantes de ingeniería al campo de la experimentación en su programa de pregrado.

Palabras clave: torsiómetro; módulo de rigidez; correlación de imágenes digitales

Abstract

The mechanical properties of the materials can be determined from the study of their responses to external loads. These allow describing or predicting the behavior and resistance of elements that are part of systems, so it is vital to determine them in order to use these materials in different structural engineering problems and select the most feasible resource, both functionally and economically. This work was developed within the framework of the solid mechanic course of the undergraduate program in civil engineering at the Universidad Industrial de Santander and discusses the results of a torsion test conducted on balsa wood and Polyvinylchloride (PVC) specimens. The objective of the work was to determine the shear modulus of both materials using a low-cost torsionmeter and the digital image correlation technique. The torsionmeter was designed by the professors in charge of the course and had a low cost to the institution compared to the equipment available on the market. The maximum permitted load was determined before the tests to avoid exceeding the linear-elastic limit of each material. The latter was determined based on theoretical properties obtained from the literature and by applying the theoretical knowledge acquired in the course. The technological component applied in the tests consisted of capturing displacement data using discrete and stochastic image patterns that were processed in the software GOM Correlate 2019. To obtain the results of each pattern and material, various forms of analysis were used, which included establishing the relationship of the unit deformation and the shear stress through algebraic operations and graphs. The experimentally obtained results of the shear modulus agree with those reported in the literature. This allowed to conclude that the proposed methodology is valid and is a viable opportunity for the introduction of engineering students to the field of experimentation throughout their undergraduate program.

Keywords: torsionmeter; shear modulus; digital image correlation

1. Introducción

Las últimas décadas han dado paso a un avance tecnológico sin precedentes, este desarrollo ha cambiado la forma en que entendemos el universo y aprendemos sobre él. La caracterización de materiales no es ajena a este cambio, sin embargo, los costos de equipos para realizar esta tarea suelen ser elevados, dificultando el acceso a estos por parte instituciones de educativas.

Esta propuesta busca incentivar a las universidades a adquirir equipos de bajo costo funcionales, para mejorar los procesos de enseñanza, formando profesionales más competentes reduciendo la brecha entre conceptos teóricos y prácticos. Es por lo anterior que los docentes y auxiliares del curso de mecánica de sólidos de la Universidad Industrial de Santander optaron por diseñar y construir un torsiómetro de bajo costo, introduciendo a los estudiantes de ingeniería al campo de la experimentación y practica de futuras materias a lo largo de su carrera de pregrado.

Con el fin de poner a prueba la efectividad del torsiómetro, y como parte de las actividades del curso, se propuso como objetivo determinar el módulo de rigidez a torsión (G) y contrastarlo con valores teóricos propuestos en la literatura. Para ello se usaron herramientas y recursos que implicaron un mínimo gasto por parte del estudiantado, como fueron la madera balsa y policloruro de vinilo (PVC) y la versión educativa del software GOM Correlate 2019. A lo largo del informe se profundiza con mayor claridad la metodología del ensayo, el tratamiento de los resultados y que se concluyó de ello.

2. Metodología

2.1. Materiales

Para el desarrollo de este proyecto se usaron dos probetas; una de PVC (probeta 1) y la otra de madera balsa (probeta 2). Las dimensiones de cada probeta y las propiedades teóricas de los materiales se presentan en la Tabla 1. Los datos teóricos fueron obtenidos de (Borrega, 2015) (Material Properties, n.d.) (Shishkina, Lomov, Verpoest, Gorbatikh, 2014). En esa tabla, F.S. es el factor de seguridad, \emptyset el diámetro establecido para cada material y G_{teo} el módulo de rigidez teórico. Además de las probetas se usó un torsiómetro (Fig. 1) y pesos, los cuales consistían en fibras de acero y botellas de agua.

	Probeta 1	Probeta 2
Material	PVC	Madera Balsa
\emptyset_{ext} [mm]	25,4	25,4
\emptyset_{int} [mm]	21,4	0,0
Longitud [mm]	425	425
τ_{max} [MPa]	65	1,5
F.S.	1,0	1,3
G_{teo} [MPa]	1148,15	300

Tabla 1. Propiedades de probetas

Para la captura de las imágenes digitales se empleó un patrón estocástico y otro discreto (sección 2.3), además de un trípode en el cual se apoyaba el celular para evitar posibles movimientos de este. Las imágenes de la probeta 1 fueron tomadas con un celular Huawei Mate20 con cámara principal de 12 megapíxeles y secundaria de 16 megapíxeles, mientras que para la probeta 2 se usó un Xiaomi Mi A2 con cámara principal de 20 Megapíxeles.

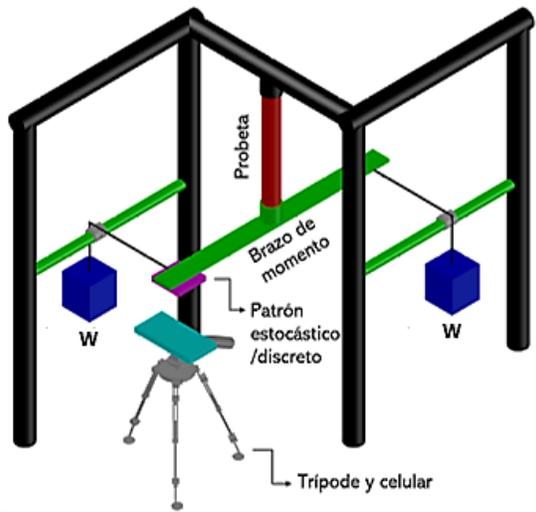


Figura 1. Modelo 3D torsiómetro INME UIS

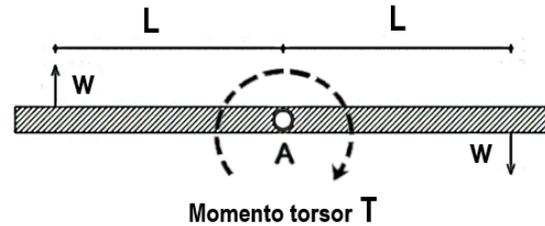


Figura 2. Idealización del brazo de momento

2.2. Protocolo de carga

Previo al ensayo se determinó el dominio de las cargas a usar, perteneciente al rango elástico-lineal del material; con base en el modelo de torsión de Coulomb (Eq. 1), y la ecuación de momento torsor (T) (Eq. 2) deducida a partir del equilibrio de la idealización del sistema (Fig. 2).

$$\tau = \frac{T * r}{J} \leq \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{F.S.} \quad (Eq. 1)$$

Se calculó el torsor aplicado en la barra usando la Eq. 1, verificando que no excediera el momento máximo admisible. En esta ecuación, el termino r corresponde a la distancia entre el centro geométrico de la sección hasta el punto de interés donde se calcula τ , J el momento polar de inercia y $\tau_{m\acute{a}x}$ el esfuerzo cortante máximo (Beer, Jhonston, 2015). Luego, la Eq. 2 fue usada para calcular la máxima masa (m) a partir del torsor T , la aceleración de gravedad (g) y la longitud total del brazo de momento ($2L$).

$$T = (m * g) * 2L \quad (Eq. 2)$$

2.3. Ensayo de torsión

Inicialmente se comprobó que la probeta calzara correctamente en el torsiómetro y en el brazo de momento (Fig. 1), siendo posteriormente acoplada al sistema mediante el ajuste de las mordazas superior e inferior. Además, se verificó que las poleas y el brazo de momento estuviesen al mismo nivel, de modo que la probeta fuese sometida a torsión pura durante los ensayos.

Una vez seleccionados los patrones, se tomaron medidas de cada uno con el fin de establecer la escala a utilizar en el procesamiento de imágenes en el software GOM Correlate 2019; se utilizó el ancho para el patrón estocástico y la distancia entre puntos para el discreto (Fig. 3), luego se

ubicó el patrón en la parte inferior de uno de los extremos del brazo de momento, siendo este el sistema de referencia para la lectura de los desplazamientos en el software.

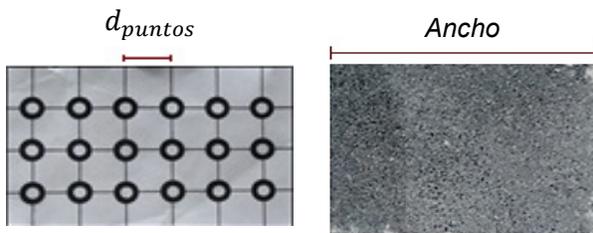


Figura 1. Patrón discreto – patrón estocástico

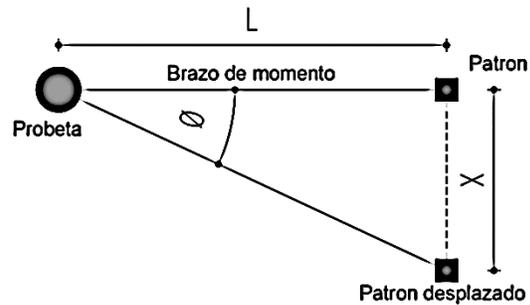


Figura 2. Vista planta: idealización de desplazamientos

Con el montaje listo se procedió a realizar el ensayo, el cual consistió en un proceso de carga y descarga de los pesos previamente establecidos. Los ensayos fueron ejecutados en horas de la noche con el fin de disminuir el porcentaje de error en la toma de imágenes por la presencia de gradientes de iluminación. El flash de cada celular fue utilizado como fuente de iluminación. La carga máxima que fue determinada se aplicó mediante tres incrementos de carga durante los ensayos. Antes de aplicar la primera carga se capturó una imagen del estado inicial (no deformado) del brazo de torsión. Luego, se aplicó dicha carga y se tomó la segunda imagen, teniendo en cuenta que el proceso de carga en cada polea se debía realizar al mismo tiempo. Estos pasos se repitieron para las otras dos cargas. Debe notarse que el procedimiento se realizó para cada uno de los patrones.



Figura 6. Estudiantes realizando el ensayo

2.4. Correlación de imágenes (DIC)

Las imágenes capturadas durante los ensayos fueron procesadas usando la versión libre del software GOM Correlate 2019. En algunos casos, el software no reconoció automáticamente la totalidad de los puntos de control en el patrón discreto y el área de control en el patrón estocástico,

lo cual dificultó realizar el proceso de correlación de las imágenes. Por lo tanto, se recurrió a la ubicación manual de los puntos dentro del software o la edición de imágenes modificando el contraste y/o la saturación de estas. Posteriormente se extrajeron los datos del desplazamiento horizontal (X) de los puntos de interés de cada patrón, los cuales fueron exportados a una hoja de cálculo en Microsoft Excel.

2.5. Tratamiento de datos

Se relacionaron geoméricamente los datos de desplazamiento X con el ángulo de giro (ϕ) de la probeta mediante la Eq. 3, asumiendo que se cumple la hipótesis de desplazamientos pequeños. Para ello, el recorrido realizado por el patrón se aproximó a una trayectoria recta (Fig. 4). Una vez calculado ϕ , con los datos de las probetas (r y L) se obtuvo la deformación unitaria (γ) a partir de la Eq. 4. Para el cálculo de los esfuerzos cortantes en la probeta (τ) se requirieron los momentos generados por cada carga, los cuales se reemplazaron en la Eq. 1. La curva τ vs γ de cada probeta fue graficada, y el módulo de rigidez experimental (G_{exp}) fue obtenido mediante la pendiente de la línea de tendencia de dichas graficas.

$$\phi = \left(\frac{X}{L}\right) \text{ (Eq. 3)}$$

$$\gamma = \frac{r * \phi}{L} \text{ (Eq. 4)}$$

3. Análisis de resultados

En la Tabla 2 se presentan los desplazamientos obtenidos a través de la correlación de imágenes para las probetas 1 y 2, respectivamente. Los resultados no exitosos del procesamiento de las imágenes se identifican con las siglas NA en la tabla. En estos casos no fue posible procesar las imágenes en el software GOM Correlate debido al desgaste en el patrón estocástico, producto de múltiples pruebas ejecutadas previamente por otros grupos de trabajo. Igualmente, el uso de este patrón generó inconvenientes para el análisis automático de las imágenes por parte del software, como se discutió en la sección 2.5. La causa de este fallo se atribuye a la carencia de iluminación uniforme sobre los puntos del patrón discreto, puesto que cuando este se desplazaba con el brazo de momento, el celular se mantenía estacionario, limitando así el alcance del flash. Por lo tanto, se considera conveniente establecer un límite de usos para estos patrones en futuros ensayos y añadir al sistema una fuente de iluminación que cubra uniformemente toda el área de trabajo.

Estado	Probeta 1			Probeta 2		
	T [N-mm]	X _{est} [mm]	X _{dis} [mm]	T [N-mm]	X _{est} [mm]	X _{dis} [mm]
Inicial	0,00	0,00	0,00	0	0	0
Carga 1	1982,54	17,40	13,37	1484,97	21,73	20,70
Carga 2	6664,00	NA	34,76	2756,79	39,34	39,59
Carga 3	8646,54	NA	44,94	2938,85	43,34	43,41

X_{est} → Desplazamiento patrón estocástico X_{dis} → Desplazamiento patrón discreto

Tabla 2. Resultados de desplazamientos



En las Figs. 6 y 7 se ilustra el comportamiento del esfuerzo cortante contra la deformación unitaria para las probetas 1 y 2, respectivamente. La línea de tendencia obtenida para cada serie de datos en Microsoft Excel evidencia que el ensayo se mantuvo en el rango elástico-lineal de los materiales. El valor de la pendiente de esta línea que representa el módulo de rigidez experimental G_{exp} .

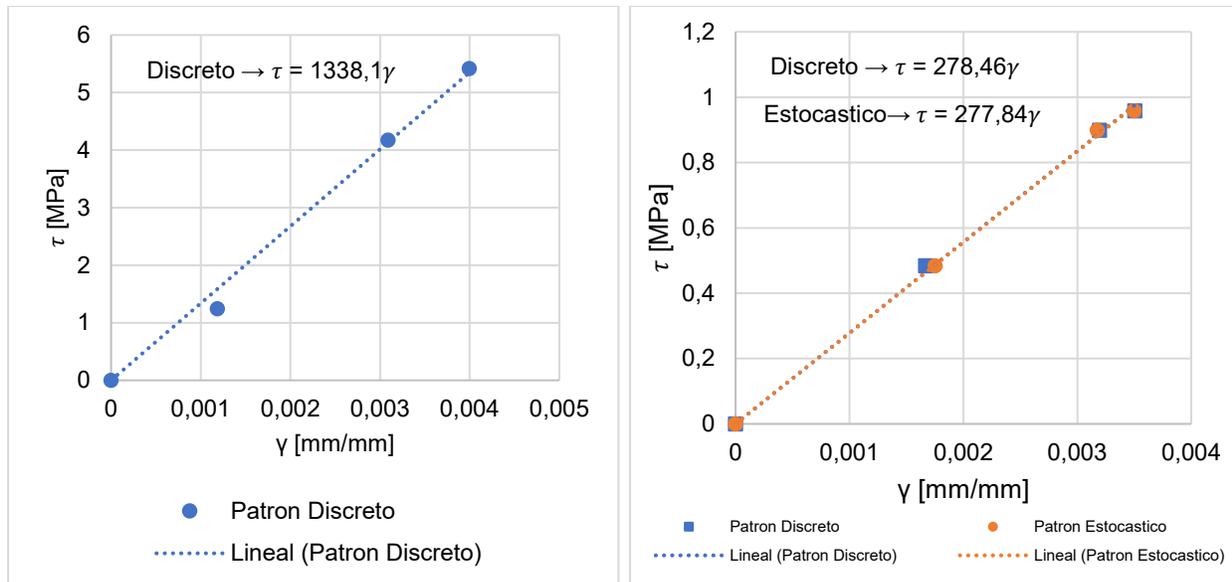


Figura 6. τ vs γ probeta 1 Figura 7. τ vs γ probeta 2

El error relativo entre el valor teórico del módulo de rigidez (Tabla 1) y los valores obtenidos experimentalmente (Tabla 3) fueron calculados para cada caso según la ecuación (Eq 5).

$$\%Error = \frac{|G_{teo} - G_{exp}|}{G_{teo}} \quad (Eq. 5)$$

No fue posible calcular un porcentaje de error para el patrón estocástico usado en la probeta 1, dado que en el ensayo no se obtuvieron datos suficientes para determinar una línea de tendencia y a su vez un G_{exp} . El error obtenido (Tabla 3) para los demás ensayos se considera aceptable como resultado de los primeros ensayos de este tipo. Los autores consideran que es posible reducir el porcentaje de error si se tienen en cuenta las recomendaciones expuestas al inicio de esta sección y aquellas discutidas a continuación.

Patrón	Probeta 1		Probeta 2	
	G_{exp} [MPa]	Error	G_{exp} [MPa]	Error
Estocástico	NA	NA	277,84	7,98%
Discreto	1338,10	14,20%	278,46	7,74%

Tabla 3. Módulo de rigidez experimental y error relativo

Como se observa en la Tabla 3, existen pequeñas variaciones en el error relativo, en el caso de la probeta uno es mayor y probablemente se debe a que para realizar el ensayo con un diámetro comercial que se ajustara al torsiómetro, se tuvo que lijar manualmente los bordes de la probeta, reduciendo parcialmente la rigidez inicial. En el caso de la probeta 2, el módulo teórico expuesto es producto de la investigación del tipo de madera y su procedencia, por tanto, es únicamente una aproximación. Entre otras fuentes de error, y de variación en estos, puede estar el uso de distintos equipos celulares y el ajuste manual de los puntos del patrón discreto.

Debido a lo anterior es recomendable añadir al torsiómetro un sistema graduable de ajuste para las probetas, así como la realización de ensayos adicionales que determinen la conveniencia del tipo de iluminación para la captura de imágenes y las características mínimas de los equipos de fotografía.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas a partir de la ejecución de los ensayos son:

- El método para calcular el módulo de rigidez usando el torsiómetro de bajo costo y correlación de imágenes digitales funciona con suficiente precisión dado que los resultados obtenidos se asemejan a los teóricos.
- Con base al porcentaje de error entre el valor teórico y el experimental del módulo de rigidez, para las dos probetas se puede afirmar que al trabajar con un patrón discreto se obtienen resultados más exactos y precisos.
- El experimento se considera una alternativa económica para los programas de ingenierías que cuenten con poco presupuesto para el desarrollo de experimentos de torsión en materiales, como parte de las asignaturas mecánica de sólidos o resistencia de materiales.

5. Referencias

- Beer F. and Jhonston E. (2015), Mechanical of materials. McGraw-Hill Global Education Holdings, Ciudad de México.
- Borrega, M., & Gibson, L. J. (2015). Mechanics of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. *Mechanics of Materials*, Vol. 84, pp. 75–90.
- Material Properties, McGraw-Hill Education - Access Engineering. (n.d.). Consultado el 20 de mayo de 2020 en <https://www.accessengineeringlibrary.com/datavis/material-properties#/lookup-value>
- Shishkina, O., Lomov, S. V., Verpoest, I., & Gorbatikh, L. (2014). Structure-property relations for balsa wood as a function of density: Modelling approach. *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 84, pp. 789–805.

Sobre los autores

- **Juan Diego Guerrero Mejía:** Estudiante de pregrado Ingeniería Civil de la Universidad de Santander, juan2181996@correo.uis.edu.co
- **Jeisi Jelizeth Martínez Chinchilla:** Estudiante de pregrado Ingeniería Civil de la Universidad de Santander, jeisi2174025@correo.uis.edu.co
- **Edwin Arnoldo Mosquera Gutiérrez:** Estudiante de pregrado Ingeniería Civil de la Universidad de Santander, edwin2174512@correo.uis.edu.co
- **Raúl Andrés Parada Sepúlveda:** Estudiante de pregrado Ingeniería Civil de la Universidad de Santander, raul2180165@correo.uis.edu.co
- **Jeisson Stiven Vargas Gamboa:** Estudiante de pregrado Ingeniería Civil de la Universidad de Santander, jeisson2181706@correo.uis.edu.co
- **Valentina Villán Pacheco:** Estudiante de pregrado Ingeniería Civil de la Universidad de Santander, valentina2180177@correo.uis.edu.co
- **José Benjumea:** Ph.D., Profesor asistente en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, josbenro@uis.edu.co
- **David Sebastián Cotes Prieto:** MSc (C)., Profesor cátedra en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, dscotpri@correo.uis.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2020 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)