



Elaboración de un material compuesto para la fabricación de sensores mecánicos

Development of a composite material for the manufacture of mechanical sensors

José Ignacio Ramírez*, Juan Felipe Soriano Peña, Carlos Manuel Sánchez González, Miguel Villagómez Galindo

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Historial

Manuscrito recibido: 16 de agosto de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

*Autor para correspondencia

José Ignacio Ramírez

e-mail: 1214885b@umich.mx

Resumen

En el presente trabajo, se propone un material compuesto de silicona y fibra de carbono para su aplicación en sensores de vibraciones, empleados en rotores y apoyos de maquinarias y mecanismos, con la finalidad de detectar y prevenir fallas de funcionamiento. Se fabricaron probetas variando la proporción de fibra de carbono y silicón, a las cuales se les realizaron ensayos destructivos de compresión para obtener propiedades como el Módulo de Young, el coeficiente de Poisson, la densidad y la resistencia eléctrica. Con estos resultados, se realizaron análisis modales por el método de elemento finito empleando el software ANSYS, ya que es importante evitar que el material entre en resonancia con el sistema que se va a medir. Los resultados muestran que el porcentaje de fibras de carbono influye de manera directa en las propiedades del compuesto, aumentando la rigidez con el contenido de fibra de carbono. Se demuestra que es posible crear sensores de este material compuesto para detectar vibraciones mecánicas.

Palabras clave: fibra de carbono, vibraciones, sensor, piezoresistividad.

Introducción

El estudio de la fibra de carbono ha ido en aumento en los últimos años por sus propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, de fricción, entre otras (Islam *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020; Yao *et al.*, 2019), y que están directamente relacionadas con aplicaciones industriales en la ingeniería biomédica, la biotecnología, el sector aeroespacial, e incluso en la fabricación de sensores y actuadores.

Los sensores fabricados a partir de fibra de carbono aprovechan una propiedad llamada

Abstract

In this work, a silicone and carbon fiber composite material is proposed for application in vibration sensors used in rotors and supports of machinery and mechanisms, with the purpose of detecting and preventing malfunctions. Probes were manufactured by varying the proportion of carbon fiber and silicon, on which destructive compression tests were carried out to obtain properties such as Young's Modulus, Poisson's coefficient, density and electrical resistance. With these results, modal analyzes were carried out by the finite element method using the ANSYS software, since it is important to prevent the material from entering into resonance with the system to be measured. The results show that the percentage of carbon fibers directly influences the properties of the composite, increasing the stiffness with the carbon fiber content. Thus, it is possible to create sensors from this composite material to detect mechanical vibrations.

Keywords: carbon fiber, vibrations, sensor, piezoresistivity.

piezoresistividad, lo que se traduce como el cambio de conductividad eléctrica al presentarse una deformación, así que la fuerza aplicada al material se convierte en diferentes señales eléctricas. Desde el primer reporte del efecto piezoresistivo de la fibra de carbono en 1969 (Conor y Owston, 1969) se le ha estudiado para la fabricación de sensores de presión, deformación, carga, vibración etc. (Huang *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 1999; Okamoto *et al.*, 2023).

La fabricación de sensores elaborados a base de fibra de carbono ha ido en aumento en los últimos

años debido a su estructura y procedimiento de fabricación simples y un circuito de lectura fácil que permite una producción masiva de sensores (Farhath y Samad, 2020). Con la gran versatilidad que tienen pueden ser utilizados tanto en el sector industrial, civil e incluso en el sector salud y esto es debido principalmente a su flexibilidad en comparación con otro tipo de sensores (ópticos, capacitivos e inductivos), ya que las nuevas tecnologías necesitan que los sensores se adapten en el exterior de curvas complejas (Chen *et al.*, 2021).

El monitoreo del estado de los equipos mecánicos es una herramienta que ayuda a detectar problemas o fallas en los mismos, y ha generado un gran impacto en la industria por sus beneficios económicos y su capacidad para diagnosticar de manera temprana un posible daño a los sistemas. Por lo tanto, la identificación y análisis de fallos mejora el rendimiento del sistema y evita que se presenten futuros inconvenientes. Así, es necesario implementar sensores en las máquinas que registren continuamente parámetros como las vibraciones, temperatura, presión, entre otros, especialmente en las que se encuentran con difícil acceso para predecir tanto el tiempo de vida útil de los elementos como identificar alguna falla imprevista y así evitar mantenimientos no previstos que afectan la producción.

Materiales y métodos

Para el análisis del comportamiento del compuesto flexible a base de silicona y fibras de carbono (**Figura 1**), se realizaron 3 diferentes tipos de probetas, cada una con un porcentaje diferente de fibras de carbono, la relación geométrica de las probetas es de 1:2 (1 pulgada de diámetro por 2 pulgadas de largo) y son denominadas como C100, C70 y C50. La denominación “C” es por compuesto y 50 por el porcentaje de fibra en adición, para el compuesto C50, por ejemplo, por cada gramo de silicona incluyendo el diluyente y catalizador se adiciona medio gramo de microfibras de carbono. El procedimiento de la fabricación inicia con la preparación de la silicona RTV incluyendo un 15% de aceite de silicona como diluyente y 1.5% de catalizador líquido, se mezcló y se sometió a un proceso de extracción de burbujas de aire utilizando

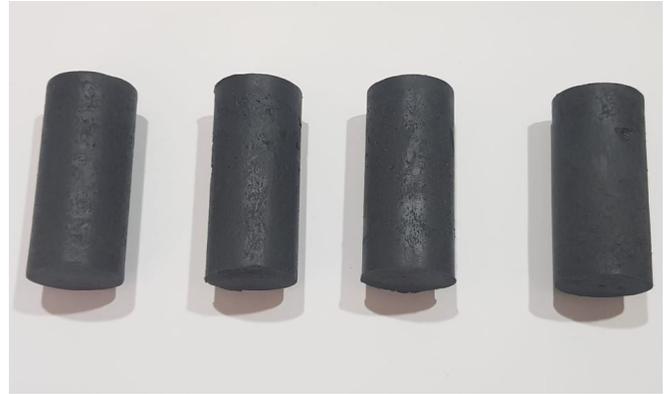


Figura 1. Probetas de silicona y fibra de carbono.

un cámara de vacío a 23 in-Hg. Posteriormente, se adicionó el porcentaje de fibras indicadas para cada probeta. El compuesto se inyectó en un molde y se dejó vulcanizar por 72 h (Sánchez-González *et al.*, 2020).

El material flexible que se realizó tiene como finalidad actuar como un sensor de vibración por lo que es importante realizar un análisis modal, ya que se debe evitar que el material entre en resonancia con el sistema que se va a medir. Este análisis se realizó por el método de elementos finitos con la ayuda del software ANSYS, para dicho análisis es necesario conocer diferentes propiedades del material como lo son: el módulo de Young, el módulo de Poisson y la densidad, para dichas propiedades se realizaron ensayos destructivos de compresión.

La lectura de datos se realiza con un microcontrolador (para este caso en particular se utiliza un Arduino Uno) el cual se conecta al compuesto como se muestra en la **Figura 2**, el microcontrolador es alimentado por medio del cable USB con un voltaje de 5V, el sensor es alimentado

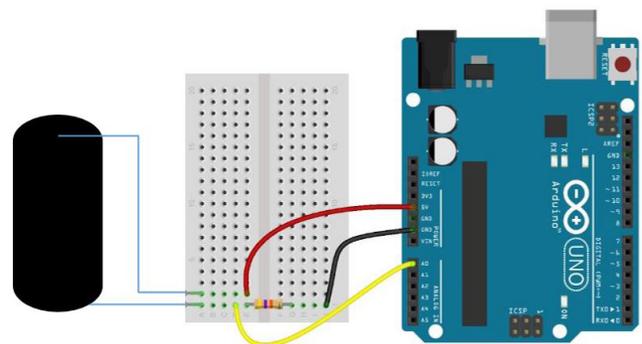


Figura 2. Diagrama de conexión.

por el microcontrolador a través de una de sus conexiones de alimentación de 5V y una de sus salidas a tierra GND estando esta última conectada en serie a un a resistencia, esto para reducir la corriente en el circuito, y por último conectado en paralelo con la resistencia y el sensor el cable de la señal se conecta a la entrada analógica A0 (**Figura 2**).

Resultados

La piezoresistividad de los compuestos flexibles puede ser determinada mediante un conjunto de ensayos que someten al material a cambios físicos, estos modifican su conductividad e impedancia, por ejemplo, la temperatura, los campos eléctricos, magnéticos, las ondas vibratorias, y las cargas estáticas, así como las fuerzas ejercidas a tracción y compresión. Al cambiar la forma física su resistividad específica cambia y por consecuencia su impedancia total (Sánchez-González *et al.*, 2020).

En las curvas obtenidas del ensayo de compresión que se muestra en la **Figura 3** se observa el comportamiento de deformación debido a la fuerza de compresión ejercida. Este ensayo destructivo considera una deformación lineal del 50% de la probeta. La curva, muestra el comportamiento del material flexible C100 que es el que tiene mayor cantidad de fibras de carbono, presentando una mayor rigidez, por tal razón, la matriz del compuesto

tiene una tendencia mayor al desgarre, a presentar deformaciones plásticas y grietas a un esfuerzo de compresión $-\epsilon=0.2$, inicialmente presenta fallo del tipo “Barreling”, agrietamiento y formación de grandes cúmulos, posteriormente falla por fractura frágil a $-\epsilon=0.3$ que es más del 30% de la deformación lineal de la probeta. En la figura 5 la curva cuatro representa a una probeta cilíndrica fabricada sin fibras de carbono y posee la menor rigidez, es más flexible, su matriz tiene menos tendencia al desgarre y puede deformarse más del 50% de su longitud inicial, con $-\epsilon=0.5$ se aprecia una deformación plástica pequeña y falla “Barreling”. Las curvas 2 y 3 de la **Figura 3**, muestran fallas a mayor valor de deformación respecto a la de mayor rigidez C100, evidentemente por su menor contenido de fibras de carbono (Sánchez-González *et al.*, 2020).

En la **Figura 4** se observan los resultados del ensayo sobre comportamiento resistivo del compuesto para tres probetas con diferente contenido de fibras de carbono respecto a la fuerza de compresión ejercida, que produce una deformación elástica en el compuesto, afectando su resistencia eléctrica y presentando un comportamiento piezoresistivo.

Dadas las curvas obtenidas en los ensayos se realizó un ajuste en las curvas para determinar los valores del módulo de Young y el coeficiente de Poisson además de determinar las densidades de los compuestos, dichos valores se muestran en la **Tabla 1** y **Figura 5**.

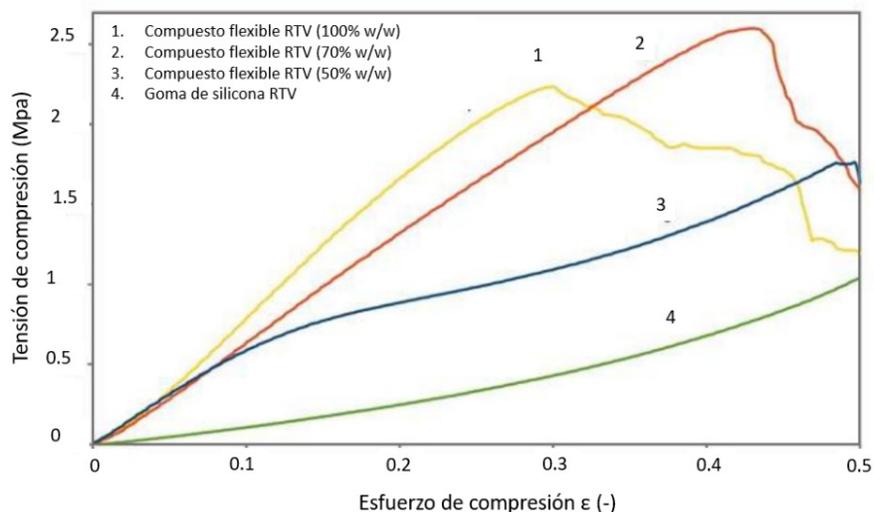


Figura 3. Ensayo destructivo a compresión de cuatro probetas de compuesto flexible.

Tabla 1. Propiedades de las probetas

Espécimen	Módulo de Young (MPa)	Coficiente de Poisson	Densidad (Kg/m ³)
C100	8.2	0.2	1445.218
C70	6.5	0.2	1262
C50	3.06	0.2	1321.37

Para el análisis modal se modeló una geometría para los 3 especímenes ya tienen las mismas dimensiones (1 in de diámetro por 2 in de largo), el modelado se realizó en el software ANSYS como se muestra en la **Figura 6a**.

El mallado de la probeta se realizó de igual manera con el software ANSYS, usando el método de multizone con hexa/prism como tipo de malla asignada con un tamaño promedio de elemento de 0.7 mm **Figura 6b**. Para realizar el análisis modal se especificó la base de la probeta como un soporte fijo, para este tipo de análisis no es necesaria la aplicación de alguna fuerza externa.

El análisis modal para los especímenes C100, C70 y C50 muestra un total de 4 modos de vibración para cada espécimen como se muestra en la **Tabla 2**, el primer modo de vibración es denominado modo fundamental y coincide con la frecuencia natural de

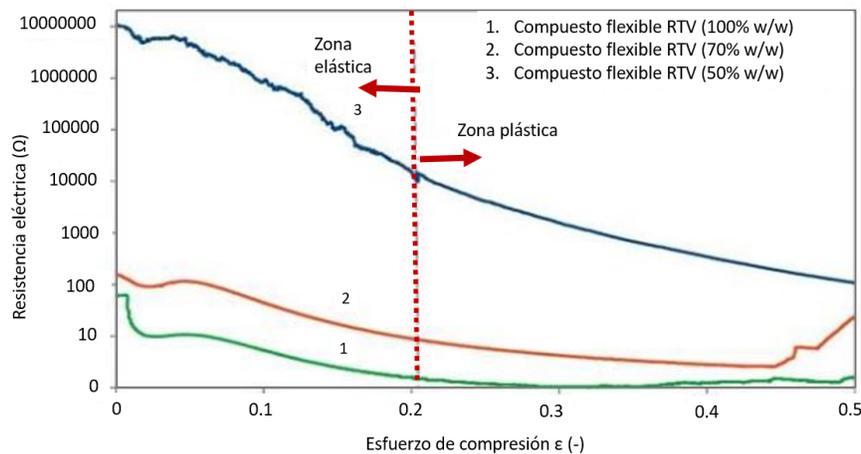


Figura 4. Ensayo de compresión de tres cilindros de compuesto flexible piezoresistivo con diferente piezoresistividad específica.

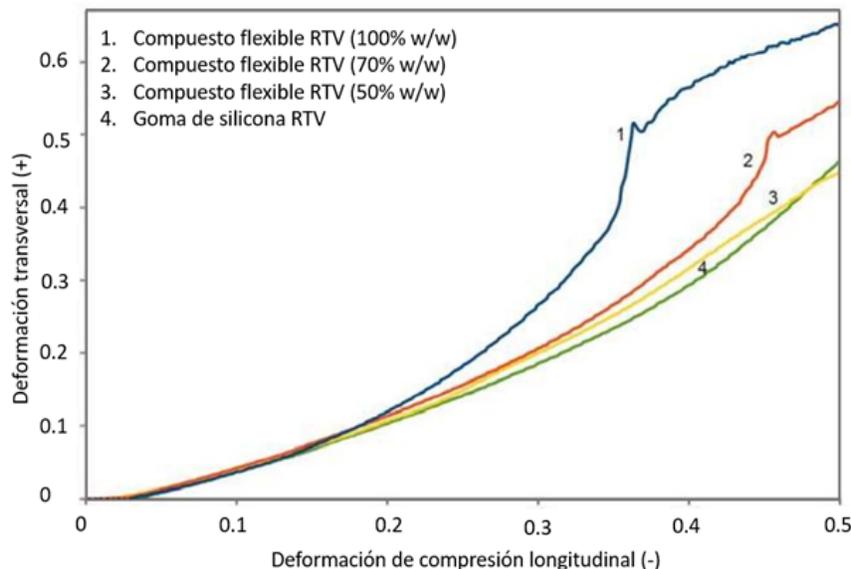


Figura 5. Coeficiente de Poisson.

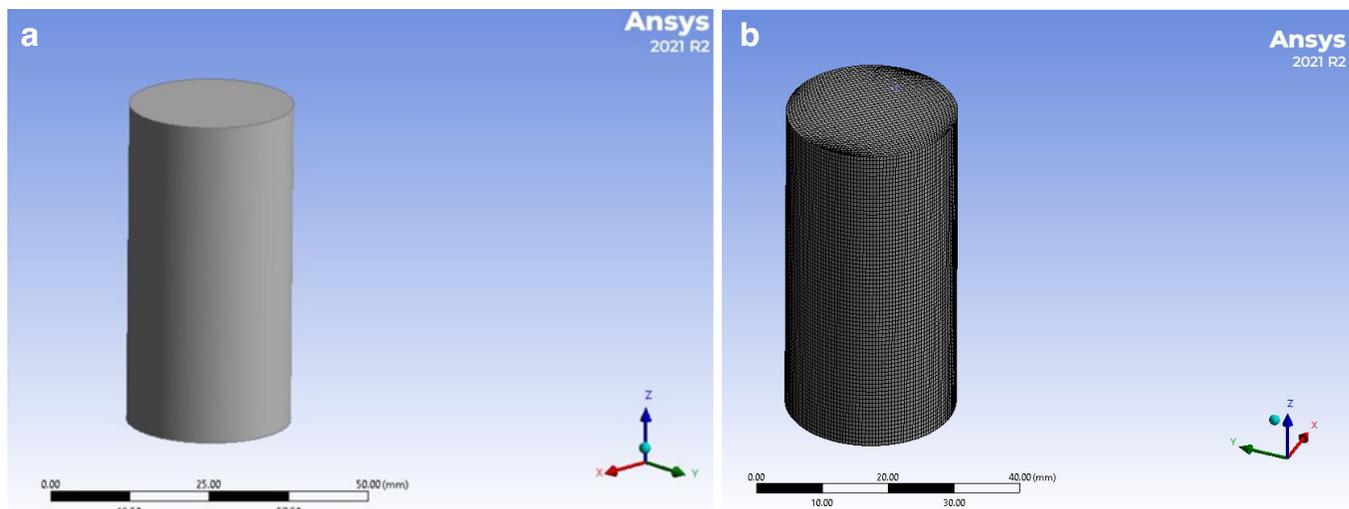


Figura 6. Análisis modal en ANSYS, a) modelo de la probeta, b) mallado de la probeta.

Tabla 2. Frecuencias de los modos de vibración

Valores de Frecuencia en Hz					
C100		C70		C50	
1°	91.054	1°	86.49	1°	57.995
2°	234.47	2°	222.72	2°	149.34
3°	364.77	3°	346.48	3°	232.33
4°	378.13	4°	359.18	4°	240.84

la probeta, es decir a la que responderá de forma prioritaria.

Conclusiones

Como era de esperarse el porcentaje de fibras de carbono influye de manera directa en las propiedades del compuesto, se puede observar que la rigidez del compuesto es directamente proporcional a la cantidad de fibras de carbono; entre mayor sea la cantidad de fibras mayor será la rigidez de este, por lo que se debe establecer la mejor combinación del compuesto. Es posible fabricar un sensor capaz de detectar las vibraciones mecánicas ya que con la propiedad de piezorresistividad que posee el material se puede detectar la variación en la deformación de este por medio de cambios de voltaje pudiéndose asociar al incremento de la amplitud de la onda de la vibración dada por el desgaste o daño en alguno de los componentes del sistema.

Referencias

Chen X, Zeng Q, Shao J, Li S, Li X, Tian H, Liu G, Nie B, Luo Y (2021). Channel-crack-designed suspended sensing membrane as a fully flexible vibration sensor with high sensitivity and dynamic range. *ACS Applied Materials & Interfaces* 13(29):34637–34647. doi:10.1021/acsami.1c09963.

Conor PC, Owston CN (1969). Electrical resistance of single carbon fibres. *Nature* 223(5211):1146–1147. doi:10.1038/2231146b0.

Farhath M, Samad M F. (2020). Design and simulation of a high sensitive stripped-shaped piezoresistive pressure sensor. *Journal of Computational Electronics* 19(1):310–320. doi:10.1007/s10825-019-01429-w.

Huang J, Yang X, Liu J, Her S, Guo J, Gu J, Guan L (2020). Vibration monitoring based on flexible multi-walled carbon nanotube/polydimethylsiloxane film sensor and the application on motion signal acquisition. *Nanotechnology* 31(33):335504. doi:10.1088/1361-6528/ab8edd.

Islam M, Sadaf A, Gómez MR, Mager D, Korvink JG, Lantada AD (2021). Carbon fiber/microlattice 3D hybrid architecture as multi-scale scaffold for tissue engineering. *Materials Science and Engineering C* 126:112140. doi:10.1016/j.msec.2021.112140.

Lin L, Chu H-C, Lu Y-W (1999). A simulation program for the sensitivity and linearity of piezoresistive pressure sensors. *Journal of Microelectromechanical Systems* 8(4):514–522. doi:10.1109/84.809067.

Okamoto Y, Nguyen T-V, Takahashi H, Takei Y, Okada H, Ichiki M (2023). Highly sensitive low-frequency-detectable acoustic sensor using a piezoresistive cantilever for health

monitoring applications. *Scientific Reports* 13(1):6503. doi:10.1038/s41598-023-33568-3.

Sánchez-González CM, Soriano-Peña J-F, Rubio-Avalos JC, Pacheco-Ibarra JJ (2020). Fabrication of flexible piezoresistive sensors based on RTV-silicone and milled carbon fibers and the temperature's effect on their electric resistance. *Sensors and Actuators A: Physical* 302:111811. doi:10.1016/j.sna.2019.111811.

Wang Y, Zhao X, Wen D (2020). Fabrication and characteristics of a three-axis accelerometer with double L-shaped beams. *Sensors* 20(6):1780. doi:10.3390/s20061780.

Yao Y, Luo J, Duan X, Liu T, Zhang Y, Liu B, Yu M (2019). On the piezoresistive behavior of carbon fibers - Cantilever-based testing method and Maxwell-Garnett effective medium theory modeling. *Carbon* 141:283–290. doi:10.1016/j.carbon.2018.09.043.