

Nanocompuestos con base polimérica resistente a impactos

Nanocomposites with resistant polymeric base to impacts

Dra.C. Danay Gloria Praderes-Cabrera^{1*}

Dr.C. Roberto de la Torre-González¹

¹Centro de Investigación y Desarrollo Técnico (CIDT), La Habana. Cuba.

*Autor para la correspondencia. correo electrónico: cidt@mn.mn.co.cu

RESUMEN

Con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas y de impacto a nanocompuestos de polipropileno con nanotubos de carbono multipared al 1, 3 y 5 %, se le realizaron estudios morfológicos con el Microscópico Electrónico de Barrido, obteniendo micrografías con una dispersión uniforme de los nanotubos en la matriz polimérica. Además, mediante la técnica de Análisis Dinámico Mecánico y los ensayos Izod y de Tracción, se observó de manera general, que a medida que se aumenta el contenido de los nanotubos, las propiedades mecánicas se incrementan con respecto a la matriz polimérica, lo que demuestra el efecto de reforzamiento. Por otra parte, se ve reflejado el aumento del módulo de almacenamiento dinámico, indicando un incremento de la rigidez. De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que los nanocompuestos obtenidos son más ligeros y resistentes frente a colisiones e impactos, los cuales pueden ser empleados en diferentes sectores de la industria.

Palabras clave: nanocompuestos, nanotubos de carbono, impacto, resistentes.

ABSTRACT

For the goal of determining the mechanical and impact properties to nanocomposites of polypropylene with multiwall carbon nanotubes at 1, 3 and 5 %, morphologic studies using Scanning Electronic Microscope were accomplished, obtaining micrographics with a uniform dispersion of nanotubes in the polymeric matrix. Besides, by means of the technique of Mechanical Dynamic Analysis and essays Izod and traction, it was observed, in a general form, than to measure than increases the contents of nanotubes, the mechanical properties increase regarding the polymeric matrix, that demonstrate, the effect of reinforcement. On the other hand, the increase of the dynamic storage module, show an increment of stiffness. According to obtained results, it can be conclude that obtained nanocomposites are lighter and more resistant in front of collisions and impacts, which can be employ at different sectors of industry.

Keywords: nanocomposites, carbon nanotubes, impact, resistant.

Recibido: 18/7/2018

Aprobado: 22/1/2019

Introducción

A nivel mundial, el empleo de la nanotecnología en los materiales compuestos, ha acaparado gran interés en la investigación científica, debido al descubrimiento de distintas propiedades que ofrecen a los macromateriales, permitiendo su empleo en diferentes aplicaciones.

Con el rápido desarrollo de la nanotecnología y los nanomateriales desde los años 90, estudios de estos últimos basados en polímeros, han sido extensivamente utilizados para encontrar, alternativas prometedoras con relación a los materiales compuestos tradicionales. Aunque estos están enfocados principalmente en las propiedades multifuncionales que poseen y en sus

propiedades mecánicas en general, así como en la dispersión del relleno o refuerzo empleado. Un material compuesto de matriz polimérica, debe estar formado por una matriz de alta elongación y fibras de altos módulos de elasticidad, para que absorba y disipe la energía.⁽¹⁾

Los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero, los cuales pueden ser de varias clases.⁽¹⁻⁴⁾ Al adicionarle nanotubos de carbono (NTC) a la matriz polimérica, se obtiene un compuesto con dispersión homogénea de partículas nanométricas dentro de la matriz y propiedades excepcionales.⁽⁴⁻⁹⁾ Lo anterior es consecuencia de que permiten dotar a los materiales de una alta capacidad para absorber la energía de un impacto y transformarla en una deformación plástica, lo cual permitirá la creación de nuevos materiales más ligeros y con mejores prestaciones.⁽¹⁰⁻¹²⁾

En el caso de los nanomateriales compuestos de polipropileno, se emplean los NTC como refuerzo, debido a que estos poseen una combinación única de propiedades térmicas, eléctricas, mecánicas y estructurales, obteniendo avanzados materiales multifuncionales ^(1,9,11-14), que hoy en día son utilizados en múltiples aplicaciones. Por ejemplo, como pinturas para interior y exterior, materiales de construcción e instalación, estructuras para vehículos de transporte, productos electrónicos, procesamiento de alimentos, materiales domésticos e incluso, productos biomédicos como equipamiento hospitalario.⁽⁸⁾ Además, se han empleado como dispositivos inteligentes, ya que son muy pequeños para ser descubiertos, por lo que se reporta su uso como matriz polimérica.⁽⁹⁻¹⁸⁾

Teniendo en cuenta, las propiedades que posee el polipropileno y las posibilidades que brinda el uso de NTC como relleno, se conformaron nanomateriales compuestos y se determinaron las propiedades mecánicas y de impacto de este nuevo material, lo que constituyó el objetivo del presente trabajo.

Materiales y métodos

Para la obtención de los nanocompuestos, se emplearon los siguientes materiales:

- Nanotubos de carbono multipared de pureza mayor del 95 %, diámetro de 8-15 nm y longitud de 50 nm. Estos fueron producidos por deposición química al vapor y suministrados por Chengdu Organic Chemicals Co. Ltd., de la Academia de Ciencias de China.
- PLASTICYL PP 2001170 es un masterbatch basado en polipropileno, en forma de pellets, (PPNTCmc) de color negro, posee un $10,0 \pm 1,0$ % en peso de NTC, densidad real de 1gcm^{-3} , punto de fusión de $165\text{ }^{\circ}\text{C}$, suministrados por la compañía Belga NANOCYL S.A.
- Polipropileno en forma de pellets, (PPme) suministrado por Sinopec Yanshan tipo B4902 de $2\text{ g}\cdot 10\text{ min}^{-1}$ de índice de flujo, $166\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de fusión y densidad de $0,9\text{ gcm}^{-3}$. Utilizado como matriz polimérica en la conformación del nanomaterial compuesto.
- En la dilución efectuada para disminuir el porcentaje de NTC en los masterbatch PLASTICYL PP 2001, se usó polipropileno (PPmc) suministrado por Hebei Eminent Chemical Technology Co., Ltd, de procedencia china, con densidad entre $0,89 - 0,91\text{ gcm}^{-3}$, índice de flujo de $8\text{ a }12\text{ g}\cdot 10\text{ min}^{-1}$, resistencia a la tensión 33 MPa y $166\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de fusión.

Preparación de los nanomateriales compuestos

Mediante el moldeo por inyección se mezclaron 2 kg de pellets de masterbatch comercial (mc) de polipropileno al 10 % de NTC con 1,5 kg de pellets de polipropileno (PPmc) para obtener una placa de PP con NTC al 5 % (PPNTC5mc).

En el caso de los nanomateriales compuestos a partir de masterbatch producidos experimentalmente (me) (PPNTCme), tanto el PP de partida (PPme), como los NTCMP fueron secados 8 h en una estufa al vacío a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los pellets de PPme fueron triturados durante 5 ciclos de 3 min de trituración a 10 Hz. Entre cada ciclo la muestra fue enfriada por intervalos de 5 min. Los nanomateriales compuestos PPNTCme fueron conformados en dos pasos para mejorar la dispersión del relleno. En un primer paso, fue preparado a $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 85 rpm en la extrusora un masterbatch al 8 % en peso (PPNTC8me) a partir de 230 g de PPme

y 20 g de NTCMP. Posteriormente en un segundo paso, los masterbatch obtenidos (PPNTC8me) fueron diluidos en las proporciones de 1; 3 y 5 % en peso. Para un 1 % se diluyeron 28 g de PPNTC8me en 196 g de NTCMP, para 3 % se mezclaron 78 g de PPNTC8me y 130 g de NTCMP, mientras que para 5 % se adicionaron 130 g de PPNTC8me y 78 g de NTCMP. Una vez obtenidos los masterbatch con las diferentes proporciones, se cortaron en forma de gránulos a una longitud de 3 - 5 mm en una máquina cortadora XQJ-25, para la conformación de probetas necesarias en la determinación de las propiedades.

Las placas de los PPNTCme, se moldearon a 210 °C y 20 MPa, empleando la máquina de compresión Hot Pressure KH-0801. Además, se moldearon placas de PPme para poder establecer comparación con los nanomateriales compuestos al 1, 3 y 5 % en peso.

Técnicas y ensayos para determinar la morfología y las propiedades mecánicas

Existen ensayos encaminados a determinar el comportamiento de un material ante la aplicación de una carga. Los resultados de estas pruebas constituyen las propiedades mecánicas del material. Para la caracterización mecánica, se emplea la técnica de Análisis Dinámico Mecánico y los ensayos mecánicos de tracción e Impacto Izod, los cuales permiten la determinación de la interacción entre los NTC y la matriz polimérica, para su aplicación como medio de protección ^(11-13,15)

Microscopía Electrónica de Barrido

La morfología de los nanomateriales compuestos fue analizada mediante el uso del MEB marca JEOL JSM-7500F, con detector de electrones secundarios, resolución 100 Å y cámara de alto vacío entre 1,39 - 1,41 kPa. La superficie de las muestras fue crio fracturada y recubierta con oro por 30 s antes de ser analizada. Para esta técnica el intervalo de trabajo en la evaluación de materiales se encuentra entre 20 y 30,000 X, lo cual permite el estudio morfológico microestructural de la superficie de los NTC.

Análisis Dinámico Mecánico

El Análisis Dinámico Mecánico (DMA por sus siglas en inglés) fue realizado mediante el equipo DMA Q800 apparatus (TA Instruments, USA) en modo de tensión a 1 Hz de frecuencia y 10 μm de amplitud de oscilación. El módulo de almacenamiento (E'), el módulo de pérdida (E'') y la $\tan \delta$ fueron determinados en función de la temperatura de acuerdo con la norma D7028 – 07.⁽¹⁹⁾ La velocidad de calentamiento fue de 3 $^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$ en atmósfera de nitrógeno. Las dimensiones de los especímenes para la prueba de DMA, se moldearon con la máquina de compresión, Hot Pressure KH-0801 a 13 mm x 4,3 mm x 0,4 mm (longitud x ancho x espesor) a 210 $^{\circ}\text{C}$ y 20 MPa.

Ensayo de Tracción

Las pruebas de tensión de los especímenes se realizaron con la máquina ZWICK ROELL 2010, de procedencia China, dirigida a través de un programa test Xpert II.

De cada muestra se realizaron 10 corridas para obtener el promedio, desviación estándar y los valores de errores estándares mediante el programa Statgraphics Centurion XV. Cada experimento fue realizado a 10 mm de longitud y una velocidad de 2 $\text{mm}.\text{min}^{-1}$, con mordazas adecuadas para ensayos de Tracción de materiales poliméricos. Las mediciones del módulo, fueron realizadas en un cuarto de temperatura con un extensómetro eléctrico. Los valores de la resistencia a la tensión y la elongación de ruptura se evaluaron sin el empleo de este.

Las mediciones del nanomaterial compuesto a partir de *mc* se realizaron en el equipo Electronic Universal Testing Machines de marca ALWETRONCT 5. AB Lorentze Wettre a 10 kN.

Para la realización del ensayo de Tracción, los masterbatch obtenidos fueron moldeados por inyección en probetas normadas de 3,0 mm x 3,1 mm x 3,3 mm (longitud x ancho x espesor), de acuerdo a la norma ASTM D638-03⁽²⁰⁾, mediante la máquina de inyección HAAKE MINIJET, con temperatura de 230 $^{\circ}\text{C}$ por 4 min y 39 $^{\circ}\text{C}$ del cilindro y el molde respectivamente, así como presión de inyección 917,7 $\text{kgf}.\text{cm}^{-2}$ por 40 s y presión mantenida de 458,9 $\text{kgf}.\text{cm}^{-2}$ por 40 s.

Ensayo de Impacto Izod

Para evaluar la resistencia al impacto del material compuesto, se realizó el ensayo Izod según la norma D6110 – 10.⁽²¹⁾ La velocidad de impacto fue de $2,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y se utilizó un péndulo con masa de 0,4754 kg y 2 J de energía, monitorizado por el programa Test Xpert IIS.A en el equipo Zwick\Roell, modelo HIT5.5P.

Para el caso de los nanomateriales compuestos confeccionados a partir de *mc*, se empleó el equipo marca VEB WERKTOFFPRÜFMASCHINEN LEIPZIG de procedencia alemana. El péndulo de 0,784 kg de masa, longitud de 280 mm y 50 J de energía.

Las probetas se moldearon con la máquina de compresión Hot Pressure KH-0801 con dimensiones de 80 mm x10 mm x10 mm a $210 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y 20 MPa, sin ningún tipo de entalla, según norma.⁽²¹⁾ Los valores reportados se obtuvieron acorde con el promedio de los resultados de los 10 especímenes para cada muestra.

Análisis estadístico de las propiedades mecánicas

Mediante el programa Statgraphics Centurion XV, se realizaron comparaciones entre los nanomateriales compuestos obtenidos, en cuanto a sus propiedades mecánicas tomando como parámetros el módulo de Young, la resistencia a la tensión y la resistencia al Impacto Izod. Para la comparación entre varias muestras, se empleó el estadígrafo F de Fisher, mientras que, para la comparación para una misma muestra se utilizó el estadígrafo t de Student.

Resultados y discusión

Caracterización morfológica

La eficiencia de los NTC en el reforzamiento de la matriz polimérica, se determina por el grado de dispersión de los mismos, por lo que la caracterización morfológica es imprescindible para la evaluación de la dispersión. En la figura 1 se observan las micrográficas obtenidas en el MEB, las cuales revelan una buena dispersión de los NTC y más uniforme dentro de la matriz polimérica

para el *PPNTC1me*, *PPNTC3me* y *PPNTC5me*, mientras que, para el caso de *PPNTC5mc*, se observan pequeños grumos, que puede ser provocados por el procedimiento de obtención, los cuales pueden influir en las propiedades físico-mecánicas. Para corroborar lo anterior, sería de utilidad la aplicación de la técnica de Microscopía Electrónica de Transmisión, que permite determinar la distancia entre partículas.

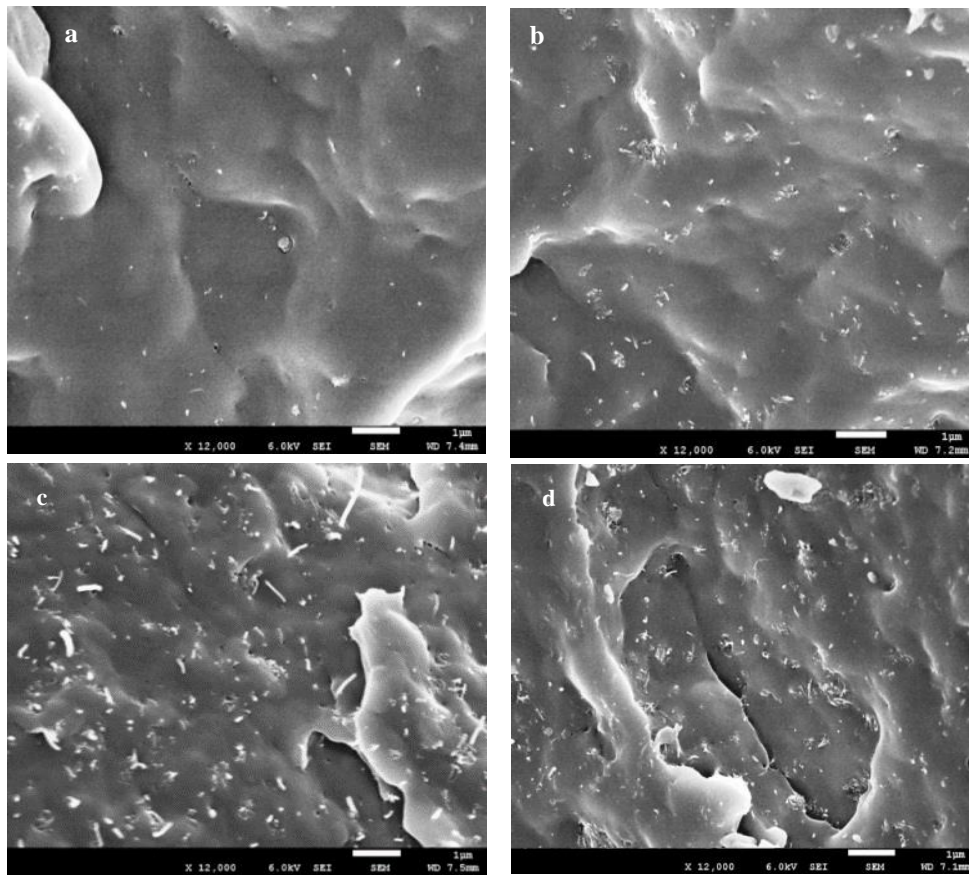


Fig. 1. Micrografías del MEB de los nanomateriales compuestos obtenidos
a) *PPNTC1me*, b) *PPNTC3me*, c) *PPNTC5me* y d) *PPNTC5mc*

Análisis Dinámico Mecánico

En la figura 2 se observan los gráficos correspondientes al DMA, los cuales muestran el comportamiento del módulo de almacenamiento (E'), módulo de pérdida (E'') y de la $\tan \delta$ (tan Delta) en función de la temperatura para los nanomateriales compuestos a partir de *me*.

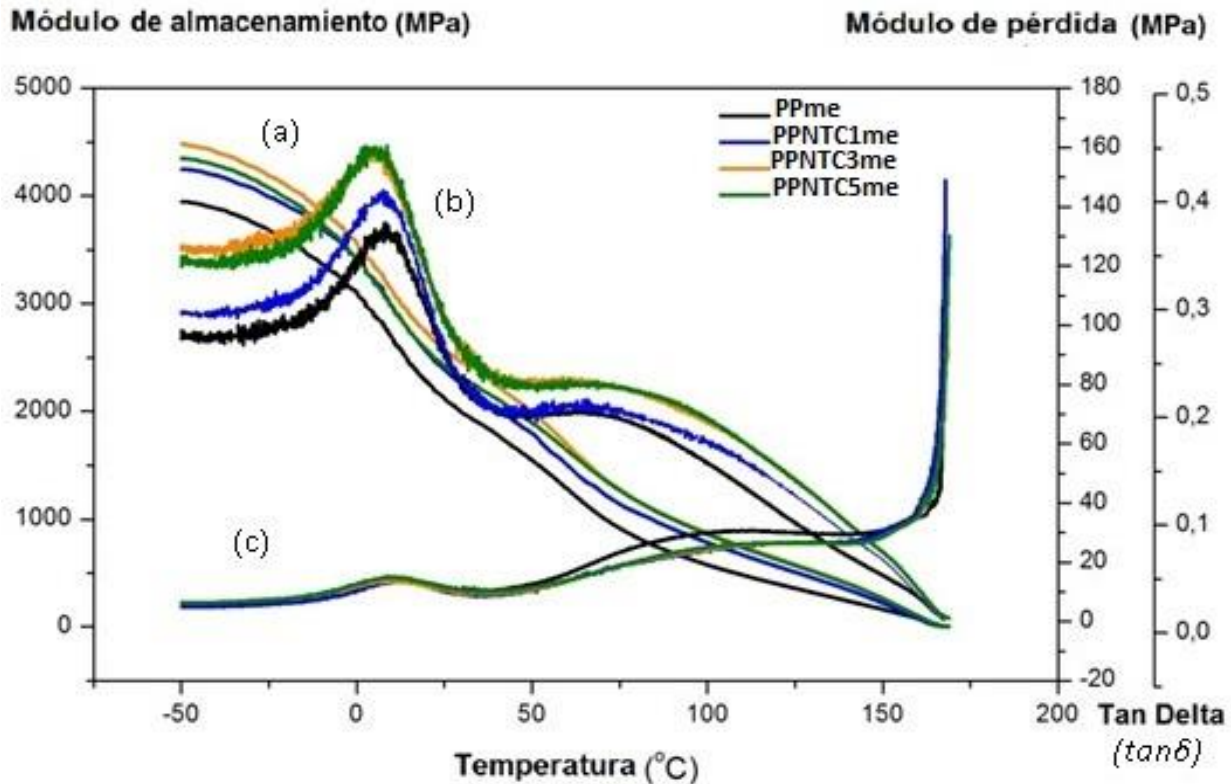


Fig. 2. Diagramas de PPme y sus nanomateriales compuestos en función de la temperatura, a) módulo de almacenamiento, b) módulo de pérdida y c) $\tan \delta$

Los resultados demuestran que con la incorporación y aumento de la concentración de los NTC, se incrementa el módulo de almacenamiento en todo el intervalo de temperatura comparado con el *PPme*. A bajas temperaturas el *PPNTC3me* presenta mayor E' y a medida que se va incrementando, se obtienen valores semejantes con el *PPNTC5me*. Comportamiento similar, se obtiene con el módulo de pérdida. En el caso de la $\tan \delta$, (figura 2 curva c) no se observan cambios significativos entre los nanomateriales compuestos y el *PPme*, por lo que no se afecta con la incorporación de los nanotubos. Estos gráficos muestran, que la temperatura de

transición vítrea (T_g) es $10\text{ }^\circ\text{C}$, por lo que los nanomateriales que estarán sujetos a cargas de impacto durante las condiciones de servicio, tendrán una temperatura de transición por debajo de la temperatura de operación, determinada por el ambiente que rodea al material, lo que significa que el polipropileno es el polímero adecuado.

El aumento del módulo de almacenamiento dinámico indica un incremento de la rigidez, el cual se ve reflejado a medida que se aumenta el contenido de NTC de manera general.

Comportamiento a la Tracción

En la figura 3 se representan los diagramas típicos de esfuerzo-deformación para los compuestos de PP y los materiales compuestos *PPCNT* para *me* y *mc*, mostrando que los nanomateriales obtenidos son resistentes.

Para el PP se observa el típico comportamiento de material dúctil con alta resistencia a la elongación de ruptura. Sin embargo, a medida que se incrementa el contenido de nanotubos en los nanomateriales compuestos, decrece el porcentaje de deformación. Estos muestran un comportamiento frágil después del punto de fluencia, valor máximo de tensión y deformación que soporta el material antes de deformarse.

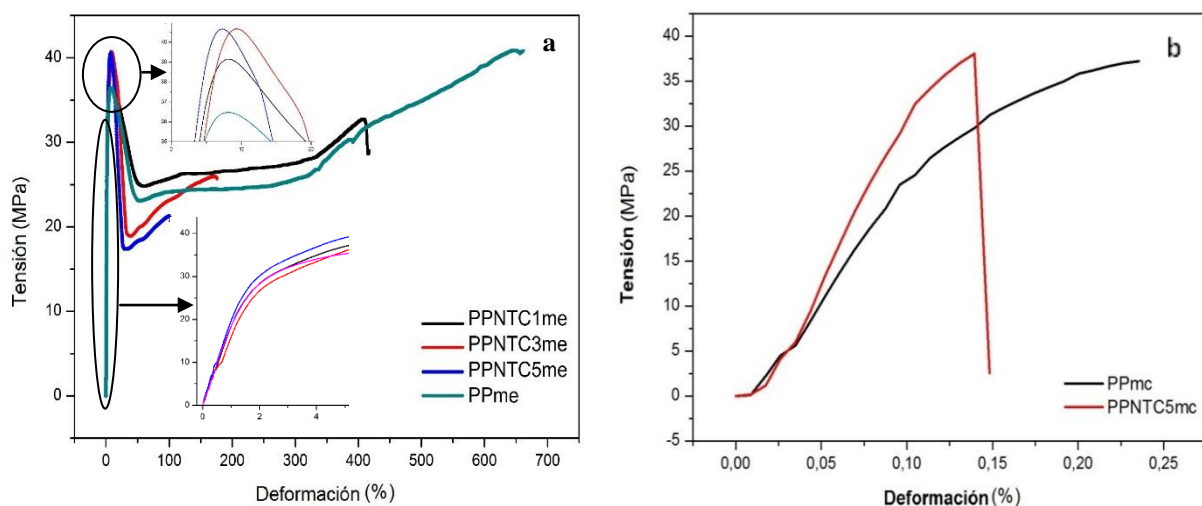


Fig. 3. Diagramas tensión-deformación del PP y sus nanomateriales compuestos, a) para *me* y b) para *mc*.

Los valores del módulo de Young (E) y la resistencia a la tensión de los materiales compuestos, se listan en la tabla 1. De manera general, se puede observar que a medida que se aumenta el contenido de los NTC, estos se incrementan con respecto a la matriz polimérica, lo que demuestra, el efecto de reforzamiento de los NTCMP. Para el caso de los nanocompuestos producidos a partir de mc , tanto el módulo de Young como la tensión máxima, son inferiores a los nanocompuestos obtenidos a partir de me .

El módulo de Young para los nanocompuestos de 1, 3 y 5 % en peso de NTCMP, a partir de me , incrementan su valor en 14, 30 y 32 % respectivamente con respecto al $PPme$, mientras que, en el caso de los mc solo se incrementa el 19 %. Para la resistencia a la tensión se incrementa en 6,0; 9,0; 11,1 y 11,9 % para me y para mc en 2,3 % con respecto a $PPme$ y $PPmc$ respectivamente. La mayor variación entre el incremento producido se observa entre el $PPNTC1me$ y $PPNTC3me$.

A medida que se incrementa el porcentaje de nanotubos de carbono, el nanocompuesto es capaz de soportar mayor tensión antes de comenzar a deformarse plásticamente, por lo que, se verán favorecidas las propiedades mecánicas del material.

Tabla 1- Propiedades mecánicas de los nanomateriales compuestos a partir de me y mc

Muestra	NTC (%)	Módulo de Young (GPa)	Resistencia a la tensión (MPa)
<i>PPme</i>	0	1,87±0,01	36,58±0,02
<i>PPmc</i>	0	1,97±0,02	37,19±0,04
<i>PPCNT1me</i>	1	2,14±0,01	39,06±0,05
<i>PPCNT3me</i>	3	2,44±0,01	40,64±0,02
<i>PPCNT5me</i>	5	2,47±0,01	40,94±0,16
<i>PPCNT5mc</i>	5	2,35±0,02	38,04±0,05

Ensayo de Impacto Izod

En la figura 4 se grafica la resistencia al Impacto Izod en función del porcentaje de NTC, empleado para evaluar la fragilidad de los materiales compuestos. Las curvas obtenidas para *me* y *mc* respectivamente, muestran que con el incremento del contenido de NTC, aumenta la resistencia al impacto, pero con valores inferiores al del *PPme* en el caso de *me*. En ambos casos, se observa que con la adición de NTC se alcanzan valores inferiores que a los de PP virgen (*PPmc* y *PPme*). Para el 5 % en peso de NTC, se logran mejores resultados para el nanocompuesto desarrollado a partir de *me* que con el obtenido a partir de *mc*.

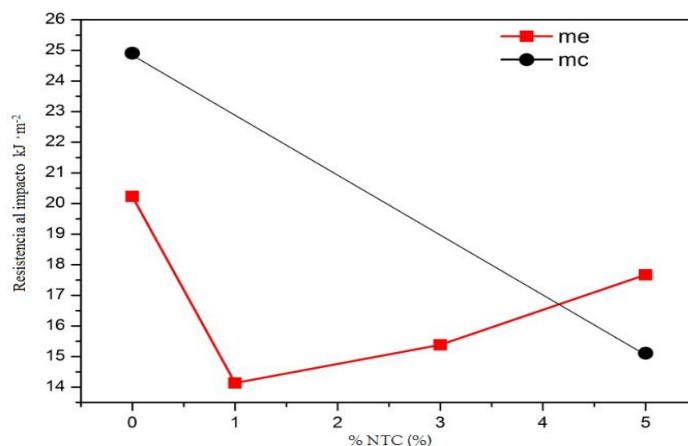


Fig. 4- Comportamiento de la resistencia al impacto de los nanomateriales compuestos a partir de *me* y *mc*

Estos resultados se deben a que como el ensayo de resistencia al Impacto Izod es una prueba que está estandarizada, al impactar la probeta con un golpe repentino y violento con velocidad de deformación extremadamente rápida, se comporta de una forma mucho más frágil, que la observada en el ensayo de tensión, donde se obtienen valores mayores de resistencia a la tensión al incrementar el porcentaje de NTC. Existe un gran beneficio en el alargamiento moderado, pues esta cualidad permite absorber los impactos y choques rápidos, lo que ocurre en la placa de PP virgen tanto para *me*, como para *mc*. Así, el área total bajo la curva esfuerzo-deformación, es un índice de la tenacidad global del material, la cual está directamente relacionada con la resistencia y ductilidad, por lo que, un material con buena resistencia es muy

duro. O sea, un material con resistencia a la tracción muy alta y poco alargamiento será quebradizo, que es lo que sucede cuando se incrementa el contenido de NTC.

Al ser impactados los materiales compuestos, la zona dañada actúa magnificando la tensión localmente, producto de la ruptura de la matriz. Sin embargo, este comportamiento de falla por carga de impacto, es impedido por la presencia de los NTC en los materiales compuestos puesto que, la resistencia a la fractura de los NTC está estimada para ser del 10 al 30 % .⁽²¹⁾

Esta tendencia de alta falla de los NTC, permite una curvatura extensiva y fluencia de los materiales compuestos.

Análisis estadístico de las propiedades mecánicas de los nanomateriales compuestos

El análisis estadístico se realizó siguiendo el procedimiento descrito en materiales y métodos. Para la comparación entre una misma muestra, se empleó el estadígrafo t de Student y se formularon las hipótesis correspondientes. La precisión calculada se expresa como repetitividad para n=10 en todos los casos. En la tabla 2 se recogen los resultados obtenidos del análisis estadístico de todos los materiales compuestos.

Como se puede apreciar en dicha tabla, la resistencia a la tensión, el módulo de Young y la resistencia al impacto, presentan el valor del estadígrafo *p* menor que $\alpha=0,05$, determinándose para cada medición su precisión y el intervalo de confianza para un 95 %.

Tabla 2- Análisis estadístico de las propiedades mecánicas de los nanomateriales compuestos de *me* y *mc*.

Muestra	Resistencia a la tensión (MPa)		Resistencia al impacto (kJ m^{-2})		Módulo de Young (GPa)	
	Media	Valor p	Media	Valor p	Media	Valor p
<i>PPme</i>	36,58±0,02	0,00	20,91±0,01	0,00	1,87±0,01	0,00
<i>PPmc</i>	37,19±0,04	0,00	24,91±0,61	0,00	1,97±0,02	0,00
<i>PPNTC1me</i>	39,06±0,05	0,00	14,14±0,19	0,00	2,14±0,01	0,00

<i>PPNTC3me</i>	40,64±0,02	0,00	15,38±0,20	0,00	2,44±0,01	0,00
<i>PPNTC5me</i>	40,94±0,16	0,00	17,67±0,30	0,00	2,47±0,01	0,00
<i>PPNTC5mc</i>	38,04±0,05	0,00	15,11±0,20	0,00	2,35±0,02	0,00

Al realizar la comparación entre todos los materiales compuestos para cada propiedad analizada, mediante el estadígrafo F de Fisher, mostrados en las tablas 3 y 4, se observa a través de los grupos homogéneos, que existen diferencias significativas entre las mediciones del módulo de Young y la resistencia mecánica para un nivel de confianza del 95 %. Como el valor de p calculado es mayor que 0,05 en todos los casos, se rechaza la hipótesis nula en favor de la alterna.

Tabla 3- Comparación de la resistencia a la tensión de los materiales compuestos obtenidos

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Resistencia Tensión <i>PPme</i>	10	36,58±0,02	X
Resistencia Tensión <i>PPmc</i>	10	37,19±0,04	X
Resistencia Tensión <i>PPNTC5mc</i>	10	38,04±0,05	X
Resistencia Tensión <i>PPNTC1me</i>	10	39,06±0,05	X
Resistencia Tensión <i>PPNTC3me</i>	10	40,64±0,02	X
Resistencia Tensión <i>PPNTC5me</i>	10	40,94±0,16	X

Tabla 4- Comparación del módulo de Young de los materiales compuestos obtenidos.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Módulo de Young <i>PPme</i>	10	1,87±0,01	X
Módulo de Young <i>PPmc</i>	10	1,97±0,02	X
Módulo de Young <i>PPNTC1me</i>	10	2,14±0,01	X
Módulo de Young <i>PPNTC5mc</i>	10	2,44±0,01	X
Módulo de Young <i>PPNTC3me</i>	10	2,47±0,01	X
Módulo de Young <i>PPNTC5me</i>	10	2,35±0,02	X

En el caso de la resistencia al impacto, los resultados estadísticos obtenidos tabulados en la tabla 5, muestran que no existen diferencias significativas entre las maquetas *PPNTC3me* y *PPNTC5mc*, según la alineación de los grupos homogéneos. El valor del estadígrafo *p* calculado es mayor que 0,05 para un 95 % de nivel de confianza.

Tabla 5- Comparación de la resistencia al impacto de los materiales compuestos obtenidos

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Resistencia impacto <i>PPNTC1me</i>	10	14,14±0,19	X
Resistencia impacto <i>PPNTC5mc</i>	10	15,11±0,20	X
Resistencia impacto <i>PPNTC3me</i>	10	15,38±0,20	X
Resistencia impacto <i>PPNTC5me</i>	10	17,67±0,30	X
Resistencia impacto <i>PPme</i>	10	20,91±0,01	X
Resistencia impacto <i>PPmc</i>	10	24,91±0,61	X

Los NTC ofrecen un gran potencial para mejorar las propiedades del PP virgen. No solo las propiedades de los propios NTC varían debido a las impurezas durante el procesamiento, sino que con la adición de los NTC a la matriz polimérica aparecen otras múltiples consideraciones que pueden resultar problemáticas: las dimensiones de los NTC, la dispersión, la concentración, la alineación y la adhesión en la interfase NTC - matriz. Todas estas, son las que rigen al final las propiedades del nanomaterial compuesto obtenido.

Conclusiones

Los nanomateriales compuestos de PP con NTCMP obtenidos fueron evaluados mediante técnicas de análisis, para la caracterización químico y físico-mecánico. Las propiedades mecánicas de los nanomateriales compuestos, se incrementan con el aumento de los NTC, obteniéndose mayores valores para *PPNTC5me*. A diferencia de la resistencia al impacto determinada por el ensayo Izod, que tiende a aumentar, pero con valores inferiores al del PP. Con los materiales compuestos de matriz polimérica nanoestructurados obtenidos, se pueden

desarrollar medios con alta resistencia mecánica y al impacto para la industria ligera, automotriz y la industria de la construcción.

Nomenclaturas

Masterbach- Mezcla de dos materiales, en este caso polipropileno con diferentes concentraciones de nanotubos de carbono.

mc- Masterbach comercial.

me- Masterbach obtenidos experimentalmente.

NTC- Nanotubos de carbono.

NTCMP- Nanotubos de carbono de pared múltiple.

PP- Polipropileno.

PPmc- Polipropileno empleado para confeccionar un material compuesto a partir de masterbach comercial.

PPme- Polipropileno empleado para confeccionar un material compuesto a partir de masterbach obtenidos experimentalmente.

PPNTC- Material compuesto de polipropileno con nanotubos de carbono de pared múltiple.

PPNTC1- Material compuesto de polipropileno con nanotubos de carbono de pared múltiple al 1 % en peso.

PPNTC3- Material compuesto de polipropileno con nanotubos de carbono de pared múltiple al 3 % en peso.

PPNTC5- Material compuesto de polipropileno con nanotubos de carbono de pared múltiple al 5 % en peso.

Referencias bibliográficas

1. PETERS, S.T. Advanced composite materials and process. Handbook of plastics, elastomers and composites. 3ra Ed, McGraw-Hill, 1996. Cap.3.
2. HOSOKAWA, M. Nanoparticle Technology Handbook. Nanocomposite structure. Elsevier Scientific Publishing Company. 2006, p. 203. Cap. 4.
3. CHARTOFF, R. & SIRCAR, A. Encyclopedia of Polymer Science and Technology: Thermal Analysis of Polymers. University of Arizona: John Wiley & Sons. 2005, 1-86.
4. BREDEAU, S.; PEETERBROECK S.; BONDUEL, D.; ALEXANDRE, M. & DUBOIS, P. "From carbon nanotube coatings to high-performance polymer nanocomposites". *Polymer International*. 2008, 57, 547–553.
5. DRESSELHAUS, S. R. & DRESSELHAUS. M. S. Physical properties of carbon nanotubes. Imperial College Press. Singapore. 1998, 74-82.
6. LIU, C. & CHOI, J. "Improved dispersion of carbon nanotubes in polymers at high concentrations". *Nanomaterials*. 2012, 2 (4), 329–347.
7. PRASHANTHA, K.; SOULESTIN, J.; LACRAMPE, M.; CLAES, M.; DUPIN, G. & KRAWCZAK, P. "Multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites based on masterbatch route: Improvement of dispersion and mechanical properties through PP-g-MA addition". *Express Polymer Letters*. 2008, 2 (10), 735-745.
8. MONIRUZZAMAN, M. y WINEY, K.I. "Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes". *Macromolecules*. 2006, 39, 5194-5205.
9. ZHAO, P.; WANG, K.; YANG, H.; ZHANG, Q.; DU, R. y FU, Q. "Excellent tensile ductility in highly oriented injection-molded bars of polypropylene/carbon nanotubes composites". *Polymer*. 2007, 48, 5688. DOI: 10.1016/j.polymer. 2007.07.022.
10. VELASCO, C.; MARTÍNEZ, A. L. y CASTANO, V. M. "Carbon nanotube-polymer nanocomposites: The role of interfaces". *Comp. Interface*. 2005, 11, 567-586.

11. BOROVSANKA, I.; KOTSILKOVA, R.; MONLEON, M.; VALLES, A. y DJOUMALIISKY, S. "Thermal, mechanical and viscoelastic properties of compatibilized polypropylene/ multi-walled carbon nanotube nanocomposites". *Journal of Elastomers & Plastics*. 2016, 48 (7), 576–599. DOI: 10.1177/0095244315613617.
12. FEREDOON, A.; ZAMANI, M.; SABET, A. & DOLATI, SH. Experimental Investigation on Multi-wall Carbon Nanotube/Polypropylene Nanocomposite under High and Low Velocity Impact. International Conference on Nanotechnology and Biosensors. IPCBEE. 2011, p. 25.
13. CHANG, T.; JENSEN, L.; KISLIUK, A.; PIPES, R., PYRZ, R. y SOKOLOV, A. "Microscopic mechanism of reinforcement in single-wall carbon nanotube/polypropylene nanocomposite". *Polymer*. 2005, 46, 439. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.11.030.
14. PRASHANTHA, K.; SOULESTIN, J.; LACRAMPE, M.; KRAWCZAK, P.; DUPIN, G. y CLAES, M. "Masterbatch-based multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites: Assessment of rheological and mechanical properties". *Composites Science and Technology*. 2009, 69, 1756–1763.
15. MCINTOSH, D; KHABASHESKU, V. y BARRERA. E. "Benzoyl peroxide initiated in situ functionalization, processing, and mechanical properties of single-walled carbon nanotube–polypropylene composite fibers". *J Phys Chem C*. 2007, 111, 1592. DOI: 10.1021/jp065399d.
16. ZUO, W.; DONG, G.; HAK, K.; DAE, K.; CHOON, L.; LAWRENCE, K. & JOUNG, P. "Mechanical and interfacial evaluation of CNT/polypropylene composites and monitoring of damage using electrical resistance measurements". *Composites Science and Technology*. 2013, 81, 69-75.
17. MAHDIEH, M.; ABDOLHOSSEIN, F. & ALIREZA, S. "Multi-walled carbon nanotube-filled polypropylene nanocomposites: high velocity impact response and mechanical properties". *Iran Polym J*. 2012, 21, 887-894. DOI 10.1007/s13726-012-0097-z.
18. PETCHWATTANA, N.; COVAVISARUCH, S. & KOTPHETSANG, K. Multi-walled Carbon Nanotube Filled Polypropylene Nanocomposites: Electrical, Mechanical, Rheological, Thermal and Morphological Investigations. Proceedings of the 3rd International Conference on Industrial Application Engineering. 2015. DOI: 10.12792/iciae2015.063.

19. Norma D7028 – 07. Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). 2007.
20. Norma D 638 - 03. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. American Society for Testing and Materials IHS Intra/Spex technology and images. ASTM International. United States. 2004.
21. Norma D6110 – 10. Standard Test Method for Determining the Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics. ASTM International. United States. 2010. DOI:10.1520/D6110-10.
22. Data sheet System 2000 Epoxy Resin. Part # - 2000, 2020, 2060, 2120. Fibre Glast Developments Corporation. 800.214.8579.