

# Análisis modal de material compuesto de resina bioepoxy/fibra de fique<sup>1</sup>

Modal analysis of bioepoxy resin/fique fiber composite modal analysis

Análise modal de material composto de resina bioepoxi / fibra fique

S. A. Gómez, B. A. Ramón, y R. E. Guzmán

Recibido: agosto 10 de 2017 - Aceptado: enero 15 de 2018

**Resumen**—En este trabajo se aplicó un análisis modal sobre un material compuesto de resina bioepoxy/fibra de fique, utilizando simulación (Elementos Finitos), experimentación y modelamiento analítico, conociendo la desviación entre cada uno de los métodos de solución. El material fue elaborado empleando una resina bioepoxy y fibras de fique en distribución de tejido bajo la técnica de manufactura de infusión en vacío. Se realizaron pruebas de tensión al material compuesto según normativa ASTM D3039/D3039M para obtener propiedades mecánicas que permiten el desarrollo del modelo matemático y simulación y análisis de microscopía electrónica de barrido, para observar la adhesión entre la fibra y la matriz. El análisis modal experimental se realizó por medio de la medición de la respuesta en frecuencia (FRF) bajo la Norma ISO 7626-2. Para el modelamiento analítico se utilizó la ecuación de Euler-

Bernoulli; para la simulación se usó el software ANSYS de elementos finitos. Se concluye que para los dos primeros modos de vibración del material se obtienen resultados cercanos entre los tres métodos, sin embargo, para el tercer modo el error aumenta debido a la interacción entre la matriz y la fibra, y los efectos de la rotación de la sección transversal de la probeta.

**Palabras clave**— Análisis modal, bioepoxy, compuesto, elementos finitos, Euler-Bernoulli, fique, medición respuesta en frecuencia.

**Abstract**—In this work, a modal analysis was applied on a bioepoxy/ fiber composite material using the simulation (Finite Elements), experimentation and analytical modeling knowing the deviation between each of the methods of the solution. The material was elaborated using a bioepoxy resin and fique fibers in the distribution of weave under the technique of manufacturing the infusion vacuum. Tensile tests were performed on the composite material according to ASTM D3039 / D3039M to obtain the mechanical properties that allow the development of the mathematical model and the simulation and analysis of scanning electron microscopy to observe the adhesion between the fiber and the matrix. The experimental modal analysis was performed by measuring the frequency response (FRF) under ISO 7626-2. The Euler-Bernoulli equation was used for analytical modeling, while the ANSYS finite element software was used for the simulation. It concludes that for the first modes of material vibration obtained results close between the three methods, however for the third mode the error increases by the interaction between the matrix and the fiber and the effects of the rotation of the cross-section of the test item

**Keywords**— Modal analysis, bioepoxy, composite, finite elements, Euler-Bernoulli, fique, frequency response measurement.

**Resumo**— Neste trabalho uma análise modal foi aplicada em um material de resina bioepoxi/fibra composta usando a simulação (Elementos Finitos), experimentos e modelagem analítica, conhecendo o desvio entre cada método de solução. O material foi elaborado usando uma resina bioepoxi e fibras de fique na distribuição de tecidos sob a técnica de manufatura do vácuo de infusão. Testes de tensão foram realizados no material composto de acordo com ASTM D3039 / D3039M para obter as propriedades mecânicas que permitem o

<sup>1</sup>Producto derivado del proyecto de investigación “Caracterización morfológica- mecánica de materiales compuestos reforzados con fibras de fique del departamento de Santander-Colombia. utilizando la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), el ensayo de impacto péndulo “charpy”, el ensayo de tracción, el ensayo de flexión, el ensayo de dureza brinell y la respuesta en frecuencia (FRF)”. Presentado por el Grupo de Investigación Gidetchma, de la Universidad Pontificia Bolivariana.

S. A. Gómez, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, email: [sergio.gomez@upb.edu.co](mailto:sergio.gomez@upb.edu.co)

B. A. Ramón, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, email: [hbladimir@unipamplona.edu.co](mailto:hbladimir@unipamplona.edu.co)

R. E. Guzmán, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga Colombia, email: [rolando.guzman@upb.edu.co](mailto:rolando.guzman@upb.edu.co)

**Como citar este artículo:** Gómez, S. A., Ramón, B. A. y Guzmán, R. E. Análisis modal de material compuesto de resina bioepoxy/fibra de fique, Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 12, no. 23, pp. 78-83, enero - junio, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3706>



desenvolvimento do modelo matemático e a simulação e análise de microscopia eletrônica de varredura para observar a adesão entre a fibra e a matriz. A análise modal experimental foi realizada através da medição da resposta de frequência (FRF) sob ISO 7626-2. Para a modelagem analítica, a equação de Euler-Bernoulli foi utilizada, enquanto o software de elementos finitos ANSYS foi utilizado para a simulação. Conclui-se que, para os primeiros modos de vibração do material, os resultados obtidos entre os três métodos são próximos. No entanto, para o terceiro modo, o erro aumenta devido à interação entre a matriz e a fibra e os efeitos da seção transversal do item de teste.

**Palavras chave**— Análise modal, bioepoxi, composto, elementos finitos, Euler-Bernoulli, fique, medição da resposta de frequência.

## I. NOMENCLATURA

a:  $1/2\pi$  ciclos

A: Área de sección transversal

E: Módulo de elasticidad

I: Momento de inercia

$\rho$ : Densidad

t: Tiempo

$W_n$ : Frecuencia natural

$\delta v(x,t)$ : Deflexión transversal en la posición axial x

## II. INTRODUCCIÓN

EN la última década, los materiales compuestos reforzados con fibras naturales han tomado un papel importante en la industria, debido a sus características mecánicas y a la demanda de elementos que sean biodegradables [1],[2].

Estos materiales brindan ventajas como: baja densidad, alta tenacidad, alta resistencia al impacto, no corrosión; y algunas desventajas como: baja adhesión entre la matriz y las fibras y alta absorción de humedad con respecto a los materiales industriales comunes [3].

Una de las fibras naturales utilizadas para la fabricación de este tipo de biomateriales es la del fique, una fibra nativa de Colombia la cual es extraída típicamente por un proceso mecánico de una máquina desfibradora de la planta que recibe el mismo nombre [4]. Esta fibra posee una densidad aproximada de  $0,870 \text{ g/cm}^3$ , una resistencia a la tracción de  $237 \text{ MPa}$ , un módulo de elasticidad de  $8,010 \text{ GPa}$  y respecto a sus propiedades térmicas puede soportar  $220^\circ\text{C}$  sin degradarse [5].

Variados compuestos reforzados con fibras de fique han sido manufacturados y caracterizados física, química, mecánica y dinámicamente,[6][7][8][9]. El análisis dinámico más utilizado es el DMA, el cual permite conocer el módulo de almacenamiento, tan delta y módulo de pérdida de los materiales compuestos de matriz polimérica [10],[11]; pero no permite establecer si el sistema entrará en resonancia según la frecuencia de excitación.

Para conocer estas últimas características se utiliza el análisis modal, el cual tiene por objeto encontrar las frecuencias naturales y formas modales de un sistema, que pueden ser determinadas por simulación, experimentación o de forma analítica [12].

El análisis modal usualmente se ha realizado en aplicaciones mecánicas con materiales metálicos [13][14]

[15]. Sin embargo, no se encuentra suficiente información sobre su uso en materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales [16].

Por esta razón, en el presente trabajo de investigación se tiene como objetivo la aplicación del análisis modal sobre un material compuesto de resina bioepoxy reforzado con fibra de fique colombiano. Se compararon las frecuencias naturales obtenidas mediante el método experimental según la medición de la respuesta en frecuencia (FRF), un análisis analítico a partir de la teoría de Euler- Bernoulli, y los resultados obtenidos en una simulación por elementos finitos. Finalmente, se determinó la desviación para conocer el porcentaje de error entre los valores obtenidos con cada una de las técnicas analizadas.

## III. MATERIALES Y FABRICACIÓN DEL COMPUESTO

La resina utilizada como matriz ha sido la SuperSap®, resina epoxídica procedente de materiales renovables y suministrada por Entropy Resins. El porcentaje de resina catalizador fue de 100:33 en peso. Como refuerzos se utilizaron fibras naturales fique trenzado bidireccional 0/90 no equilibrado 2:1, con un gramaje de  $530 \text{ g/m}^2$ , suministrado por la empresa Coohilados del Fonce LTDA. Los laminados se obtuvieron mediante el proceso de infusión en vacío con 3 capas de fibra natural como refuerzo.

### A. Prueba de tensión

El ensayo de tensión se realizó en una máquina universal marca MTS modelo C43.104 de  $10 \text{ KN}$ , siguiendo la normativa ASTM D3039/D3039M, como se observa en la Fig. 1.

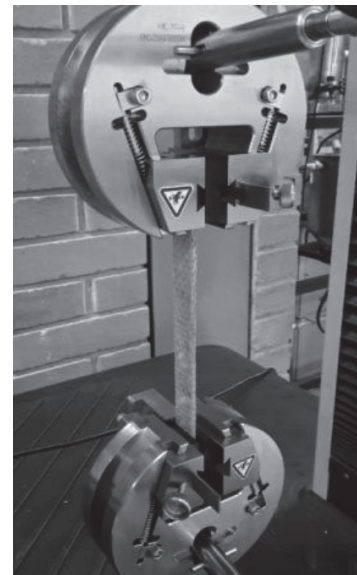


Fig. 1. Ensayo de tensión de material compuesto reforzado con fibra de fique.

El coeficiente de Poisson se obtuvo por medio de dos extensómetros. La geometría de las probetas utilizadas fue de  $25\text{mm} \times 250\text{mm} \times 2,5\text{mm}$ . Se probaron cinco probetas a una velocidad de  $2 \text{ mm/min}$  y una temperatura de  $24,2^\circ\text{C}$ , como lo exige la norma.

### B. Microscopia electrónica de barrido

La morfología del compuesto fue analizada en un microscopio electrónico de barrido marca Tescan, modelo MIRA 3 FEG-SEM. La muestra fue metalizada en un baño de oro, con el fin de mejorar su conductividad eléctrica. El propósito de la técnica es evaluar la adhesión fibra-matriz

### C. Método Experimental, medición de la respuesta en frecuencia

El análisis experimental se realizó según metodología de la norma ISO 7626-2 “Mechanical vibration and shock -Experimental determination of mechanical mobility - Part 2: Measurements using single-point translation excitation with an attached vibration exciter”.

Se utilizó un shaker electrodinámico marca The Modal Shop, generándose un barrido sinusoidal hasta una frecuencia de 250 Hz. La magnitud de la excitación se midió con un sensor de fuerza PCB, referencia 208C02, acoplado al extremo superior del shaker, mientras que la respuesta fue medida por un acelerómetro PCB, referencia 352C68. El material compuesto fue acoplado al sensor de fuerza en uno de sus extremos, mientras que el otro permaneció de forma libre (sin restricciones), usando elementos elásticos. En la Fig. 2. se observa el montaje del ensayo.

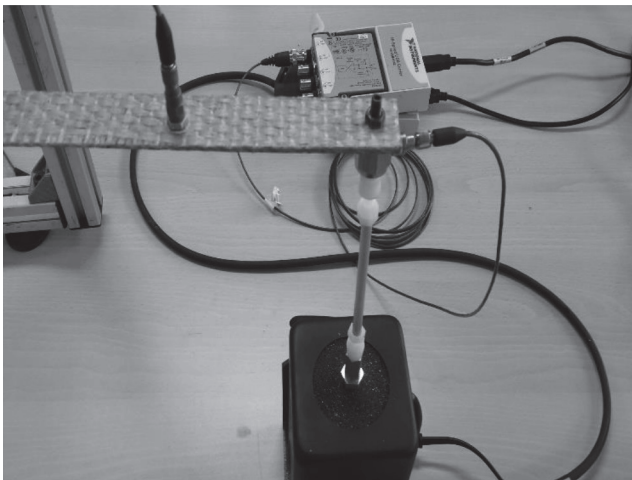


Fig. 2. Montaje de ensayo de medición de la respuesta en frecuencia del material compuesto.

### D. Método Analítico

Para la obtención de las frecuencias naturales por medio del análisis analítico, se utilizó el modelo de Euler- Bernoulli, el cual se describe como se relaciona a continuación (1):

$$E \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, I el momento de inercia,  $\rho$  la densidad y A el área transversal de la barra, con las siguientes condiciones de frontera (2), (3).

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^3 v}{\partial t^3} = 0 \quad (3)$$

Resolviendo la ecuación (1) se obtiene que la frecuencia natural es igual a (4):

$$W_n = \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} * a^2 \quad (4)$$

Donde L es la longitud y a es  $1/(2\pi)$  veces el número de ciclos en la longitud de la barra, el cual se obtiene de la ecuación característica de cada uno de los modos de la probeta para una viga Corredizo-free.

### E. Simulación por elementos finitos.

Para el análisis de elementos finitos se utilizó el software comercial Ansys 17.1; en el mismo se emplearon elementos sólidos de 4 nodos en 2D, asumiendo deformación plana y las condiciones de libertad en un extremo y corredizo en el otro.

## IV. RESULTADOS

A continuación, se relacionan los diferentes resultados obtenidos de cada uno de los ensayos y métodos aplicados.

### A. Ensayo de tensión

En la Fig. 3. se observa la curva esfuerzo-deformación del material compuesto bioepoxy/fibra de fique.

Los resultados demuestran un comportamiento elástico-lineal del compuesto debido a la naturaleza frágil de la resina. Los valores promedio del esfuerzo máximo a la rotura y del módulo de elasticidad son de  $61,8 \text{ MPa} \pm 4,43 \text{ MPa}$  y de  $1320 \text{ MPa} \pm 320 \text{ MPa}$ , respectivamente.

El coeficiente de Poisson se obtuvo por método directo (Deformación lateral/Deformación axial), siendo este de un valor de 0,32. Estas propiedades alimentaron el modelo analítico y la simulación por elementos finitos.

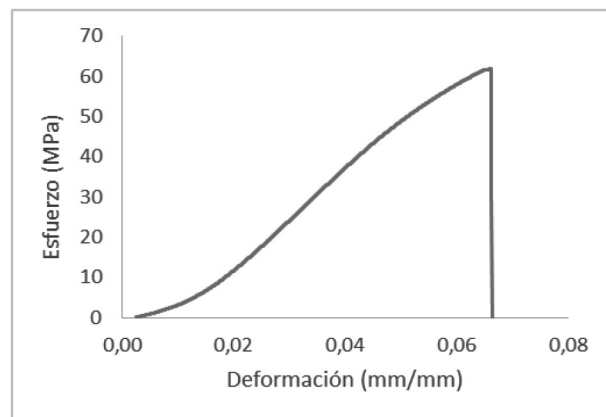


Fig. 3. Curva esfuerzo vs deformación del material compuesto reforzado con fibra de fique.

### B. Análisis de microscopia electrónica de barrido

De acuerdo con la Fig. 4, se observa una notable ausencia de adherencia entre la resina y fibra con una rotura de carácter frágil sin elongación. Esta carencia de unión interfacial es un factor determinante en los resultados del análisis modal

obtenido de modo experimental, teórico y por simulación, debido a la deficiente transmisión de la carga de la resina a la fibra.

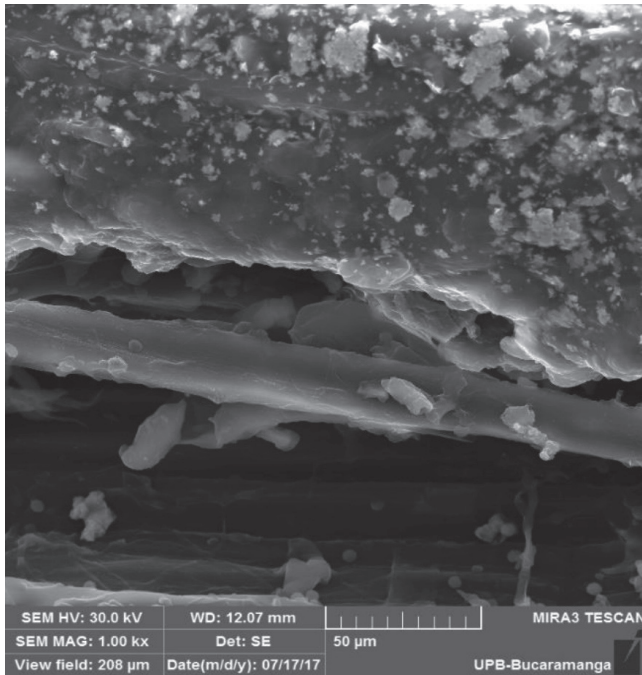


Fig. 4. Microscopia electrónica de barrido del compuesto bioepoxy/fibra de fique.

### C. Análisis experimental medición de la respuesta en frecuencia.

Como se observa en la Fig. 5, se obtuvieron tres picos en el rango de frecuencia de 0 a 250 Hz. Cada uno representa las frecuencias naturales del material ensayado, esto debido a que se obtiene una mayor respuesta (Aceleración) a una misma entrada (Fuerza), indicando que el material a esta frecuencia está en resonancia.

Las frecuencias naturales obtenidas de forma experimental del material compuesto reforzado con fibra de fique, se presentan en la Tabla I.

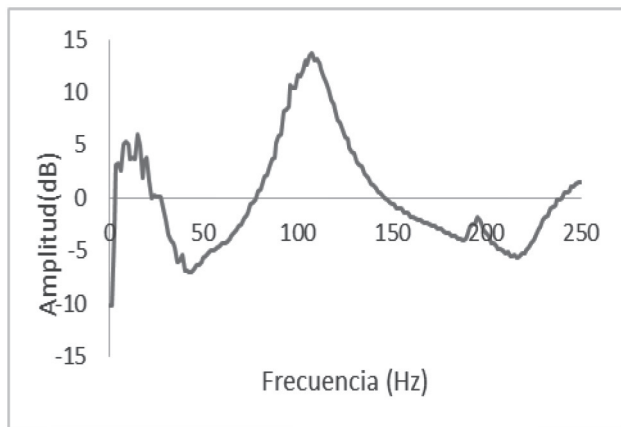


Fig. 5. Respuesta en frecuencia del compuesto bioepoxy/fibra de fique.

TABLA I.  
RESULTADOS DE LA FRECUENCIA NATURAL POR ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Modos	Frecuencia Natural (Hz) Experimental
Modo 1	17,75
Modo 2	107,5
Modo 3	195,25

### D. Análisis analítico, teoría de Euler- Bernoulli

Los resultados matemáticos que se obtuvieron al aplicar la ecuación de Euler – Bernoulli para los primeros tres modos de vibración se presentan en la Tabla II.

TABLA II.  
RESULTADOS DE LA FRECUENCIA NATURAL POR ANÁLISIS MATEMÁTICO

Modos	Frecuencia Natural (Hz) matemática
Modo 1	19,24
Modo 2	103,99
Modo 3	256,76

La densidad de la probeta para los cálculos fue de 924,6 kg/m<sup>3</sup>. El módulo de elasticidad se tomó del ensayo de tensión, mientras que la longitud y el área fueron definidas según la geometría de la probeta.

### E. Análisis de elementos finitos

En las Fig. 6, 7, 8, se observan los primeros tres modos de vibración y frecuencias naturales logrados mediante el análisis de elementos finitos obtenidos por Ansys.

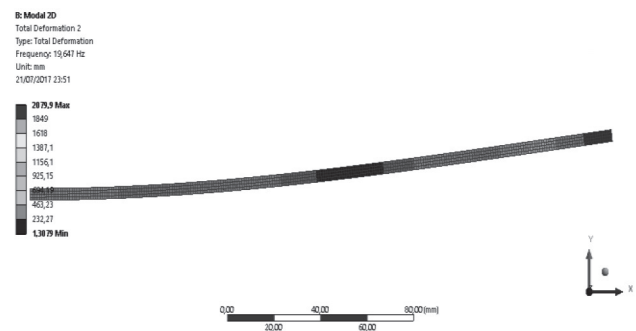


Fig. 6. Primer modo de vibración a la frecuencia natural 19,647 Hz.

Como se observa en la Fig. 6, el primer modo de vibración es de flexión teniendo un solo nodo (punto azul), punto donde el material no vibra. La deformación es mayor en el lado libre que en el corredizo ya que no hay restricción.

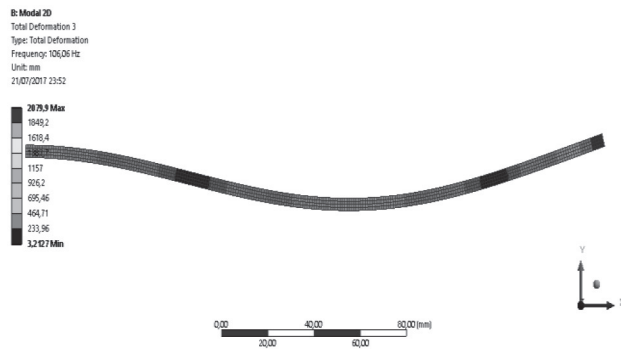


Fig. 7. Segundo modo de vibración a la frecuencia natural 106,06 Hz

Como se observa en la Fig. 7, el segundo modo de vibración también es de flexión teniendo dos nodos (puntos azules). La deformación sigue siendo mayor en el lado libre que en el corredizo ya que no hay restricción.

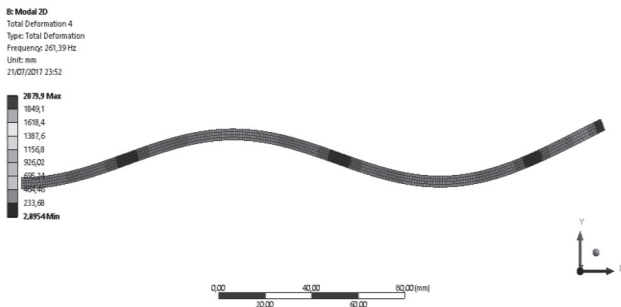


Fig. 8. Tercer modo de vibración a la frecuencia natural 261,39 Hz

Como se observa en la Fig. 8, el tercer modo de vibración también es de flexión teniendo tres nodos (puntos azules). La deformación sigue siendo mayor en el lado libre que en el corredizo ya que no hay restricción.

### F. Comparación de los resultados

De acuerdo con lo que se observa en la Tabla III, se obtienen porcentajes aceptables menores al 10% en los primeros dos modos de vibración entre los tres métodos; sin embargo, para el tercer modo el error aumenta considerablemente entre el análisis analítico y de elementos finitos con respecto al modelo experimental, obteniéndose porcentajes del orden del 25%.

TABLA III.  
PORCENTAJES DE ERROR ENTRE LOS MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Modos	%Error anal.- Expe.	%Error anal.- Elem fin.	%Error Elem fin.- Expe.
Modo 1	7,7	2,1	9,7
Modo 2	3,4	2,0	1,4
Modo 3	24	1,8	25,3

### V. CONCLUSIONES

Se obtienen porcentajes menores al 10% en los primeros dos modos de vibración entre los tres métodos; sin embargo,

para el tercer modo el error aumenta entre el análisis analítico y de elementos finitos con respecto al modelo experimental, debido a que el modelo de Euler- Bernoulli no tiene en cuenta el efecto de la rotación de la sección transversal y el desplazamiento lateral de la barra, lo que acrecienta la desviación del valor real de la frecuencia natural a medida que esta se aumenta. [17]. Asimismo, al configurar el modelo de elementos finitos se le ingresan los parámetros como una barra única interpretando el software que el análisis se realiza a un material homogéneo y lineal, y no como un material compuesto por capas de fibra y resina, donde no se tiene en cuenta la adhesión entre los mismos.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se refieren solo a los modos de flexión de la barra por su geometría, por lo que en futuros trabajos se deben evaluar los modos torsionales. Asimismo, se deben aplicar otras metodologías analíticas como lo es Shear, Rayleigh o Timoshenko para conocer su desviación en aplicaciones con materiales compuestos. De igual manera, se recomienda simular el material en el complemento de ANSYS para materiales compuestos, donde se pueden ingresar las características propias de la matriz y de la fibra, así como la distribución que tuvo esta en el momento en que se realizó la fabricación.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones al laboratorio de vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, quien proporcionó los equipos y software para la ejecución del análisis modal; y al laboratorio de materiales de la Universidad de Pamplona, quien fabricó la probeta del material del compuesto bioepoxy/fibra de fique.

### REFERENCIAS

- [1] Thakur, V. K., Thakur, M. K. "Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites," *Carbohydr. Polym.*, vol. 109, pp. 102–117, 2014.
- [2] Torres, J. P., Vandi, L.J., Veidt, M., Heitzmann, M.T. "The mechanical properties of natural fibre composite laminates: A statistical study," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 98, pp. 99–104, 2017.
- [3] Vaisanen, T., Das, O., Tomppo, L. "A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites," *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 582–596, 2017.
- [4] Gañán, P., Mondragon, I. "Thermal and degradation behavior of fique fiber reinforced thermoplastic matrix composites," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 73, no. 3, pp. 783–795, 2003.
- [5] Muñoz, M. F., Hidalgo, M. A., Mina, J. H., "Fibras de fique, una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial," *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. vol. 12, no. 2, pp. 60–70, 2014.
- [6] Rodríguez, L. J., Sarache, W. A., Orrego, C. E. "Compuestos de poliéster reforzados con fibra de plátano/banano (*Musa paradisiaca*) modificada químicamente. Comparación con fibra de vidrio y fique (*Furcraea andina*)," *Inf. Tecnol.*, vol. 25, no. 5, pp. 27–34, 2014.
- [7] Gómez, C., Vázquez, A. "Flexural properties loss of unidirectional epoxy/fique composites immersed in water and alkaline medium for construction application," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 3120–3130, 2012.
- [8] Valencia, C. A., Pazos-Ospina, J. F., Franco, E. E., Ealo, J. L., Collazos-Burbano, D. A., García, G. F. C. "Ultrasonic determination of the elastic constants of epoxy-natural fiber composites," *Phys. Procedia*, vol. 70, pp. 467–470, 2015.

- [9] Navia, D. P., Ayala A. A., Villada H. S. "Effect of cassava flour gelatinization on mechanical properties of bioplastics," *Biotecnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 13, no. 1, pp. 38–44, 2015.
- [10] Hidalgo-Salazar, M. A., Mina, J. H., Herrera-Franco, P. J. "The effect of interfacial adhesion on the creep behaviour of LDPE-Al-Fique composite materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 55, pp. 345–351, 2013.
- [11] Gañán, P., Mondragón, L. "Influence of Compatibilization Treatments on the Mechanical Properties of Fique Fiber Reinforced Polypropylene Composites," *Int. J. Polym. Mater.*, vol. 53, no. 11, pp. 997–1013, 2004.
- [12] Klimenda, F., Soukup, J. "Modal Analysis of Thin Aluminium Plate," *Procedia Eng.*, vol. 177, pp. 11–16, 2017.
- [13] West, B. M., et al. "Modal analysis of metal additive manufactured parts," *Manuf. Lett.*, vol. 13, pp. 30–33, 2017.
- [14] Minette, R. S., SilvaNeto, S. F., Vaz, L. A., Monteiro U. A., "Experimental modal analysis of electrical submersible pumps," *Ocean Eng.*, vol. 124, pp. 168–179, 2016.
- [15] Weis, P., Kučera, L., Pecháč, P., and Močilan, M. "Modal Analysis of Gearbox Housing with Applied Load," *Procedia Eng.*, vol. 192, pp. 953–958, 2017.
- [16] Senthil Kumar, K., Siva, I., Jeyaraj, P., Winowlin Jappes, J.T., Amico, S. C., Rajini N. "Synergy of fiber length and content on free vibration and damping behavior of natural fiber reinforced polyester composite beams," *Mater. Des.*, vol. 56, no. October, pp. 379–386, 2014.
- [17] Han, S., Benaroya, H., Wei, T. "Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories," *J. Sound Vib.*, vol. 225, no. 5, pp. 935–988, 1999.



**Sergio Gómez.** Nació en Bucaramanga, Colombia. Ingeniero Mecánico de la Universidad Pontificia Bolivariana; realiza sus estudios de maestría en la Universidad de Pamplona. Ejerce profesionalmente en la Universidad Pontificia Bolivariana como coordinador de laboratorios. Entre sus campos de interés están las vibraciones mecánicas y los materiales compuestos.



**Bladimir Ramón.** Nació en Pamplona, Colombia. Ingeniero Metalúrgico de la Universidad industrial de Santander. Realizó sus estudios de doctorado en la Universidad del país vasco, en España. Ejerce profesionalmente en la Universidad de Pamplona como docente. Entre sus campos de interés están la ingeniería de materiales y los materiales compuestos.



**Rolando Guzmán.** Nació en Charalá, Colombia, Ingeniero Mecánico de la Universidad Industrial de Santander. Realizó sus estudios de doctorado en la Universidad Carlos III de Madrid, España. Ejerce profesionalmente en la Universidad Pontificia Bolivariana como docente. Entre sus campos de interés están el diseño y la caracterización de materiales.