



## Sensado de propiedades físicas en material compuesto de fibra de vidrio y resina de poliéster

Víctor Daniel Rincón Vázquez<sup>1</sup>, Higinio Juárez Ríos<sup>2</sup>, Miroslava Cano Lara<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Ing. Mecatrónica. TecNM-Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Irapuato, Gto.  
<sup>2</sup> Depto. Específicas. UPIIG-Instituto Politécnico Nacional, Silao, Gto.

### Resumen

Los materiales compuestos ofrecen alternativas como mejorar los refuerzos que proporciona un material individual. Este trabajo presenta el estudio del comportamiento de las variables físicas como deformación y temperatura interna como las vibraciones que se presentan en las probetas de material compuesto (resina de poliéster/fibras de vidrio). Para el monitoreo y control de los comportamientos físicos se empleó la tarjeta Raspberry Pi 3, una celda de carga de 10 kg en el interior del material compuesto junto con el módulo HX71 para el sensado de peso, un acelerómetro MPU-6050 para detectar las vibraciones ante un golpe controlado y un termopar tipo K en el interior del material compuesto junto con el módulo MAX6675 para realizar las medidas de temperatura. Los resultados de los estudios demuestran para el caso del monitoreo de peso en la probeta, una reducción en el peso percibido a 1/3 del real por lo tanto se logra un aumento en el rango del peso soportado de la celda de carga insitu. Para el caso de la probeta con el sensor in situ de temperatura se apreció que responde con valores aproximados a los cambios de temperatura de 2°C a 70°C, y finalmente el transductor de vibraciones entrego respuestas muy similares sin importar la ubicación de dicho transductor en la probeta comprobando así que el material transmite las vibraciones a toda su superficie.



## Introducción

En este proyecto se elaboran probetas de un material compuesto a base de resina de poliéster y fibra de vidrio en el cual se introducirán 3 transductores de diferentes tipos (temperatura, peso, vibración) para monitorear el comportamiento del material un tiempo determinado y de acuerdo al tipo de variable física que el transductor proporcione, se capturarán todos los datos para así poder ver el comportamiento del material compuesto. Se controlarán los transductores a través de la tarjeta Raspberry Pi 3 y un Arduino Uno.

## Objetivos

Construcción de probetas de materiales compuestos (resina de poliéster y fibras de vidrio). Sensado de diferentes variables físicas (peso, temperatura y vibraciones) dentro de un material compuesto. Realizar un monitoreo de los sensores al realizar distintas pruebas cuando se encuentra in situ. Con una previa caracterización en condiciones normales, sin introducir el transductor en el cuerpo de la probeta. Discutir los comportamientos que se producen ante la presencia de variables de entrada como cambios en la temperatura (-4°C, 31°C y 100°C), el aplicar diferentes pesos (1, 3 y 5 kg) a la probeta de peso y aplicar una fuerza externa (golpe) en diferentes posiciones a la probeta de vibraciones.

## Metodología

Se decidió realizar el control mediante una Raspberry Pi 3 debido a que la mayoría de los trabajos de sensores realizan el control mediante Arduino sin embargo existen otras plataformas que pueden funcionar de manera similar y que no son tan empleadas por lo cual de esta forma también se incentiva a emplear nuevas plataformas o tecnologías y no resignarse a la forma tradicional, además de poseer una mayor velocidad de procesamiento de datos y proporcionar un programación orientada objetos con la cual puede crearse interfaces gráficas para facilitar el manejo y la presentación de resultados. Los materiales seleccionados para realizar las probetas son los más básicos que sirven como base para futuras investigaciones. Las variables físicas de temperatura, peso y medición de



frecuencias ante un impacto que se van a monitorear en el material compuesto in situ, se realizan mediante un sensado durante el tiempo que se ejecute la experimentación. Los sensores que serán internos son la celda de carga y el termopar tipo K, los cuales entregaran una cadena de bits de acuerdo a los efectos que se les apliquen y el sensor ex situ acelerómetro MPU-6050 entrega una matriz con valores correspondientes a la velocidad y aceleración en cada eje.

### M. Experimental

Los materiales empleados en el estudio del material compuesto ante variaciones físicas son:

Resina de Poliéster	Acelerómetro MPU-6050
Fibra de Vidrio	Termopar tipo K y módulo MAX6675
Moldes de plástico o silicona	Arduino Uno
Celda de carga de 10 Kg y módulo HX711	Raspberry Pi

Tabla 1: Materiales para el análisis de variaciones (in situ, ex situ) en materiales compuestos.

Para la elaboración de las probetas se necesitó un molde de plástico, la técnica de depósito fue espolvorear la fibra de vidrio por capas (fig. 1a) y se prepara la mezcla de la resina de poliéster con el catalizador (por cada 2 gramos de resina se agrega una gota de catalizador), se vierte y se mezcla de una manera en la que se eviten las burbujas dentro del material hasta alcanzar una capa aprox. 10 mm. Dependiendo del estudio que se requiera realizar en la probeta se introducen de manera individual los sensores (celda de cargar y termopar tipo K). La figura 1b y 1c muestra la celda de carga donde se continúa agregando fibra de vidrio y resina. Hasta llegar a la altura deseada y haber ocultado de manera homogénea y equitativa el sensor (ver figura 1d).

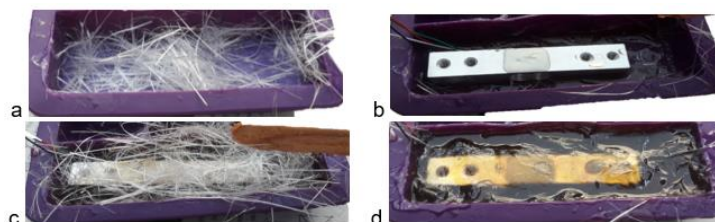


Imagen 1: Proceso de elaboración de las probetas de material compuesto.



Probeta de material compuesto	Sensor	Ubicación	Variable
1	Celda de carga 10 Kg	Interna	Peso percibido al aplicar distintas cantidades de peso.
2	Termopar tipo K	Interna	Temperatura en distintos entornos de prueba
3	MPU-6050	Externa	Vibraciones generadas al recibir una fuerza externa

Tabla 2: Probetas realizadas con material compuesto.

Para poder determinar el comportamiento de los sensores que proporcionan la señal de estudio respecto al sensor externo de referencia, se realizó una curva de calibración. De esta manera se tiene la señal de referencia (se encuentra en el aire) vs. la señal del sensor modificado (algunos se encuentran en el interior del material).

### CASO I

a). Para la probeta con el sensor de temperatura in situ se realizaron tres pruebas, las cuales fueron enfriamiento (introducir la probeta a un refrigerador) hasta aproximadamente  $-4^{\circ}\text{C}$ , reposo a temperatura ambiente y posteriormente un calentamiento hasta aproximadamente  $100^{\circ}\text{C}$ .

### CASO II

b). En la probeta con el sensor de peso in situ se aplicaron distintas cantidades de peso 1kg, 3kg y 5kg. La probeta se sujetó en un extremo de tal modo que se encuentre como una viga voladiza y al extremo opuesto los pesos en estudio.

### CASO III

c). La probeta con el sensor de vibraciones ex situ se sujeta de la misma manera que el caso II. Las mediciones fueron a diferentes distancias (cerca, mitad y en el extremo opuesto de la parte fija en la probeta).

En la imagen 2 se muestra el resultado final de las probetas, en la imagen 2a la probeta para sensado de temperatura, en la 2b la probeta para sensado de peso y por último la 2c la probeta de vibraciones.

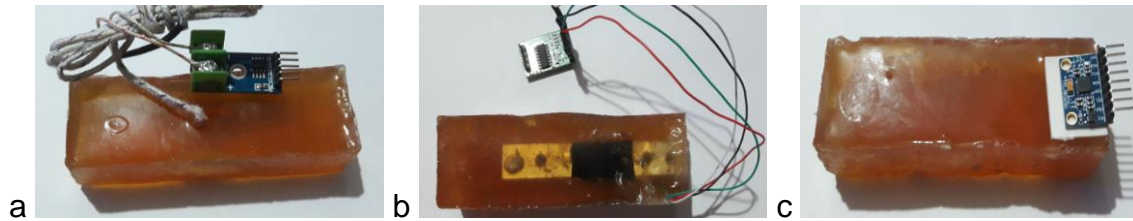


Imagen 2: Sensores montado en las probetas de material compuesto.

## M. Numérica

Para el estudio numérico se empleó una tarjeta de programación Raspberry Pi y una tarjeta Arduino uno para las entradas analógicas (conversión A/D) y ser procesada en la Raspberry. En este procesamiento se incluyen filtros de media móvil exponencial para estabilizar los datos de todos los sensores. El filtro pasa bajas y la transformada rápida de Fourier para el sensor de vibraciones donde se encuentra la frecuencia natural a la cual vibra el material compuesto. Se creó una interfaz gráfica donde se reciben los datos digitales de los sensores, para ser procesados y monitoreados en tiempo real. En el caso del sensor de vibraciones se procesa en MatLab el espectro de frecuencia y es comparado con una simulación numérica en un software de elemento finito.

## Resultados

### CASO I.

El sensado de la probeta de temperatura proporciona las temperaturas máximas alcanzadas por la resina lo cual nos definiría si los sensores pensados son aptos o no para el monitoreo esta temperatura fue de aproximadamente de 110 °C en un lapso de 22,5 minutos. En la figura 1a) se observa la variación de temperatura respecto al tiempo para el proceso de secado de las probetas, la señal azul es la temperatura externa o ambiente y la señal de color rojo es la temperatura sensado desde el interior de la probeta. En la figura 1b) se observa el comportamiento de la probeta sometida a distintas temperaturas. La señal de color azul es la temperatura externa, y la de color rojo es la temperatura de la probeta, el comportamiento de la probeta ante el cambio de temperatura muestra similitud entre los sensores in situ y ex situ. Se observa que el sensor interno percibe



menor cantidad de cambio de temperatura, su temperatura máxima fue de 70°C respecto a los 100°C del sensor externo. Este cambio se puede considerar debido alguna variación externa en el sensor al momento del encapsulado.

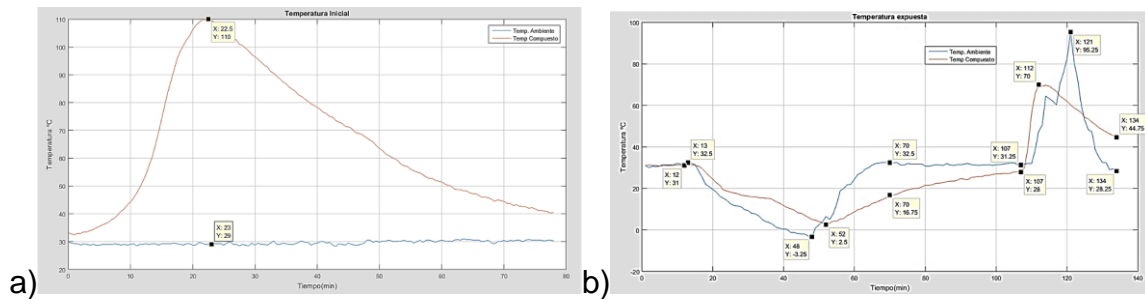


Figura 1: a) Temperaturas en el proceso de secado, b) Comportamiento térmico de la probeta a cambios de temperatura.

## CASO II.

Para el sensor de peso, debido al funcionamiento de la celda de carga es necesario fijar la probeta de un extremo. La figura 2 muestra las gráficas donde la señal roja es la referencia y la azul la señal obtenida del sensor de peso, existe un tiempo de estabilización antes y después de las pruebas (entre 10 y 15 minutos). La figura 2a corresponde a la prueba de un 1kg, se observa una reducción de sensibilidad debido a que el sensor interno percibe 300 gr aplicados en un tiempo de 2 min., aunque al momento de retirar el peso se logra observar un retardo en la respuesta esto podría ser debido al reacomodo interno del material compuesto que es más lento. De manera análoga a la prueba anterior en la figura 2b se observa un tiempo de estabilización aprox. de 2 minutos, además se observa una reducción del peso sentido aproximadamente 1kg de los 3kg aplicados. En la figura 2c se tuvo un sentido interno aproximadamente de 1.6kg respecto a los 5kg aplicados. Estas pruebas confirman que al aplicar un peso, el sentido es reducido 2/3 partes, sin embargo mantiene el comportamiento de la señal.

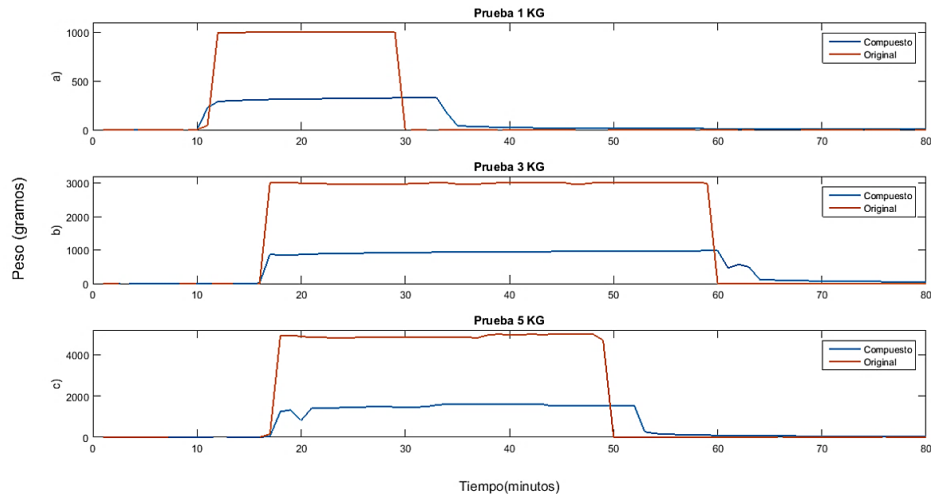


Figura 2: Comportamiento de probeta respecto al sensado de peso.

### CASO III.

Las pruebas del sensor de vibraciones se llevan a cabo para comprobar la frecuencia natural de oscilación del material compuesto, en la imagen 3 se observa las posiciones, a) medición en la posición final de la probeta, es la más próxima a la sujeción (Sensor Atrás), b) medición en una posición media (Sensor Medio) y c) medición en la posición inicial en la probeta, es decir, en el lado opuesto de la sujeción (Sensor Adelante). La sujeción se realizó mediante una prensa de hierro nodular en la cual se aseguró la probeta junto con una superficie lo bastante firme.



Imagen 3: Posición del sensor en pruebas de vibración, 3a posterior, 3b central, 3c extremo.

Para provocar una vibración en el material se golpeó con un pequeño martillo de aluminio y controlando la fuerza del golpe, en un extremo de la probeta mientras se hacían la captura de datos, esto se realizó para cada posición mencionada anteriormente, agrupando los datos obtenidos en una gráfica, la figura 3 muestra un comportamiento prácticamente idéntico sin importar la ubicación del sensor. La

señal azul, roja y amarilla, corresponden a las posiciones 3a, 3b y 3c respectivamente.

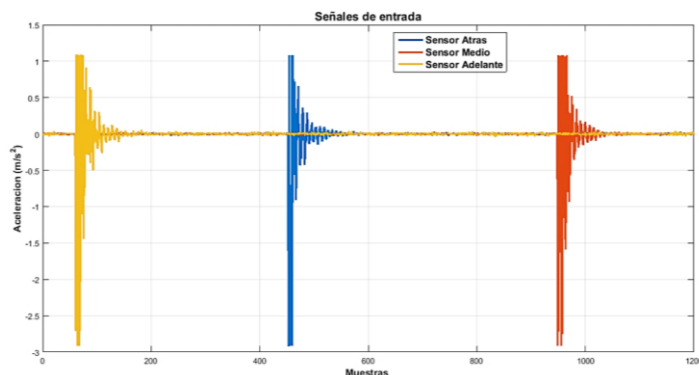


Figura 3: Respuesta de la probeta de vibraciones al impacto en distintas posiciones de sensado.

En la figura 4 se muestran los picos máximos de frecuencia en posiciones similares, 1040 Hz con el sensor ubicado en la parte más cercana a la base (3a), 1098 Hz con el sensor ubicado en el centro (3b) y 1102 Hz para el sensor ubicado en la parte más alejada a la base (3c).

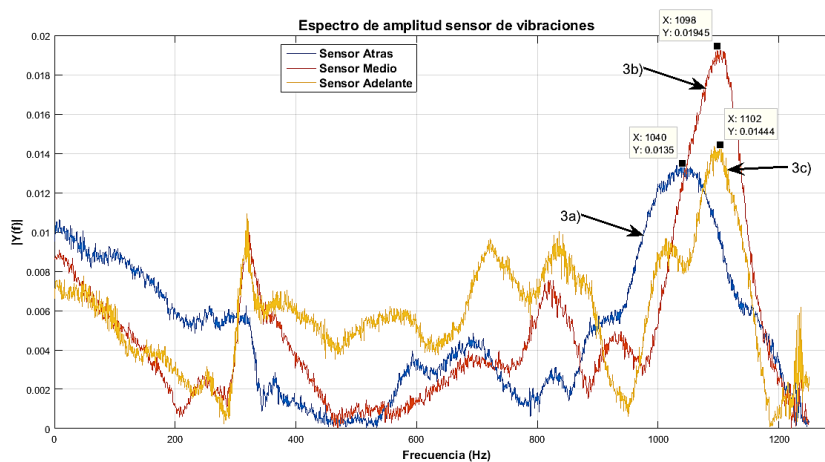


Figura 4: Espectro de frecuencia de las pruebas de vibraciones en diferentes posiciones en la probeta.

La simulación mecánica complementa el estudio de la generación de las frecuencias de la probeta. Se consideraron las propiedades mecánicas del material compuesto obteniendo de la simulación en ANSYS las frecuencias de la Imagen 4.





Tabular Data	
Mode	Frequency [Hz]
1	1117.4
2	1552.2
3	3277.9
4	5309.5
5	6220.2
6	6230.7

Imagen 4: Frecuencias obtenidas en ANSYS de la probeta de material compuesto.

En la comparación con la técnica experimental de sensado, se observa que la frecuencia más próxima a la primera frecuencia natural del material es la obtenida en la tercera prueba numérica (3c) con una frecuencia de 1102 Hz con lo cual se comprueba el correcto funcionamiento del sensor y la respuesta del material.

### Conclusiones

Se realizó un sensado y pruebas experimentales para entender la respuesta de los materiales compuestos ante diferentes estudios físicos como cambios de temperatura (in situ), peso (in situ) y frecuencias (ex situ). La prueba del sensor de peso-deformación se observó una reducción del peso sensado, es decir en las distintas pruebas se vio una reducción del peso a 1/3 del original, por ejemplo, para la prueba de 1kg el sensor insitu detecto aproximadamente 300 gr, sin embargo, mantuvo su similitud entre las señales adquiridas. Para el sensor de vibraciones se realizó la primera medición frecuencia natural del material debido al tiempo de muestreo del sensor que limita a solo encontrar la frecuencia de 1102 Hz por lo cual sería conveniente probar con otro tipo de sensor de vibraciones para mejorar su resolución. Finalmente, el sensor de temperatura interno en la probeta obtuvo un rango de 2 a 70°C respecto a los -4°C a 100°C del sensor externo. Si bien el estudio del comportamiento que presentan los materiales compuestos en su interior al someterse a diversos cambios físicos, el trabajo presentado ofrece un estudio inicial de las respuestas que se pueden tener en el interior de un material compuesto. Se incita a seguir realizando investigaciones con un mayor nivel de profundidad y tener un conocimiento mayor sobre este tipo de materiales compuestos, que pueden ser el futuro en el campo de construcción, elementos verdes o biodegradables, etc.



## Referencias

- Marcelo Semeria. (diciembre 2015), *Los Tres Teoremas*. Fourier - Nyquist - Shannon, 13 de mayo de 2019, Universidad del Cema, 6-9.
- Caipe Automatizacion (octubre 2017), Especificaciones de Celda de carga series g\_gl\_h, 1-2.
- Stupenengo, F. (2011), *Materiales compuestos.*, Autónoma de Buenos Aires.
- Castro Miniguano, C., Paderes Salinas, J. y Perez Salinas, C. y (2017), Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya aplicado a la industria automotriz. *Enfoque UTE*, 11.