

Revista Latinoamericana de Difusión Científica
Volumen 7 – Número 13
Depósito Legal ZU2019000058 - ISSN 2711-0494

Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 7 - Número 13
Julio – Diciembre 2025
Maracaibo – Venezuela

Desarrollo de compuestos de PP/MWCNT mediante la aplicación de ultrasonido de frecuencia fija

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15832367>

J. G. Martínez-Colunga*
Víctor J. Cruz-Delgado**
Saul Sánchez-Valdés***
José M. Mata-Padilla****
Roberto Benavides-Cantú *****

RESUMEN

Se estudió el efecto de un mezclador estático ultrasónico de frecuencia fija de 20kHz en la obtención de compuestos de polipropileno y nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT). El ultrasonido fue aplicado en estado fundido del compuesto mediante un mezclador estático ultrasónico, colocado a la salida de un extrusor monotornillo. Los compuestos de PP/MWCNTs obtenidos se caracterizaron por DSC, TGA, SEM, RAMAN y se determinaron sus propiedades de conductividad térmica y eléctrica, así como sus propiedades de tensión. Se observó un aumento en la cristalinidad del PP en los compuestos producto del efecto nucleante de los nanotubos de carbono. Los compuestos de PP/MWCNTs con tratamiento ultrasónico presentaron una mejor dispersión de los MWCNTs, lo cual contribuyó al incremento del módulo de elasticidad, una mejor estabilidad térmica y a un incremento en la conductividad térmica y un aumento significativo en la conductividad eléctrica.

PALABRAS CLAVE: Ultrasonido, Polipropileno, Conductividad térmica, Química.

*Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Ing. Enrique Reyna H. 140, Col. San José de los Cerritos, Saltillo, Coahuila, México, C.P. 25294. E-mail: guillermo.martinez@ciqa.edu.mx

** Centro de Investigación en Química Aplicada, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0891-7764>.

*** Centro de Investigación en Química Aplicada, México. E-mail: saul@ciqa.mx

**** Centro de Investigación en Química Aplicada, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0216-6667>

***** Centro de Investigación en Química Aplicada, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9748-6566>

Recibido: 12/02/2025

Aceptado: 08/04/2025

Development of PP/MWCNT Composites by Applying Fixed-Frequency Ultrasound

ABSTRACT

The effect of a 20 kHz fixed-frequency ultrasonic static mixer on the production of polypropylene and multi-walled carbon nanotube (MWCNT) composites was studied. Ultrasound was applied to the composite melt using an ultrasonic static mixer located at the outlet of a single-screw extruder. The resulting PP/MWCNT composites were characterized by DSC, TGA, SEM, and RAMAN, and their thermal and electrical conductivity, as well as their tensile properties, were determined. An increase in PP crystallinity was observed in the composites due to the nucleating effect of the carbon nanotubes. The ultrasonic-treated PP/MWCNT composites showed improved dispersion of the MWCNTs, which contributed to an increase in the elastic modulus, improved thermal stability, and an increase in thermal conductivity and a significant increase in electrical conductivity.

KEYWORDS: Ultrasound, Polypropylene, Thermal conductivity, Chemistry.

Introducción

El requerimiento de nuevos materiales con mayor resistencia mecánica en aplicaciones automotrices, aeroespaciales y comunicaciones para protección electromagnética (Uwa 2022, Lecocq 2020), ha ocasionado un gran interés tanto académico como tecnológico en los materiales compuestos con nanopartículas, donde los nanotubos de carbono (CNT) ocupan un lugar protagónico por sus excelentes propiedades mecánicas y de conductividad eléctrica y térmica (Mata-Padilla 2015, Zhong 2016) Para lograr estas propiedades, sin reducir la gran procesabilidad del PP y reduciendo los costos, se desea un umbral de percolación de los nanotubos bajo en los compuestos de PP y CNT. Esto requiere que exista una interconectividad (red conductora) entre los nanotubos (Zhong 2016, Zhong 2014). Los factores que determinan el umbral de percolación incluyen la conductividad, la orientación y la dispersión de las nanopartículas, así como las condiciones de procesamiento (Zhong 2016, Zhong 2014). El principal reto que tiene el desarrollo de compuestos de polipropileno (PP) y nanotubos de carbono (CNT) es poder alcanzar una buena dispersión de estas nanopartículas en el polímero fundido durante el mezclado, la falta de interacciones químicas entre estos componentes y la alta viscosidad del fundido limitan fuertemente la distribución y dispersión de los nanotubos en esta matriz polimérica.

Para lograr una buena dispersión de CNT en PP por lo general se ha recurrido a la utilización de extrusores de doble tornillo de alto esfuerzo de corte para romper los aglomerados y por otro lado, a la aplicación de ultrasonido a la salida de este tipo de extrusores (Mata-Padilla 2015, Zhong 2016, Zhong 2014). La utilización de extrusores de doble tornillo para la obtención de compuestos poliméricos con CNT por lo general ocasiona una disminución de la relación de aspecto (L:D) de los nanotubos, debido al alto esfuerzo de corte y mezclado que se genera durante el procesamiento por los elementos de amasado y mezclado de los tornillos, disminuyendo principalmente la longitud de los nanotubos (Yan 2017, Chena 2007, Gaurav 2010). Una alternativa para la obtención de materiales compuestos con CNT puede ser los extrusores de monotornillo que pueden proporcionar menores esfuerzos de corte, menor mezclado y proporcionar un menor daño a los CNT (Pandey 2021, Pandey 2021). La baja capacidad de destrucción de los aglomerados de nanopartículas de los extrusores monotornillo puede ser incrementada con la aplicación de irradiación ultrasónica (US-I) a la salida del extrusor, mediante un mezclador estático ultrasónico y obtener materiales compuestos con CNT con una relación de aspecto más parecida a la de los nanotubos prístinos antes del procesamiento. La conservación de la estructura de los CNT puede mejorar y las propiedades del material compuesto. En base a lo anterior en este trabajo de investigación se plantea el estudio del efecto del ultrasonido en la obtención de materiales compuestos de PP y nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) mediante la utilización de un extrusor monotornillo y un mezclador estático ultrasónico a la salida del extrusor.

1. Parte experimental

1.1. Materiales

Polipropileno (PP) de MFI 0.35 g/10 min de la empresa INDELPRO (figure 1), Nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNTs) de la empresa Alpha Nano Tech Co, industrial grado con 90% de pureza, diámetro externo de 30-50 nm, área superficial de 200 m²/g (figura 1). Mezclador estático ultrasónico (patente mexicana 411529) conectado a un equipo de ultrasonido (figure 2) con capacidad de frecuencia fija de 20 kHz con una potencia de salida de 770 watts. Extrusor monotornillo Davis Estándar de un L/D=27 y un diámetro de tornillo de 1 in. con relación de compresión de 3:1 y zona de mezclado "Z".

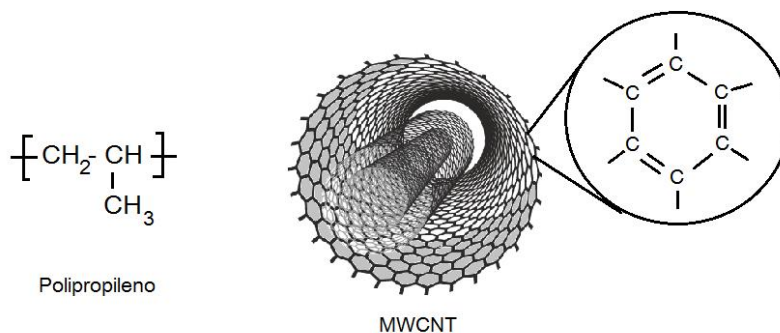


Figura 1. Estructura química del polipropileno y nanotubos de carbono de pared múltiple.

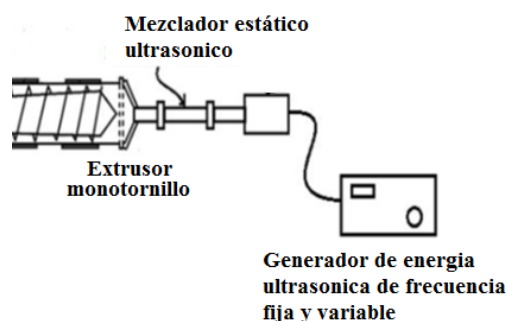


Figura 2. Extrusor monotornillo y mezclador estático ultrasonico

1.2. Preparación de los Materiales Compuestos

Se prepararon 300gr por de cada material compuesto de PP/MWCNTs con diferentes contenidos de nanotubos (1,3 y 5 %). Se utilizó un extrusor monotornillo con una temperatura máxima de 190°C y en la salida del extrusor con un gasto de 300g/15 min. y ensamble del mezclador estático ultrasónico como se muestra en la figura 1. El ultrasonido fue aplicado mediante un mezclador estático ultrasónico a una frecuencia fija de 20 kHz y 231 watts de potencia de salida. Los compuestos obtenidos en el estudio se muestran en la Tabla 1. El PP y los MWCNT fueron alimentados simultáneamente en la tolva de alimentación del extrusor. El material obtenido fue en forma de filamento, el cual fue enfriado y cortado para la obtención de pellets. Posteriormente por moldeo por compresión (190°C y 130 Kg/cm² de presión) se obtuvieron placas, de donde se maquinaron las probetas para la caracterización del compuesto.

Tabla 1. Diseño de experimento

Muestra	MWCNT (wt%)	US-I (%)	Vel. de tornillo (rpm)
0	0	0	0
1	0	0	20
2	1	0	20
3	3	0	20
4	5	0	20
5	0	30	20
6	1	30	20
7	3	30	20
8	5	30	20

1.3. Disolución de los compuestos

La extracción de los MWCNT en los compuestos sin y con radiación ultrasónica se realizó mediante una disolución del PP en xileno caliente en un sistema de extracción Soxhlet a una temperatura de 120°C durante 8 horas.

2. Caracterización

La estructura de los MWCNT de los compuestos sin y con irradiación ultrasónica fue analizada por medio de un espectrofotómetro RAMAN Nicolet modelo . Los compuestos de PP/MWCNT sin y con tratamiento ultrasónico en el mezclador interno se caracterizaron por espectroscopia FTIR en un espectrofotómetro de marca Nicolet modelo. Los compuestos también fueron caracterizados por calorimetría diferencia de barrido (DSC) en un calorímetro TA instrument modelo Q200 a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10°C/min, donde la entalpía de fusión (ΔH) se determinó mediante el área bajo la curva de fusión y el grado de cristalinidad ($1-\lambda$) de los compuestos, se determinó en base a la ecuación siguiente (Marco 2011):

$$(1-\lambda) = 100[\Delta H]/(w\Delta H_m) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde λ = fracción amorfa del iPP, $\Delta H_m = 207.1 \text{ kJ kg}^{-1}$, entalpía de fusión al 100% de cristalinidad del iPP, w = fracción del peso de MWCNT.

Las propiedades de tensión se obtuvieron utilizando una máquina de universal de ensayos mecánico MTS Criterion modelo 4301 usando una celda de carga de 500 N y una

velocidad de prueba de 50,8 cm/min a temperatura ambiente. Las probetas de tensión fueron obtenidas a partir de placas moldeadas por compresión. Las probetas fueron de acuerdo a la ASTM D638 y fueron las tipo VI. Para determinar la morfología de los compuestos PP/MWCNT, con y sin tratamiento de irradiación de US-I, se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM) Jeol modelo JFM7401-F. Para preparación de la muestra para SEM implicó la fractura criogénica de las muestras y el recubrimiento con Au-Pd. La estabilidad térmica de los compuestos de PP/MWCNT se determinó mediante la técnica de análisis termogravimétrico (TGA) en un equipo termobalanza de TA Instrument modelo Q500. La determinación de la conductividad eléctrica se determinó mediante la medición de la resistividad volumétrica utilizando un medidor un electrómetro de alta resistencia Keithley 6517 B y una celda de prueba de dispositivo de prueba de resistividad Keithley modelo 8009 a temperatura ambiente. Para cada material se evaluaron cuatro probetas con un espesor de 1 mm y 6 x 6 cm de cada lado, obtenidas mediante moldeo por compresión. Utilizando un analizador de difusividad térmica Discovery Xenón Laser Flash (DXF-200) de TA Instruments se determinó la difusividad térmica de los nanocompuestos PP/MWCNT y posteriormente se determinó la conductividad térmica. Para la determinación de la difusividad térmica se utilizaron probetas de geometría circular y unas dimensiones de 2 mm de espesor y 12,5 mm de diámetro, las cuales fueron recubiertas con pintura de alta conductividad térmica de carbono y plata en ambas caras para asegurar un buen contacto con los sensores de temperatura. Las mediciones se realizaron por triplicado a 25°C.

3. Resultados y obtenidos

Los resultados de la caracterización de los Compuestos de PP con MWCNT procesados sin y con US-I se muestran a continuación:

3.1. Espectroscopia Raman

Los espectros Raman de los MWCNT extraídos de los compuestos de PP con 5 % en peso de MWCNT sin y con US-I, y MWCNT pristino se muestran en la figura 1. Se puede observar como la relación de los picos D/G es del orden de 0.755, 0.759 y 0.758 respectivamente no cambia significativamente, lo cual indica que los nanotubos en el PP procesados en el extrusor monotornillo sin y con US-I no sufren cambios notorios en su

estructura con respecto a los MWCNT prístino. Con estos resultados el procesamiento de los compuestos en un extrusor monotornillo sin y con US-I, los MWCNT muestra que no sufren grandes cambios en la morfología estructural de los nanotubos.

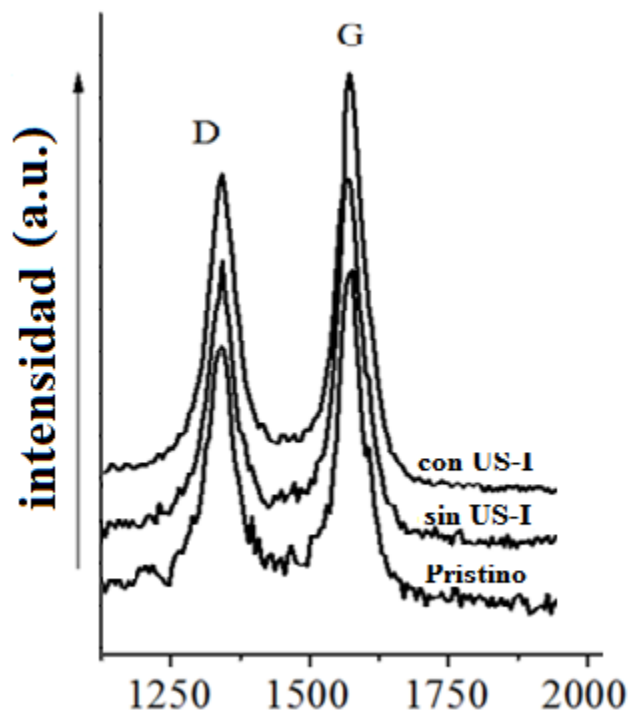


Figura 1. Espectros de Raman de MWCNT prístinos y MWCNT extraídos de compuestos de polipropileno sin y con US-I con 5 % en peso de nanotubos.

3.2. Espectroscopia infrarroja

Al PP sin y con US-I sin MWCNT se les determino espectroscopia infrarroja (FTIR) y los espectros FTIR del PP se muestran en la figura 2, donde se puede observar las bandas característica del PP de los CH₂ en la banda de 1455 cm⁻¹ y del CH₃ cm⁻¹ la banda de 1376 cm⁻¹. También puede observarse como por el procesamiento en un extrusor monotornillo del PP sin US-I tiene la presencia de grupos C=O, la cual se incrementa con la aplicación de US-I, esto indica que el simple procesamiento oxida al PP y que la acción de la US-I incrementa aún más la oxidación del PP.

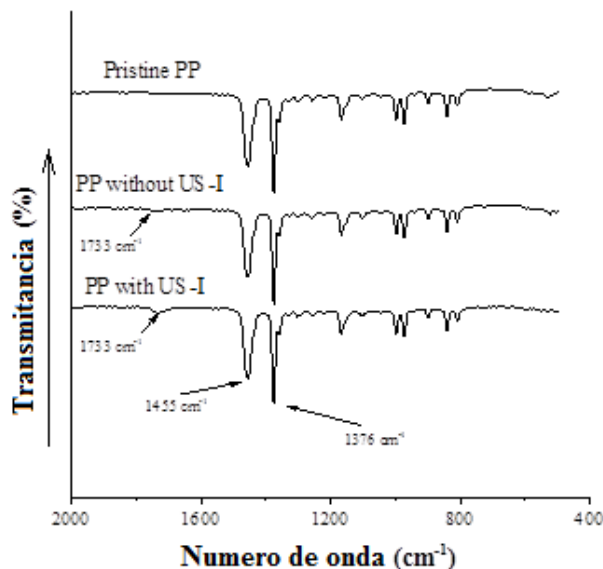


Figura 2. Espectros FTIR de polipropilenos pristino y procesado sin y con US-I

3.3. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

La figura 3 muestra las micrografías SEM de los MWCNT extraídos de los compuestos de PP/MWCNT procesados sin y con US-I con 5 % en peso de MWCNT. Las micrografías SEM de los MWCNT extraídos de los compuestos en comparación con los MWCNT pristinos muestran como la estructura morfológica de MWCNT procesados sin y con US no presentaron cambios significativos, la energía de US-I, la temperatura y el esfuerzo de corte aplicado por el proceso de extrusión en monotornillo no tienen efecto significativo sobre la estructura de MWCNT.

3.4. Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC)

Las temperaturas de cristalización y fusión y grado de cristalización de los PP en comparación con los compuestos de PP/MWCNT con y sin ultrasonido con diferente contenido de MWCNT se muestran en la figura 4. La temperatura de fusión no presento cambios significativos lo que indica que es mínima la diferencia en la perfección de los cristales, así como en la morfología lamelar (Grady 2002). Por el contrario, la temperatura de cristalización (T_c) de los compuestos se incrementa más de 10°C , en función del contenido de MWCNT en comparación con el PP sin MWCNT. Este comportamiento puede ser atribuido a que los nanotubos estén actuado como agentes de nucleación sobre el PP

(Uwa 2022, Zhong 2016, Stanciu 2021, Tabuani 2007, Yin 2018, Grady 2002, Li 2019) y está de acuerdo con los resultados reportados por Carlos Marco y colaboradores. (Marcos 2011) que lo atribuyen a un efecto de inducción cristalina por parte de los MWCNT que favorece la etapa de nucleación de iPP, y que en consecuencia, aumenta la velocidad de cristalización, manifestándose en una T_c y cristalinidad más alta. Por otro lado, se puede observar un mayor incremento de T_c en los compuestos procesados con US-I que en los compuestos sin US-I. Este comportamiento puede ser atribuido a una mayor dispersión de los nanotubos en el polímero promovida por el US-I (Zhong 2016, Yin 2018) . En los compuestos procesados con ultrasonido se puede observar como la cristalinidad disminuye en función del contenido de MWCNT, esto puede ser debido a que los nanotubos restringen el movimiento de las cadenas obstruyendo la cristalización del polímero debido a una mayor dispersión en el PP.

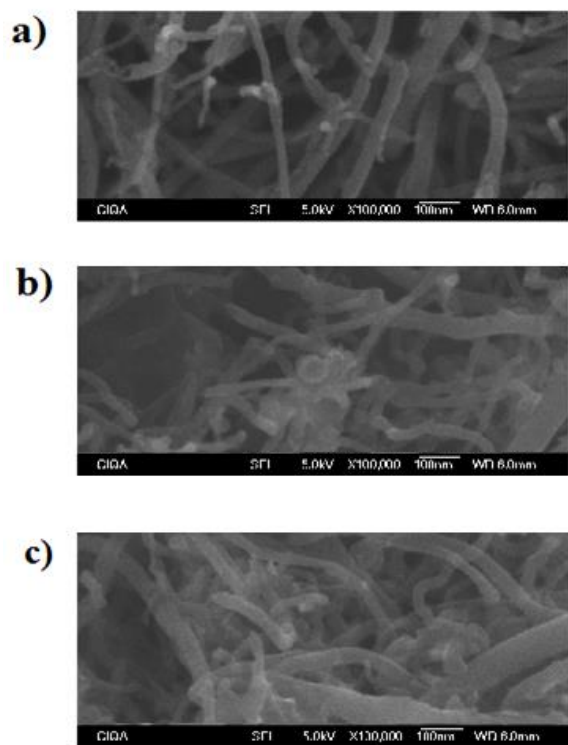


Figura 3. Micrografías SEM de: a) MWCNT prístino; b) MWCNT extraídos de un compuesto PP/MWCNT procesado sin US-I; c) MWCNT extraídos de un compuesto PP/MWCNT con 5 % en peso de MWCNT procesado con US-I.

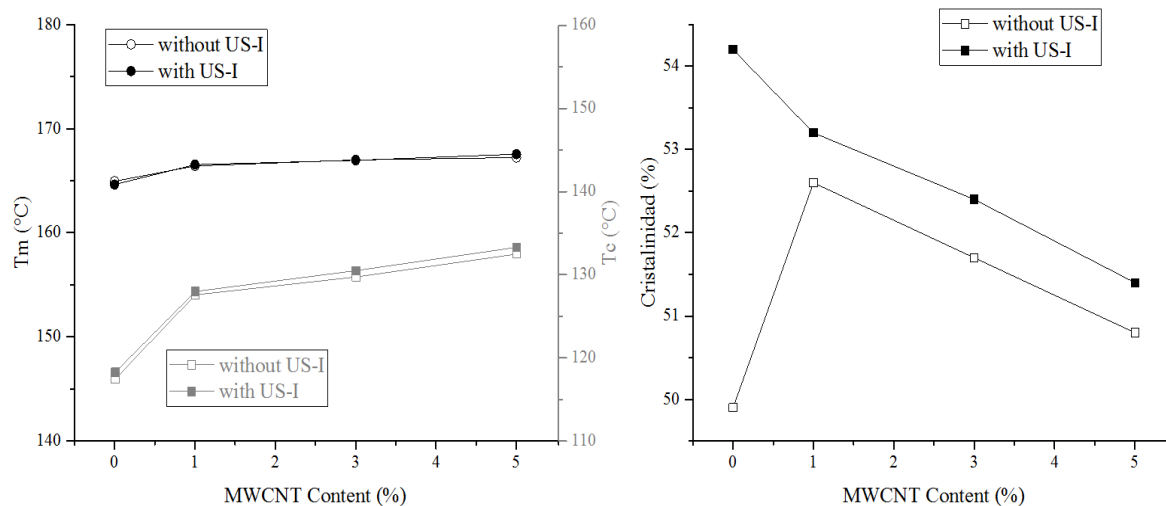


Figura 4. Temperatura de fusión, temperatura de cristalización y cristalinidad en función del contenido de MWCNT.

3.5. Propiedades de tensión

En las figuras 5-7 se muestran las propiedades de tensión de los materiales compuestos PP/MWCNT procesados en un extrusor monotornillo sin y con ultrasonido (US-I).

El comportamiento del módulo de elasticidad de los compuestos con diferentes contenidos de MWCNT procesados con y sin US-I se muestra en la figura 5, se puede observar que la presencia de los MWCNT incrementa el módulo de elasticidad, 27% para los compuestos sin US-I y 30% para los compuestos con US-I. Este incremento del módulo de elasticidad está de acuerdo a lo reportado por nuestro equipo de trabajo (Martinez 2021, Avila 2018) y la literatura (Zhong 2016, Zhong 2014), lo cual se le adjudica a una mejor dispersión de los nanotubos en el PP por la acción de US-I. También el módulo de elasticidad puede incrementarse por el aumento de la cristalinidad de los compuestos procesados con US-I (Yin 2018). El tiempo de residencia en el mezclador estático ultrasónico es un factor que debe tomarse en cuenta en la dispersión de los nanotubos en el polímero.

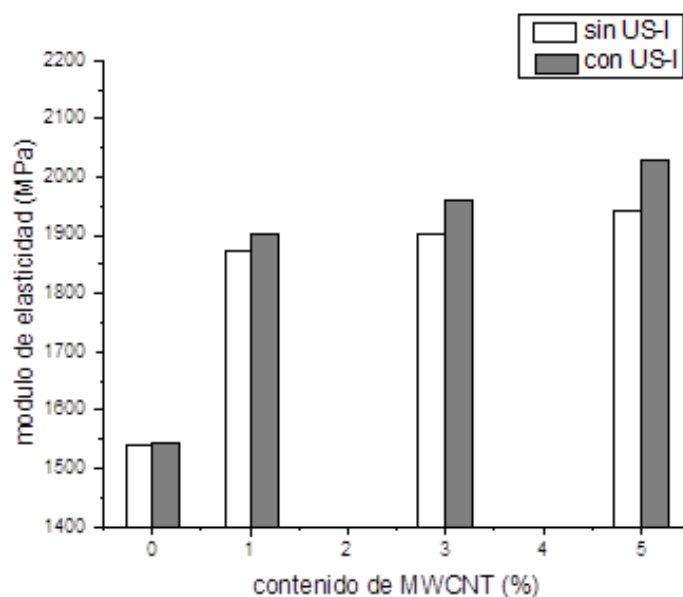


Figura 5. Módulo de elasticidad de compuestos PP/MWCNT con diferente contenido de nanotubos de carbono.

La resistencia de tensión de los compuestos con diferentes contenidos de MWCNT procesados sin y con US-I se muestra en la Figura 6. Se puede ver como la resistencia a la tensión se incrementa con la presencia de los MWCNT. Los compuestos obtenidos con y sin US-I mostraron un incremento de la resistencia de tensión del 10 % y 5.1 % respectivamente, comparada con el PP sin MWCNT. Esto puede ser debido al incremento de cristalinidad que presentaron los compuestos procesados con US-I (Zhang 2014), así como la adhesión interfacial mejorada entre los nanotubos y el PP por la mayor dispersión de los nanotubos (Li 2019). Pero también puede ser debido a la oxidación del PP, ya que Hemmati et.al. reportan una mejor compatibilidad del PP con los nanotubos cuando el polímero contiene la estructuras oxidadas como las que tiene el anhídrido maléico (Hemmati 2012). Por otro lado, la irradiación ultrasónica sí aumenta el área de contacto al aumentar la dispersión de los nanotubos en el PP se incrementa la tensión, como se puede observar en los compuestos con US-I.

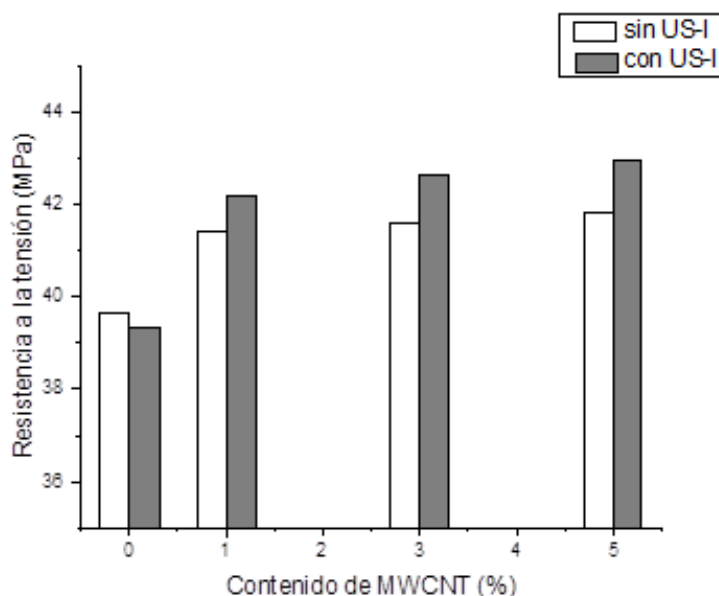


Figura 6. Resistencia a la tensión de compuestos PP/MWCNT con diferente contenido de nanotubos de carbono.

La capacidad de deformación del PP se afectó significativamente por la presencia de los MWCNT la cual se muestra figura 7. Se puede observar como la presencia de los nanotubos en los compuestos PP/MWCNT produce una disminución significativa de la elongación a la ruptura. Los compuestos procesados con US-I presenta una pequeña menor elongación a la ruptura que los compuestos procesados sin US. Esto puede ser debido a la mayor cristalinidad y dispersión de nanotubos presente en los compuestos por causa del US-I, ocasionando una menor capacidad de movilidad, menor capacidad de desenrollado y deslizamiento de las cadenas.]. Por otro lado, la diferencia entre los compuestos procesados sin y con US disminuye en función del incremento del contenido de nanotubos, donde los compuestos con 5% de MWCNT no presentaron diferencia en la elongación a la ruptura con el US-I. Esto puede ser debido a la presencia de un mayor número de aglomerados por el incremento del contenido de MWCNT, que actúan como concentradores de tensión produciendo una fractura prematura y ocasionando un menor alargamiento del PP (Zhang 2016).

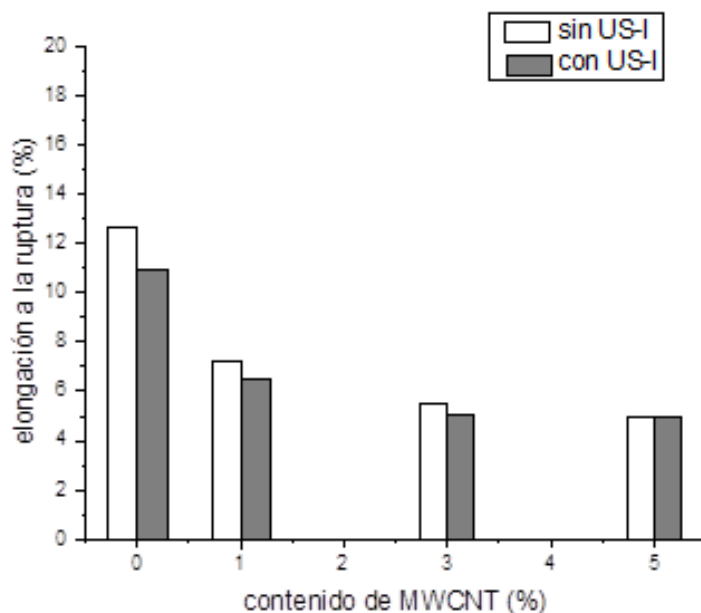


Figura 7. Elongación a la rotura de compuestos PP/MWCNT con diferente contenido de nanotubos de carbón.

3.6. Termogravimetría (TGA)

Las figuras 8 y 9 muestran las curvas de derivadas de la pérdida de peso de los compuestos de PP y MWCNT. Se puede observar una mejora significativa en la estabilidad térmica en función del contenido de MWCNT de los materiales compuestos procesados sin US-I en la figura 10. El PP sin MWCNT presentó una temperatura de inicio de pérdida de masa alrededor de 285°C y la temperatura de inicio de pérdida de peso de todos los compuestos con nanotubos fue muy similar alrededor de 310°C, teniendo un incremento de 25°C en comparación del PP sin MWCNT. Por otro lado, el PP sin MWCNT procesado con US-I presentó una temperatura de inicio de pérdida de peso de 270°C, la cual es menor a la que presentó el PP sin MWCNT procesado sin US-I como puede verse en la figura 8. Los compuestos procesados con US-I también mostraron un incremento en la estabilidad térmica en comparación con el PP sin y con MWCNT, pero un diferente comportamiento que los compuestos sin US-I como se puede ver en las curvas de derivadas de pérdida de peso mostradas en la figura 9. La temperatura de inicio de pérdida de peso de los materiales procesados sin US-I fueron más altas en comparación con los materiales procesados con US-I, a excepción del compuesto con 1% de nanotubo con US-I que alcanzó una

temperatura de inicio de pérdida de peso similar a los compuestos sin US-I. La temperatura del pico de mayor velocidad de pérdida de peso se incrementó s en función del contenido de nanotubos para los compuestos procesados con US-I en comparación con el PP sin MWCNT debido al US-I. Esto muestra que el US-I proporciona un efecto de mayor estabilidad térmica al PP con la presencia de MWCNT. En figura 10 se muestran las temperaturas de máxima velocidad de pérdida de peso de los materiales compuestos de PP y MWCNT procesados sin y con US-I. Se puede observar como los materiales procesados con US-I presenta temperatura más bajas que los materiales procesados sin US-I. Este comportamiento es debido a una posible degradación que sufre el PP con la aplicación de US-I (Guo 2007, Garcia 2016)).

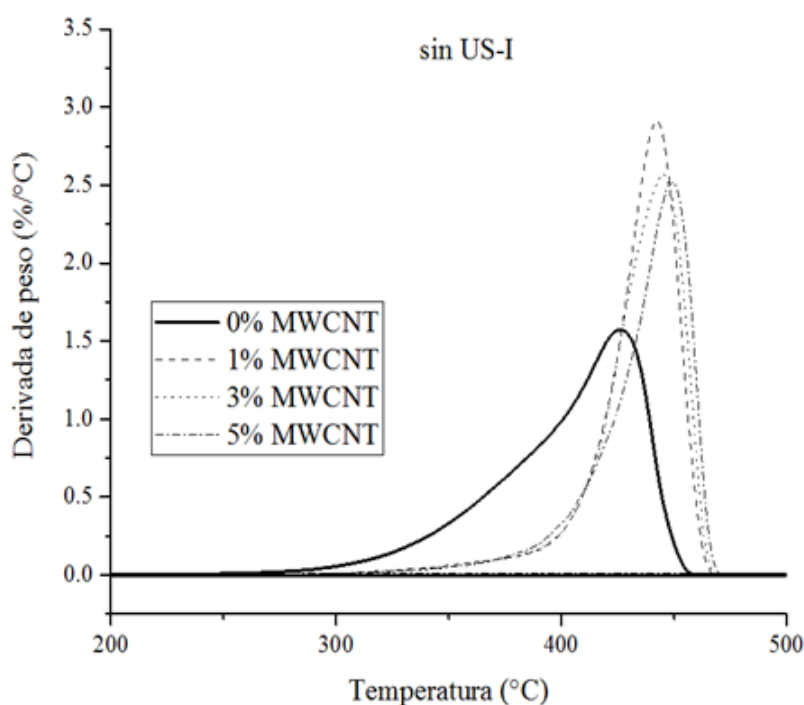


Figura 8. Derivada de la pérdida de peso (DTA) de compuestos PP/MWCNT con diferente contenido de MWCNT procesados sin US.

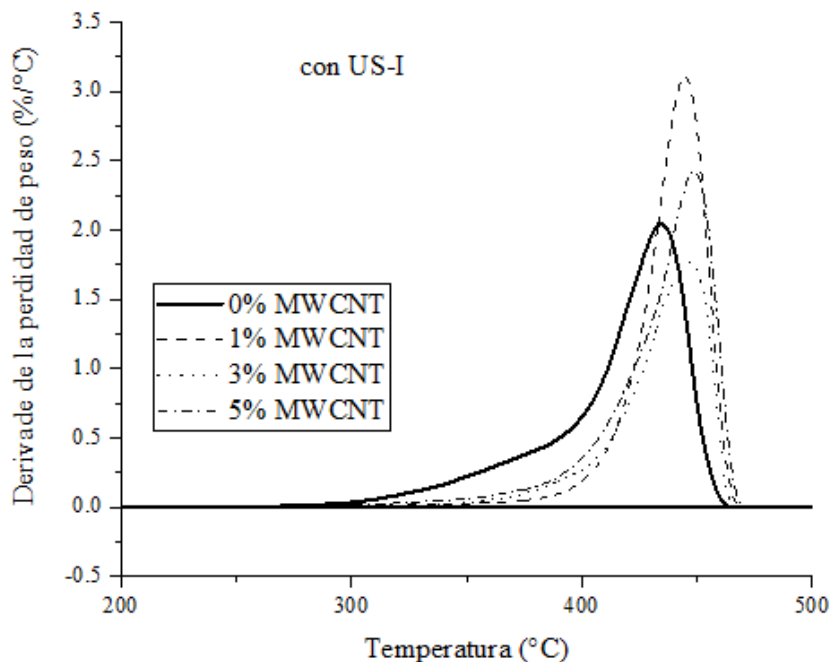


Figura 9. Derivada de la pérdida de peso (DTA) de compuestos PP/MWCNT con diferente contenido de MWCNT procesados sin US-I.

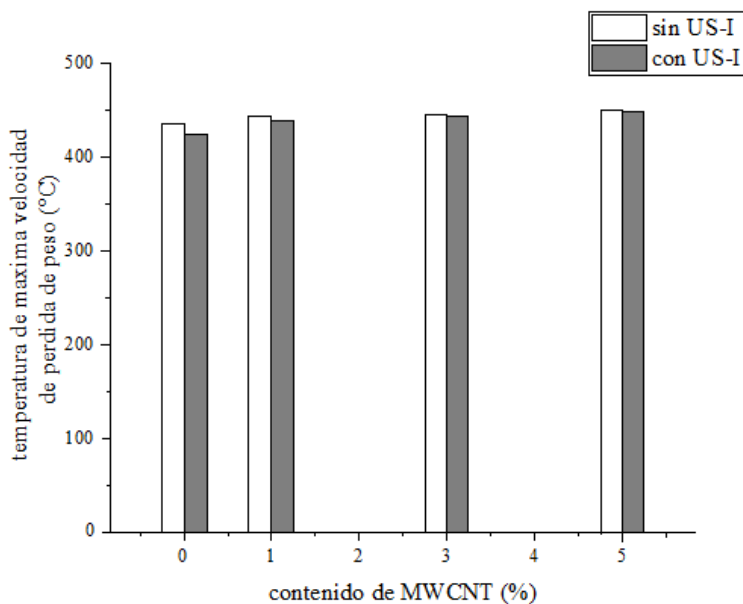


Figura 10. Temperatura máxima de pérdida de peso de compuestos PP/MWCNT con diferente contenido de MWCNT procesados sin y con US-I.

3.7. Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Las imágenes SEM de morfología de los compuestos de PP/MWCNT procesados sin y con US-I se muestran en la figura 11. Se puede observar en la figura 12(a) la dispersión de MWCNT en PP donde hay zonas sin MWCNT y zonas donde hay gran cantidad de MWCNT evidenciado una dispersión heterogénea de nanotubos en los compuestos procesados sin US-I. Por otro lado los MWCNT en los compuestos con US-I se encuentran más homogéneamente dispersos en el PP como se muestra en la figura 12(b), esto evidencia la existencia de una mejor dispersión en los compuestos procesados con US-I. Esto muestra el efecto positivo del US-I aplicado en el mezclador estático.

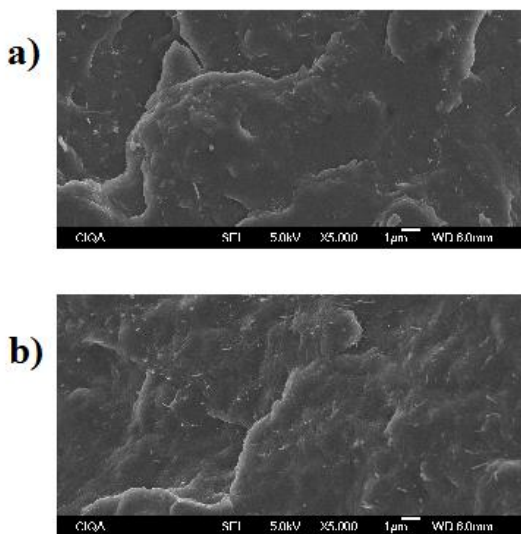


Figure 11. Micrografía SEM de compuestos PP/MWCNT: a) procesados sin US-I; b) procesados con US-I.

3.8. Conductividad térmica

Los MWCNT tienen la característica de proporcionar conductividad térmica a los compuestos poliméricos. El comportamiento de la conductividad térmica de los compuestos de PP/MWCNT a diferentes contenidos de nanotubos se muestra en la figura 12. La simple presencia de nanotubos aumenta la conductividad térmica y como está conductividad es función del contenido de MWCNT en el PP. En los compuestos procesados sin US-I se observa un menor incremento de la conductividad térmica que los compuestos procesados con US-I. El incremento observado en la conductividad térmica de los compuestos con el 5% de MWCNT y con US-I fue del 25% y el incrementó observado en los compuestos sin US-I fue de un 20%.

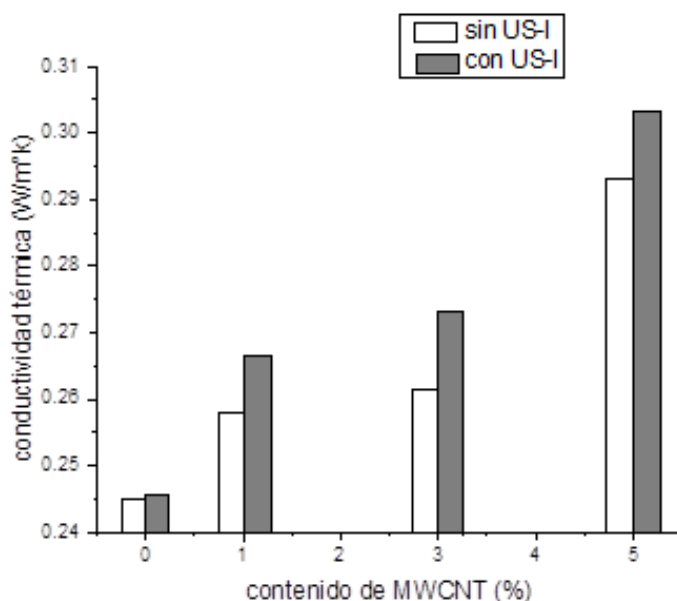


Figura 12. Conductividad térmica de compuestos PP/MWCNT con diferente contenido de MWCNT procesados sin y con US-I.

3.9. Conductividad eléctrica

Una de las propiedades más importantes que los MWCNT le proporcionan a los compuestos poliméricos es la conductividad eléctrica. La figura 13 muestra la conductividad eléctrica que proporcionan de los compuestos de PP y MWCNT, donde la conductividad eléctrica es función del contenido de nanotubos en el PP. Los compuestos procesados con US-I presentaron un incremento de varias magnitudes en la conductividad eléctrica. El 3 % de contenido de MWCNT en el PP procesado sin US-I produjo un aumento 5 órdenes de magnitud de la conductividad eléctrica y con US-I produjo un aumento de 7 órdenes de magnitud de la conductividad eléctrica, lo cual evidencia que la aplicación de US-I es una buena opción para incrementar la conductividad eléctrica de los compuestos con nanotubos de carbono. Esta conductividad inherente de los MWCNT puede ser aprovechada en su máxima expresión en los compuestos de PP y MWCNT gracias a la mayor dispersión de los nanotubos en el PP al incrementar la interconectividad de los nanotubos por la acción de la US-I en el mezclador estático.

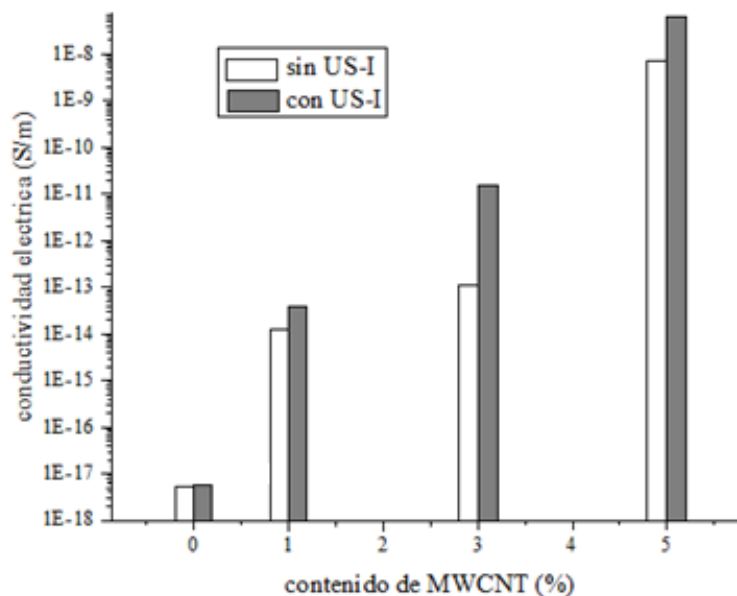


Figura 13. Conductividad eléctrica de compuestos PP/MWCNT con diferente contenido de MWCNT procesados sin y con US-I.

Conclusiones

La utilización de un mezclador estático ultrasónico post extrusión en mono tronillo mostro ser una buena alternativa para proteger la estructura de los nanotubos en la obtención de materiales nanocompuestos de PP/MWCNT. Las propiedades obtenidas de los compuestos de PP/MWCNT procesados con US-I, fueron mejoradas con respecto a los compuestos procesados sin US-I. Esta mejora en propiedades fue debida a la mejor dispersión de los MWCNT en el PP y a la conservación estructural de los MWCNT. Por lo tanto, la protección de la estructura y la dispersión de los MWCNT en el polímero son los factores principales para que las propiedades de los nanotubos sean transferidas lo más posible a los compuestos.

Referencias

Ávila-Orta C. A., González-Morones P., Agüero-Valdez D., González-Sánchez A., Martínez-Colunga J.G., Mata-Padilla J.M., Cruz-Delgado V.J. (2018). Ultrasound-Assisted Melt Extrusion of Polymer Nanocomposites, Intechopen, Chapter of book Nanocomposites 2018 Edited by Subbarayan Sivasankaran, [doi:10.5772/intechopen.80216](https://doi.org/10.5772/intechopen.80216)

Brian P. Grady, Francisco Pompeo, Robert L. Shambaugh, and Daniel E. Resasco (2002). *The Journal of Physical Chemistry B* 2002 106 (23), 5852-5858. DOI: 10.1021/jp014622y

Chena L, Pang X.J., Yu Z.L. (2007). Study on polycarbonate/multi-walled carbon nanotubes composite produced by melt processing, *Materials Science and Engineering A* 457 (2007) 287–291. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.107>

García-López, E. I., Aoun, N., & Marci, G. (2024). An Overview of the Sustainable Depolymerization/Degradation of Polypropylene Microplastics by Advanced Oxidation Technologies. *Molecules*, 29(12), 2816. <https://doi.org/10.3390/molecules29122816>

Gaurav R. Kasaliwal, Sven Pegel, Andreas Gödel, Petra Pötschke, Gert Heinrich (2010). Analysis of agglomerate dispersion mechanisms of multiwalled carbon nanotubes during melt mixing in polycarbonate, *Polymer* 51 (2010) 2708-2720. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.02.048>

Grady B.P., Pompeo F., Shambaugh R.L., Resasco D.E. (2002). Nucleation of Polypropylene Crystallization by Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. B* 2002, 106, 5852-5858

Guo W.Y., Peng B. (2007) Ultrasonic Degradation Studies and Its Effect on Thermal Properties of Polypropylene. *Polym Plast Techn Eng* 46(9): 879-884. <https://doi.org/10.1080/03602550701280224>

Hemmati M., Shariatpanahi H., Ghorbanzadeh Ahangari M., Fereidoon A., Narimani A. (2012). Effect of Polypropylene–Grafted–Maleic Anhydride Compatibilizer on the Physical Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Composites, *Polymers & Polymer Composites*, 2012, 20(6) pp 559-566. <https://doi.org/10.1177/096739111202000606>

Lecocq H., Garois N., Lhost O., Girard P. F., Cassagnau P, A.Serghei (2020). Polypropylene/carbon nanotubes composite materials with enhanced electromagnetic interference shielding performance: Properties and modeling, *Composites Part B: Engineering* Volume 189, 15 May 2020, 107866, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107866>

Li X, Jia W., Dong B., Yuan H., Su F., Wang Z., Wang Y., Liu C., Shen C., Shao C. (2019). Structure and Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes-Filled Isotactic Polypropylene Composites Treated by Pressurization at Different Rates, *Polymers* 2019, 11, 1294. [doi:10.3390/polym11081294](https://doi.org/10.3390/polym11081294)

Marco C., Naffakh M., Gomez M.A., Santoro G., Ellis G. (2011). The Crystallization of Polypropylene in Multiwall Carbon Nanotube-Based Composites *POLYMER COMPOSITES*—2011,324-333. <https://doi.org/10.1002/pc.21059>

Martinez Colunga J.G., Sanchez-Valdes S., Ramos de Valle L.F., Ramirez-Vargas E., Benavides Cantú R., Perez Camacho O., Avila-Orta C. A., Espinoza-Martínez A. B., Mata-Padilla J.M., Cruz Delgado V. J, Lozano T. (2021). Anhydride Grafting on Carbon Nanotubes Using Ultrasound and its Effect on Polypropylene Nanocomposite Properties, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, , 2021 60(10), pp 1066-1083 | Received 08 Sep 2020, Accepted 12 Jan 2021, Published online: 21 Feb 2021 <https://doi.org/10.1080/25740881.2021.1876881>

Mata-Padilla J.M., Avila-Orta C.A., Medellin-Rodriguez F.J., Hernandez- Hernandez E., Jimenez-Barrera R.M., Cruz-Delgado V.J., Valdez-Garza J. A., Solis-Rosales S.G., Torres-Martinez A., Lozano-Estrada M., Diaz-Barriga Castro E. (2015). Structural and Morphological Studies on the Deformation Behavior of Polypropylene/Multi-Walled Carbon Nanotubes Nanocomposites Prepared Through Ultrasound-Assisted Melt Extrusion Process, *Journal Of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* 2015, 53, 475–491. <https://doi.org/10.1002/polb.23655>

Pandey V., Chen H., Ma J., Maia J.M.(2021). Extension-dominated improved dispersive mixing in single-screw extrusion. Part 2: Comparative analysis with twin-screw extruder, *J Appl Polym Sci.* 2021;138:49765-49776. <https://doi.org/10.1002/app.49765>.

Pandey V., Maia J.M. (2021). Extension-dominated improved dispersive mixing in single-screw extrusion. Part 1: Computational and experimental validation, *J Appl Polym Sci.* 2021;138:49716-49734. <https://doi.org/10.1002/app.49716>.

Stanciu N.V., Stan F., Sandu I.L., Fetecau C., Turcanu A.M. (2021). Thermal, Rheological, Mechanical, and Electrical Properties of Polypropylene/Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposites, *Polymers* 2021, 13(2), 187; <https://doi.org/10.3390/polym13020187>

Tabuani D., Granelli W., Camino G., Claes M. (2007). Polypropylene based carbon nanotubes composites: structure and properties, *e-Polymers* 2007, no. 103. [doi:10.1515/epoly.2008.8.1.1178](https://doi.org/10.1515/epoly.2008.8.1.1178) .

Uwa O. Uyor, Patricia A. Popoola, Olawale M. Popoola, Aigbodion V.S (2022). A review of recent advances on the properties of polypropylene - carbon nanotubes composites *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, First Published March 28, 2022 Research Article, <https://doi.org/10.1177/08927057221077868>

Yan X., Dong H., Xiao Z., Liu Y, Liu T., Chae H.G., Kumar S. (2017). Effect of high-shear mixing by twin-screw extruder on the dispersion and homogeneity of polyacrylonitrile/carbon nanotube composite solution, *Polymer Composites*, 38(4) 2017: 719-726. <https://doi.org/10.1002/pc.23631>

Yin X. Li S., He G., Feng Y., Wen J. (2018). Preparation and characterization of CNTs/UHMWPE nanocomposites via a novel mixer under synergy of ultrasonic wave and extensional deformation, *Ultrasonics - Sonochemistry* 43 (2018) 15–22 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.039>

Zhong J, Isayev AI, Huang KY. (2014). Influence of ultrasonic treatment in PP/CNT composites using masterbatch dilution method, *Polymer*, Vol.55, No.7, 1745-1755, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.02.014>

Zhong J., Isayev A.I., Zhang X. (2016). Ultrasonic twin screw compounding of polypropylene with carbon nanotubes, graphene nanoplates and carbon black, *European Polymer Journal* Volume 80, July 2016, Pages 16-39. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.04.028>

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de CONACYT a través del Proyecto FORDECYT-292399. Los autores desean agradecer al Laboratorio Nacional de Grafeno (CONACYT-232753), LANIAUTO (CONACYT-294030) y CONACYT- A1-S-31735 por el apoyo de instalaciones. Finalmente, los autores desean agradecer a M.R. Rangel, I.O. Solís de la Peña, Seyma de León, Anabel Ochoa, Marcelo I. Ulloa, Efrain Alvidrez, Alex Espinoza, Josue J. Campos, Sergio Zertuche, Jose Lopez-Rivera, M. Palacios-Mesta, Jesús Rodríguez, L.E. Reyes-Vielma, Jesús .A. Cepeda, M. Lozano, Gpe. Mendez, Guadalupe Telles, Victor Comparan, Janett A. Valdez, Daniel Alvarado y M.L.Garcia Salazar por su apoyo técnico e informático.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Copyright

La Revista Latinoamericana de Difusión Científica declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

