



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Manipulación acústica de nanotubos de carbono en una resina epóxica Acoustic manipulation of carbon nanotubes in an epoxy resin

Rodríguez-González, J.A., Rubio-González, C., Pérez-Sánchez, A.

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Departamento de Energía, Av. Pie de la Cuesta #702, Col. Desarrollo San Pablo, C.P. 76125, Querétaro, Qro., México.

julio.rodriguez@cidesi.edu.mx; crubio@cidesi.edu.mx; alfonsopzsz@gmail.com

Innovación tecnológica: Método de orientación de nanotubos de carbono en una resina por ondas acústicas de ultrasonido.

Área de aplicación industrial: Industria del plástico, automotriz, aeronáutica y energía.

Recibido: 16 junio 2021

Aceptado: 25 enero 2022

Abstract

This paper describes a novel method to orient multi-walled carbon nanotubes (CNTs) in a liquid medium using ultrasonic standing wave field. To this end, an ultrasonic system was designed and instrumented to generate a standing acoustic wave using lead zirconate titanate (PZT) ceramic transducers. Experimental tests of CNT acoustic manipulation were performed on solvent (isopropyl alcohol) and polymer (epoxy resin) as liquid media using a rectangular acrylic mold. The results show that by exciting the PZT ceramic plates at a frequency of 1.475 MHz and a peak-to-peak voltage (V_{p-p}) of $8.3 V_{p-p}$ it is possible to generate an ultrasonic acoustic wave field capable to orient CNTs and generate parallel lines of up to 60 mm in length separated between acoustic nodes of 0.395 mm apart. Regarding the viscosity of the medium, a preponderant influence is observed to the acoustic manipulation of CNTs, which tends to reduce the acoustic radiation force when the viscosity of the medium is high. These results confirm the potential of the acoustic manipulation method by ultrasonic wave field for the developing and manufacturing of polymer composites reinforced with nanoparticles in a preferential direction.

Keywords: Carbon nanotubes, polymer, alignment, ultrasound acoustic wave, PZT plate.

Resumen

En este trabajo de divulgación científica se describe un método novedoso para manipular nanotubos de carbono (NTC) de pared múltiple en un medio líquido mediante ondas acústicas estacionarias de ultrasonido. Para tal fin, se diseñó e instrumentó un sistema ultrasónico capaz de generar ondas acústicas estacionarias en alta frecuencia usando placas cerámicas de titanato circonato de plomo (PZT). Las pruebas experimentales de manipulación acústica de NTC se realizaron en solvente (alcohol isopropílico) y polímero (resina epóxica) como medios líquidos usando un molde de acrílico con cavidad rectangular. Los resultados muestran que excitando las placas cerámicas PZT a una frecuencia de 1.475 MHz y voltaje pico-pico (V_{p-p}) de $8 V_{p-p}$ es posible generar ondas acústicas estacionarias capaces de orientar los aglomerados de NTC y producir líneas horizontales de hasta 60 mm de longitud separadas entre nodos de presión acústica de 0.395 mm de distancia en solvente. En relación a la viscosidad del medio se observó una influencia predominante en la manipulación acústica de los NTC, la cual tiende a reducir la fuerza de radiación acústica cuando la viscosidad del medio es elevada. La incorporación de una ligera cantidad de solvente en la resina epóxica permitió la orientación de los NTC a la misma frecuencia y voltaje aplicado en solvente solo. Estos resultados confirman el potencial del método de manipulación acústica de partículas por campo ultrasónico con la intención de desarrollar y fabricar materiales compuestos poliméricos reforzados con nanopartículas en direcciones preferenciales.

Palabras clave: Nanotubos de carbono, polímero, orientación, ondas acústicas de ultrasonido, placa PZT.

1. Introducción

Los nanotubos de carbono (NTC) son un tipo especial de nanoestructuras de carbono con altas propiedades mecánicas ($E = 1$ TPa), eléctricas ($\nu = 10^6$ S·m⁻¹) y térmicas ($\lambda = 3500$ W·m⁻¹·K⁻¹) así como también área superficial y relación de aspecto (largo/diámetro) elevados (>500) [1]. El reciente avance científico en el campo de la nanotecnología ha mostrado que los NTC incorporados en resinas poliméricas pueden mejorar sus propiedades físicas y mecánicas considerablemente [2]. Este aumento en las propiedades puede presentarse a concentraciones en peso relativamente bajas (menores al 1%) lo cual no influye en el peso final de la pieza de material compuesto fabricada [3]. Además, la combinación de propiedades de los NTC puede resultar en la obtención de materiales compuestos con propiedades multifuncionales [4,5], los cuales son de gran interés para un amplio número de

aplicaciones de ingeniería. Sin embargo, para poder transferir las propiedades intrínsecas de los NTC a las matrices poliméricas de manera eficiente es necesario aplicar técnicas adecuadas que permitan una dispersión homogénea, adherencia interfacial adecuada y alineación efectiva de los NTC en la matriz polimérica y así poder alcanzar el umbral de sus capacidades [3]. Los NTC pueden ser incorporados en las matrices poliméricas mediante métodos relativamente sencillos y complejos. Los métodos más utilizados incluyen mezclado en solución, polimerización *in-situ* y mezclado en fundido [2]. Sin embargo, la mayoría de estos métodos tienen como desventaja la incapacidad de alinear/orientar los NTC en la matriz polimérica durante la preparación del nanocompuesto por lo que éstos terminan dispersos de forma aleatoria. La alineación u orientación de los NTC en el polímero induce anisotropía en las propiedades mecánicas que puede ser de gran utilidad en

aplicaciones en donde las condiciones de carga estén orientadas en una dirección preferencial [6]. Esta orientación y alineación de los NTC puede ser aprovechada también para fabricar nanocompuestos poliméricos con conductividades eléctricas y térmicas en direcciones preferenciales, lo cual podría ser útil en aplicaciones de sensor eléctrico y térmico, entre otros.

Publicaciones recientes han mostrado que aplicando técnicas de alineación de NTC en polímeros por campos eléctricos y magnéticos es posible obtener mejoras significativas en las conductividades eléctricas de nanocompuestos comparada con materiales con NTC dispersos aleatoriamente [7-10]. Sin embargo, las capacidades y el potencial uso de esas técnicas en la industria son muy difíciles de implementar hasta la fecha debido a la complejidad del método para llevar a cabo la alineación. Esta necesidad abre la posibilidad de diseñar nuevas técnicas de alineación que permitan el desarrollo de materiales compuestos en una escala industrial. En este sentido, uno de los métodos de alineación de partículas que ha generado un creciente interés en los últimos años es la técnica de alineación mediante la aplicación de campo ultrasónico. El método de alineación consiste en aplicar ondas acústicas por ultrasonido en alta frecuencia en un medio líquido con NTC a través de cerámicas piezoeléctricas. Entre los pocos autores que han investigado esta novedosa técnica figuran Strobl y colaboradores [11], quienes realizaron estudios sobre alineación de NTC por ondas acústicas superficiales permitiendo orientarlos en ángulos de 25° y 45° en un medio líquido. Más tarde, Lim y colaboradores [12] reportaron el uso de la técnica basado en manipulación acústica para alinear NTC en sustratos sólidos. Por otro lado, Haslam y Raeymaekers [13] investigaron el uso de ondas estacionarias de alta frecuencia para alinear NTC en una resina de viscosidad ultra baja, mientras que Greenhall y colaboradores [14] reportaron un proceso para manufacturar un material nanocompuesto con

NTC alineados mediante la técnica de orientación por ondas acústicas por ultrasonido. Ambos trabajos demuestran que la técnica de alineación de NTC por campo ultrasónico puede ser implementada en resina de viscosidad ultra baja. Recientemente, Niendorf y Raeymaekers [15] reportaron el uso combinado de la técnica de orientación por ondas acústicas de ultrasonido y manufactura aditiva por estereolitografía para fabricar compuestos poliméricos con anisotropía en sus propiedades eléctricas. Lo anterior abre la posibilidad al desarrollo de una nueva generación de materiales compuestos avanzados [16,17]. Con esta motivación presente, este trabajo reporta la manipulación acústica de NTC de pared múltiple en dos medios líquidos: a) uno de baja viscosidad (solvente) y b) alta viscosidad (resina polimérica) mediante ondas estacionarias de alta frecuencia a través del estímulo piezoeléctrico de placas cerámicas de titanato circonato de plomo (PZT, por sus siglas en inglés). A diferencia de los trabajos publicados a la fecha, en esta investigación se presentan los resultados de la manipulación de NTC en solvente formando líneas de NTC de hasta 60 mm de longitud usando tres pares de placas cerámicas de PZT, lo cual representa un paso importante para la fabricación de probetas estándar de materiales con partículas orientadas en dirección preferencial.

2. Métodos experimentales y resultados

2.1 Materiales

Para este estudio se emplearon nanotubos de carbono (NTC) de pared múltiple adquiridos de la compañía Sunnano® (China). De acuerdo a los datos de la ficha técnica, los NTC son sintetizados por deposición química de vapor alcanzando una pureza >90%, un diámetro exterior promedio de 10-35 nm y longitud de 1-10 μm . Asimismo, se utilizó alcohol isopropílico de 99.5% de pureza (J.T. Baker®, EUA) y una resina epóxica (Epolam 2040) como medios líquidos de baja (2.43 mPa·s) y alta (1300 mPa·s) viscosidad para la orientación

de los NTC, respectivamente. La resina epóxica fue adquirida de la compañía Axon Technologies® (EUA), la cual es adecuada para procesos de manufactura por infusión de resina asistida por vacío debido a su baja densidad (1160 kg/m^3). Para la generación de las ondas estacionarias de ultrasonido se emplearon placas cerámicas de titanato de circonato de plomo (PZT) con dimensiones de $20 \times 15 \times 1 \text{ mm}^3$ y frecuencia en libre resonancia de 1.5 MHz. Las placas cerámicas de PZT fueron adquiridos del fabricante STEMINC® (EUA).

2.2 Generación de ondas estacionarias de ultrasonido

La generación de las ondas acústicas de ultrasonido se obtuvo utilizando placas cerámicas de PZT en un rango de frecuencias de 1 MHz hasta 1.5 MHz. Para lograr la manipulación acústica de NTC se utilizaron seis placas cerámicas colocadas de forma paralela (uno frente a otro) sobre las paredes de material acrílico, permitiendo la generación de la onda estacionaria y nodos de presión acústica de hasta 60 mm de longitud. La Figura 1 muestra un esquema del proceso físico de generación de onda estacionaria mediante el uso de las placas de PZT. La distancia (d_1) entre las paredes del acrílico (Figura 1) se determinó con base al número de nodos acústicos deseados (n), teniendo en cuenta que en una longitud de onda (λ) se forman dos nodos de presión acústica, ver Figura 1. Así, la separación total de las dos paredes es un múltiplo entero de las longitudes de onda ($d_1 = n * \lambda$), donde n es el número de nodos y λ es la longitud de onda.

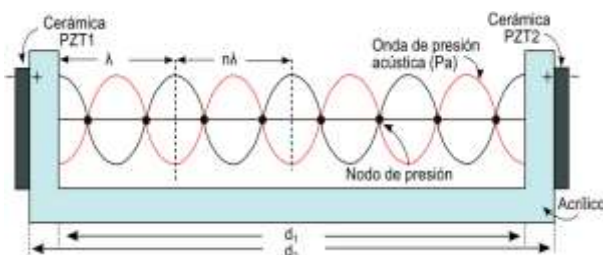


Figura 1. Generación de una onda estacionaria usando placas cerámicas PZT.

El molde para las pruebas experimentales de manipulación acústica de NTC se muestra en la imagen de la Figura 2. El molde fue fabricado de placas de acrílico. Las dimensiones de la cavidad rectangular del molde de acrílico fueron de $18 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$, como se muestra en la Figura 2.

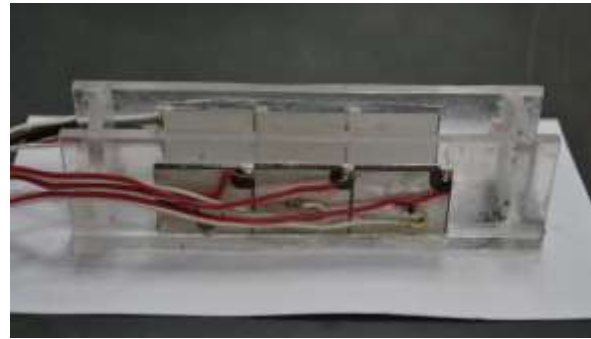


Figura 2. Molde de acrílico con los PZT para la generación de la onda ultrasónica.

Las 6 placas cerámicas de PZT fueron adheridos en las paredes del molde usando un adhesivo a base de cianoacrilato, el cual permite obtener una interfaz rígida entre la pared del acrílico y las placas cerámicas de PZT para una adecuada transferencia de la vibración. Para maximizar la transferencia de energía acústica, el espesor de la pared se determinó con base a la relación $\lambda/4$ de la frecuencia de excitación, así como un valor de impedancia calculado entre el valor de la placa PZT y el solvente. De este modo, la pared de acrílico utilizado fue de 2.94 mm de espesor.

2.3 Diseño del amplificador de alta frecuencia

Para la excitación eléctrica de las placas cerámicas de PZT se utilizó un amplificador de alta frecuencia y elevada capacidad de corriente eléctrica. El amplificador seleccionado fue el ADA 4870 de Analog Devices [18]. Este amplificador tiene una frecuencia de trabajo máxima de 52 MHz y una capacidad de corriente de 1 A. Para el diseño del amplificador se siguieron las guías proporcionadas por el proveedor en sus notas de aplicaciones [18,19].

La Figura 3 muestra el esquema general del sistema desarrollado para la excitación eléctrica de las seis placas cerámicas de PZT.

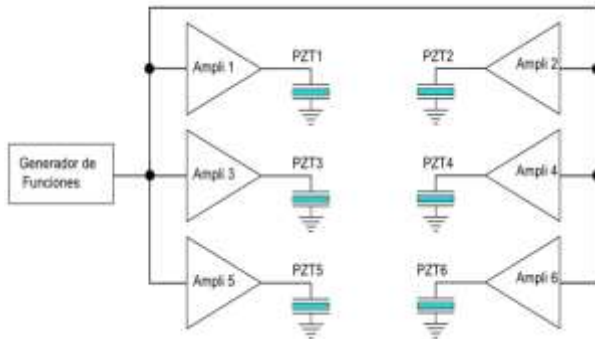


Figura 3. Esquema general del sistema de excitación para las placas cerámicas de PZT.

Como se puede notar en el esquema de la Figura 3, los seis amplificadores reciben de manera simultánea la señal del generador de funciones (AFG3151C Tektronix), con el fin de que los cerámicos vibren de manera sincronizada y produzcan ondas acústicas en fase (en el nodo las ondas están en contrafase). Las Figuras 4 y 5 muestran la tarjeta electrónica desarrollada para las pruebas en el laboratorio con sus elementos disipadores de calor adaptados a los chips.



Figura 4. Tarjeta electrónica con seis amplificadores ADA4870 de alta frecuencia.

Como se observa en la Figura 4, el amplificador integra una circuitería externa para protección contra sobretensión, así como un disipador adaptado al chip (Figura 5), debido al alto consumo de corriente por parte de las placas cerámicas de PZT. Si la temperatura interna

rebase su límite de trabajo ($\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$) el amplificador se apaga entrando en su modo de bajo consumo de corriente. Para evitar ello se adaptaron los disipadores de calor como se muestran en la Figura 5.

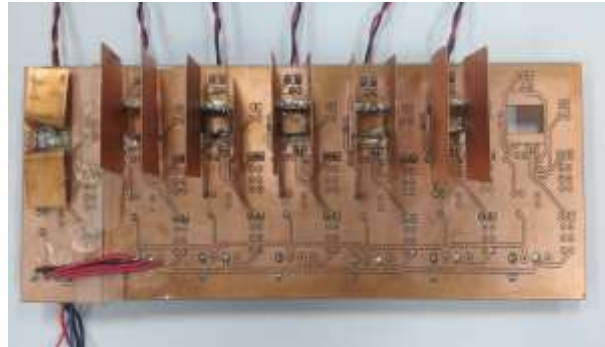


Figura 5. Tarjeta electrónica con los disipadores adaptados para cada amplificador.

Además de los disipadores de calor se utilizó un ventilador de computadora para reducir la temperatura debida al calor generado en los chips.

2.4 Dispersión y morfología de los nanotubos de carbono

Antes de llevar a cabo la manipulación de NTC mediante ondas de ultrasonido en alta frecuencia, los NTC (tal y como se recibieron del proveedor) fueron agitados mecánicamente y luego dispersados usando un baño ultrasónico para su observación y análisis. Como primer paso, la cantidad requerida de NTC (0.5% en peso respecto al peso de la resina) fue pesada en una balanza analítica y luego mezclada en alcohol isopropílico (volumen de 10 mL). Posteriormente, la mezcla de NTC y alcohol fue sonicada durante 15 minutos para la reducción de los aglomerados de NTC. Después de ese tiempo, la mezcla fue depositada sobre la superficie de un sustrato (fibras de vidrio) para la observación de su distribución después de su dispersión mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). La Figura 6 muestra una imagen MEB de los NTC depositados sobre la superficie de una fibra de vidrio después de

llevar a cabo el proceso de agitación mecánica y dispersión en un baño ultrasónico.

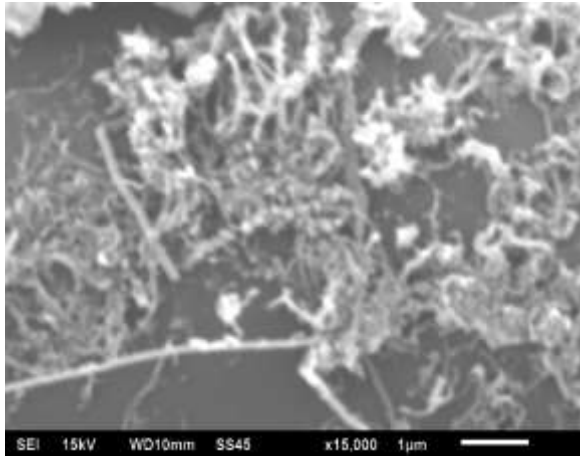


Figura 6. Imagen MEB de los nanotubos de carbono.

En la imagen MEB de la Figura 6, se puede observar que los NTC se encuentran algunos dispersos y otros agregados en forma de aglomerados y distribuidos de forma al azar en la superficie. Se observa una distribución de NTC relativamente homogénea con valores promedio de longitud de NTC de $\sim 1-4 \mu\text{m}$ en

concordancia con los valores indicados en la ficha técnica del proveedor.

2.5 Manipulación acústica de NTC por ultrasonido

Los resultados obtenidos de la manipulación acústica de los NTC mediante ondas estacionarias de ultrasonido se presentan en la Figura 7. Como se puede observar en la imagen (Figura 7), los NTC fueron exitosamente orientados en alcohol isopropílico formando líneas bien definidas a lo largo del molde y en dirección paralela a las placas cerámicas de PZT. Para lograr lo anterior, los cerámicos PZT fueron excitados con un voltaje pico-pico de $8 V_{p-p}$ a una frecuencia de resonancia de 1.475 MHz. Con el grupo de seis placas de PZT conectados de manera simultánea, se obtuvo líneas de NTC de 60 mm de longitud a lo largo del molde de acrílico (Figura 7). El total de líneas formadas (nodos/planos en el espacio de confinamiento) fue de 32, con una distancia entre nodos acústicos de 0.395 mm.

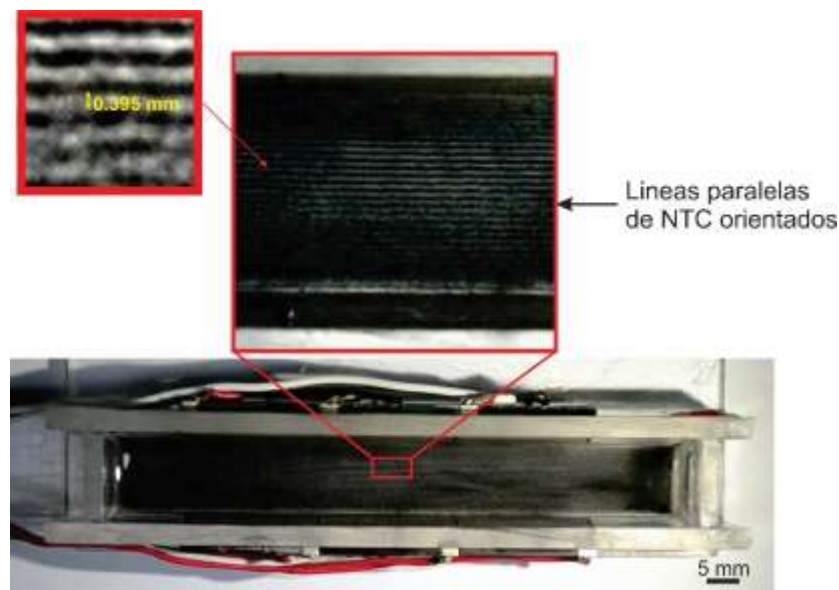


Figura 7. Fotografía tomada durante la manipulación acústica de NTC en alcohol isopropílico.

En la foto superior de la Figura 7 se observa claramente las líneas de NTC orientadas en dirección horizontal y paralela a la superficie de las placas cerámicas de PZT, validando la

capacidad de organización de los NTC en el solvente en una dirección preferencial por medio de ondas estacionarias de ultrasonido. Estos resultados concuerdan con los reportados

en la literatura para otros materiales [11-14]. Sin embargo, a diferencia de los trabajos publicados a la fecha, los resultados obtenidos en este trabajo muestran que esta metodología es capaz de formar líneas de NTC de hasta 60 mm de longitud usando tres pares de placas cerámicas de PZT. Con el fin de evaluar el efecto de la viscosidad en la manipulación acústica de los NTC, se aplicaron ondas estacionarias de ultrasonido en un medio de mayor viscosidad (resina epóxica) manteniendo la frecuencia (1.475 MHz) y voltaje pico-pico ($8 V_{p-p}$) aplicado en el caso de la orientación de NTC en solvente (alcohol isopropílico). Los resultados revelaron que la viscosidad de la resina ofrece una mayor resistencia a la fuerza de radiación acústica lo cual inhibe la orientación de los NTC en la resina epóxica sola. Lo anterior se debe a que la viscosidad de la resina incrementa con la presencia de los NTC y por tanto la fuerza que mueve las partículas en la dirección de la propagación de la onda no es suficiente para orientarlos. En el caso del alcohol isopropílico,

su baja viscosidad permitió la orientación de NTC por tiempos no muy prolongados de aplicación del campo ultrasónico (~10 s). Sin embargo, el comportamiento fue distinto para el caso de la resina epóxica, la cual tiene una viscosidad mucho más alta y en la cual las partículas necesitan una mayor magnitud en la fuerza de radiación acústica para lograr agruparlas. En este sentido, tomando en consideración que los métodos de vertido en solución se realizan generalmente mezclando solvente con la resina para mejorar la distribución de las partículas, se decidió realizar experimentos de manipulación acústica de NTC agregando una ligera cantidad de alcohol isopropílico en la resina (<10% en peso del peso total de la resina) y aumentar los tiempos de exposición al campo ultrasónico (>2 minutos). En la Figura 8 se muestra la imagen de la alineación de las nanopartículas realizada en resina epóxica con una cantidad muy pequeña de alcohol isopropílico (~1 mL).

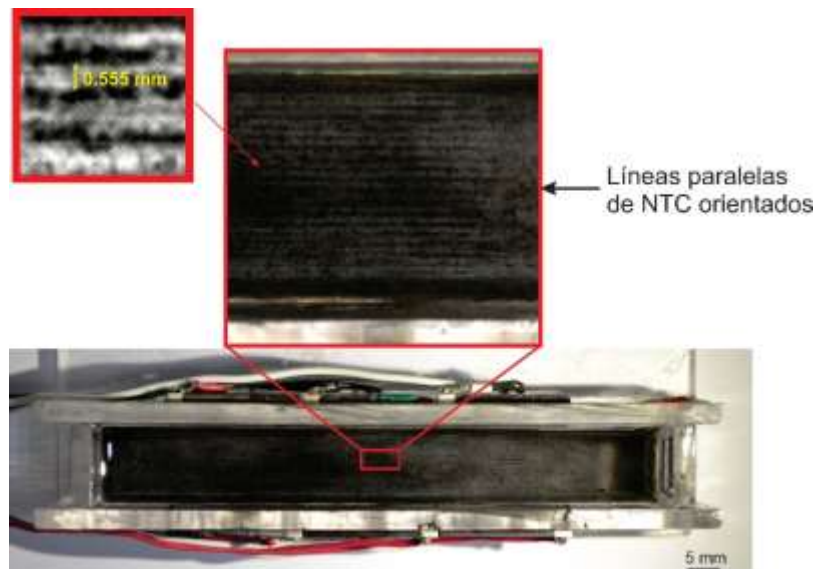


Figura 8. Fotografía tomada durante la manipulación acústica de NTC en la resina epóxica.

Ante la presencia del solvente en la resina y tiempos mayores de aplicación del campo ultrasónico se constató de manera exitosa la orientación de los NTC. El total de nodos formados fue de 22, con una distancia entre

nodos de presión acústica de 0.555 mm. Esto confirma la viabilidad del método para su uso en resinas poliméricas típicas en la preparación de materiales compuestos reforzados con fibras ingenieriles.

3. Conclusiones

La orientación de nanotubos de carbono (NTC) de pared múltiple en medios líquidos viscosos fue llevada a cabo mediante una técnica novedosa de manipulación acústica basada en la generación de ondas estacionarias de ultrasonido en alta frecuencia. Para ello, se diseñó un molde de acrílico con cavidad rectangular y seis placas cerámicas PZT adheridas en sus paredes fueron operadas a una frecuencia de 1.475 MHz y voltaje pico-pico de 8 V_{p-p}. Los resultados muestran que las ondas acústicas de ultrasonido son capaces de orientar NTC en medios líquidos viscosos tanto en alcohol isopropílico como en una resina epóxica mezclada con una ligera cantidad de alcohol. La distancia entre nodos acústicos formada entre las líneas paralelas de NTC en el solvente fue de 0.395 mm mientras que en la resina polimérica fue de 0.555 mm. La longitud de las líneas paralelas de NTC formadas debido a la fuerza de radiación acústica fue de 60 mm, lo cual representa un paso importante en la fabricación de probetas estándar para ensayos mecánicos. Lo anterior confirma la capacidad del método de manipulación acústica de NTC en medios líquidos viscosos en miras a la fabricación de nanocompuestos poliméricos con partículas de refuerzo en una dirección preferencial.

4. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico del Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-O) bajo la dirección del Dr. Rodolfo Silva Casarín (UNAM). Asimismo, agradecemos la ayuda técnica del M.C. Antonio Banderas en el análisis de microscopía electrónica de barrido y M.C. Eduardo José en el diseño asistido por computadora del molde.

5. Referencias bibliográficas

- [1] Gupta N., Gupta S.M., Sharma S.K. Carbon nanotubes: synthesis, properties and engineering applications. *Carbon Letters* 2019; 29: 419-447.
- [2] Ma P.-C. y Kim J.-K. *Carbon nanotubes for polymer reinforcement*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011.
- [3] Soad Z., Sheheri A., Al-Amshany Z.M., et al. The preparation of carbon nanofillers and their role on the performance of variable polymer nanocomposites. *Designed Monomers Polymers* 2019; 22(1): 8-53.
- [4] Rodríguez-González J.A., Rubio-González C., Soto-Cajiga J.A. Piezoresistive response of spray-coated multiwalled carbon nanotubes/glass fiber/epoxy composites under flexural loading. *Fibers and Polymers* 2019; 20: 1673-1683.
- [5] Rodríguez-González J.A., Rubio-González C., Ku-Herrera J.J. Influence of seawater ageing on the mechanical and damage self-sensing capability of glass fiber-MWCNT/epoxy laminates subjected to flexural loading by means of the electrical resistance approach. *Smart Materials and Structures* 2018; 27(12): 125002.
- [6] Goh P.S., Ismail A.F., Ng B.C. Directional alignment of carbon nanotubes in polymer matrices: Contemporary approaches and future advances. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2014; 56: 103-126.
- [7] Ma C., Zhang W., Zhu Y, et al. Alignment and dispersion of functionalized carbon nanotube in polymer composites induced by an electric field. *Carbon* 2008; 46: 706-720.
- [8] Martin C.A., Sandler J.K.W., Windle A.H., et al. Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites. *Polymer* 2005; 46: 877-886.
- [9] Camponeschi E., Vance R., Al-Haik M., et al. Properties of carbon nanotube –

- polymer composites aligned in a magnetic field. *Carbon* 2007; 45(10): 2037-2046.
- [10] Moaseri E, Fotouhi M, Bazubandi B, et al. Two-dimensional reinforcement of epoxy composites: alignment of multi-walled carbon nanotubes in two directions. *Advanced Composite Materials* 2020; 29(6): 547–557.
- [11] Strobl C.J., Schäflein C., Beierlein U., Ebbecke J., Wixforth A. Carbon nanotube alignment by surface acoustic waves. *Applied physics letters* 2004; 85 (8): 1427-1429.
- [12] Lim W.P., Yao K., Chen Y. Alignment of Carbon Nanotubes by Acoustic Manipulation in a Fluidic Medium. *J. Phys. Chem. C* 2007; 111: 16802-16807.
- [13] Haslam M.D., Raeymaekers B. Aligning carbon nanotubes using bulk acoustic waves to reinforce polymer composites. *Composites Part B: Engineering* 2014; 60: 91-97.
- [14] Greenhall J., Homel L., Raeymaekers B. Ultrasound directed self-assembly processing of nanocomposite materials with ultra-high carbon nanotube weight fraction. *Journal of Composite Materials* 2019; 53(10): 1329-1336.
- [15] Niendorf K., Raeymaekers B. Combining ultrasound directed self-assembly and stereolithography to fabricate engineered polymer matrix composite materials with anisotropic electrical conductivity. *Composites Part B: Engineering* 2021; 223: 109096.
- [16] Niendorf K., Raeymaekers B. Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composite Materials with Aligned or Organized Filler Material: A Review. *Advanced Engineering Materials* 2020, 23(4): 2001002.
- [17] Rodríguez-González J.A., Rubio-González C., Perez-Sánchez A. Deposition of carbon nanotubes onto glass fibers using ultrasound standing waves. *Frontiers of Materials Science* 2021; 15(3): 471-475.
- [18] Analog Devices, DATA sheet ADA4870, High Speed, High Voltage, 1 A Output Drive Amplifier.
- [19] Analog Devices, ADA4870ARR-EBZ User Guide UG-685. Evaluating the ADA4870 High Speed, High Output Current Amplifier.