

# Análisis teórico vs. Experimental de las Propiedades Mecánicas de Materiales Compuestos Poliméricos Reforzados con Óxido de Grafeno

<sup>1</sup>Castro-Ocampo Orlando\*, <sup>2</sup>Morales-Bergas Enrique, <sup>1</sup>García-Hernández Edgar, <sup>1</sup>Arrieta-Gonzalez Cinthya Dinora <sup>1</sup>Vargas-Galarza Zully, <sup>1</sup>Alvarez-Castillo Alberto\*\*

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México(TecNM)/Instituto Tecnológico de Zacatepec (ITZ), División de Estudios de Posgrado e Investigación; Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Calzada Tecnológico No. 27, C.P. 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos. A.P. 45, México.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (CSIC), C/ Juan de la Cierva 3, Z.C. 28006, Madrid, España

[\\*or-cast-oc@hotmail.com](mailto:*or-cast-oc@hotmail.com)

[\\*\\*alberto.ac@itzacatepec.edu.mx](mailto:**alberto.ac@itzacatepec.edu.mx)

**Recibido:** 30 de octubre, 2017

**Aceptado:** 8 de diciembre, 2017

## RESUMEN

En los materiales compuestos a base de grafeno no se han obtenido las propiedades calculadas utilizando modelos teóricos, por lo que, no se han logrado aprovechar eficientemente las propiedades mecánicas del grafeno en materiales compuestos poliméricos. Por tanto, el presente trabajo muestra los resultados comparativos entre las propiedades mecánicas experimentales reportadas en varios artículos y las propiedades mecánicas obtenidas aplicando el modelo teórico basado en igualdad de deformaciones (modelo de rebanas) encontrándose que los datos experimentales están muy alejados de los valores teóricos calculados (ideales). Se compararon los datos experimentales obtenidos en los materiales compuestos siguientes: PET/(GO/AEGO/GO), Epoxi/GO y PP/GO cuyos valores reportados difieren de lo teórico en 0.76 % , 0.13% y 0.01 % en el esfuerzo a tensión para las matrices de PET, Epoxi y PP respectivamente y en el módulo de Young alcanzan apenas 0.82 % y 0.09 % del valor ideal para las matrices Epoxi y PP respectivamente, siendo la matriz de PET la que alcanzó un valor por encima de las anteriores de 5.27% para el módulo de Young del valor ideal calculado con el modelo.

**Palabras claves:** Compuestos, Poliméricos, Grafeno, Modelos, Mecánico

## ABSTRACT

In the graphene-based composite materials the properties calculated using theoretical models have not been reached, therefore, the mechanical properties of graphene in polymeric composite materials have not been efficiently exploited. Thereupon, the present work shows the comparative results between the experimental mechanical properties reported in several articles and the mechanical properties obtained by applying the theoretical model based on equality of deformations (slice model) (D. Hull, 1996), finding that the experimental data are very far from the values calculated theoretically (ideal). The experimental data obtained in the following composite materials were compared: PET / (GO / AEGO / GO) (Kim et al., 2016), Epoxy / GO (Wan, Gong, Tang, Wu, & Jiang, 2014) and PP / GO (An, Jeon, & Jeong, 2012) whose reported values reach 0.76%, 0.13%, and 0.01% in the tensile stress of the theoretical calculated value for PET, Epoxi, and PP matrices respectively, and in the Young's modulus values reach only 0.82% and 0.09% of the theoretical value for Epoxy and PP matrices, whereas, in PET matrix reaching a value of 5.27% for the Young's modulus, of the theoretical value calculated with the model.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde su descubrimiento en 2004 por Constantin Novoselov (Novoselov et al., 2004) el grafeno ha sido motivo de distintos estudios y aplicaciones, principalmente como refuerzo en materiales compuestos poliméricos, además dado que el grafeno es un arreglo bidimensional de átomos de carbono en  $sp^2$  con el espesor de un átomo (Kuilla et al., 2010), con excepcionales propiedades mecánicas (Lee, Wei, Kysar, & Hone, 2008). Dado su tamaño, los materiales compuestos con el grafeno como reforzante, están considerados dentro de los materiales nano-compuestos cuyas propiedades mecánicas predichas son excepcionalmente destacadas (Mukhopadhyay & Gupta, 2011)

Específicamente los materiales compuestos poliméricos reforzados con grafeno han despertado gran interés para mejorar propiedades de los materiales, tales como, propiedades de barrera al oxígeno y  $CO_2$  (Szymczyk et al., 2015), propiedades eléctricas (Li & Jeong, 2011) y mecánicas (Seyyed Monfared Zanjani, Saner Okan, & Menciloglu, 2015), entre otras. Sin embargo, se han evidenciado problemas con la interface de la matriz polimérica y el grafeno debido a la tendencia de éste a formar aglomerados (Szymczyk et al., 2015), evitando el aprovechamiento eficiente de las grandiosas propiedades mecánicas del grafeno en materiales compuestos poliméricos. Al respecto, se ha encontrado una gran discrepancia entre el comportamiento mecánico experimental del compuesto polimérico con los datos teóricos ideales: ésta discrepancia está relacionada con la calidad de su interface, ya que el modelo teórico utilizado en este estudio asume una interface perfecta además que al respecto pocos artículos han comparado los datos teóricos con los experimentales en compuestos con grafeno (Potts et al., 2011), y no se le ha dado una explicación amplia sobre lo que ocasiona esa interfase imperfecta.

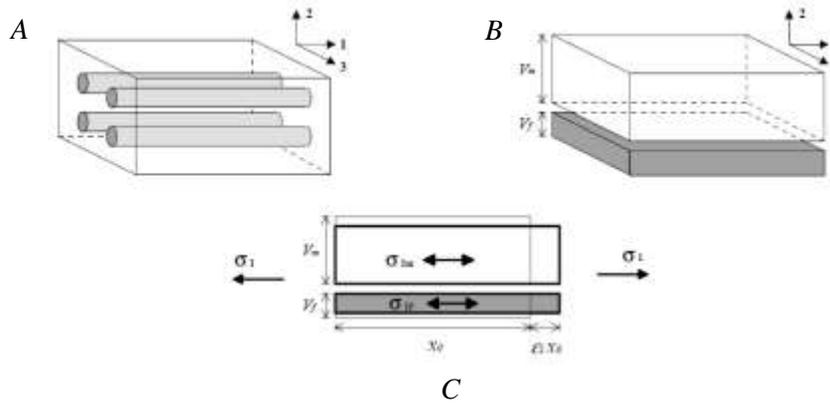
Por lo que, en el presente trabajo se realizaron los cálculos teóricos del comportamiento mecánico de los materiales compuestos mediante el modelo de rebanadas y se compararon con valores experimentales obtenidos de la literatura para compuestos poliméricos PET (Kim et al., 2016)], Resina Epóxica (Wan, Gong, Tang, Wu, & Jiang, 2014)] y polipropileno (PP) (An et al., 2012) reforzadas con óxido de grafeno (GO, por sus siglas en inglés) para finalmente proporcionar unos comentarios

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 MODELO TEÓRICO UTILIZADO

El modelo utilizado para los cálculos teóricos es el modelo de rebanadas que contempla la distribución de esfuerzos longitudinales (en dirección a la fibra) entre la fibra y la matriz (Figura 1) (D. Hull, 1996) el cual asume una interfase perfecta entre la fibra y la matriz. Dicho modelo está en función de la fracción en volumen de la fibra y tiene como constantes las magnitudes de la resistencia a la tensión y módulo de la fibra y la matriz. La consideración que se hace en dicho modelo, para un material compuesto por fibras continuas alineadas, es que está compuesto por dos rebanadas paralelas de dos constituyentes (fibra y matriz) perfectamente enlazados en una interface perfecta, donde su espesor relativo de ambos se encuentra en proporción a la fracción en volumen, por lo tanto, si se le aplica un esfuerzo en dirección a las fibras se exhibe igual deformación para la matriz, la fibra y el material compuesto, [modelo de Voigt (Blanco et al., 2015)] para comportamiento visco-elástico de materiales compuestos, esto es:

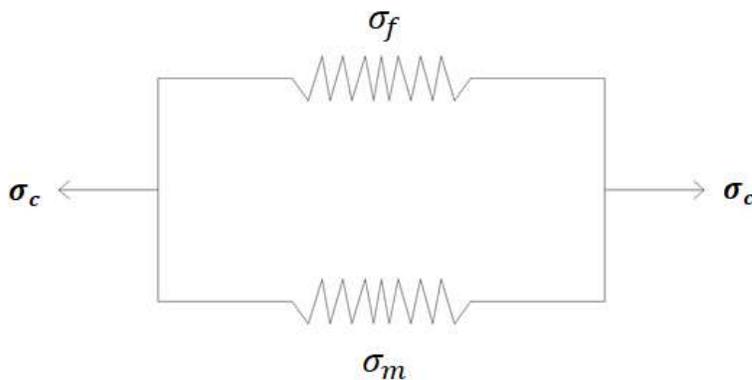
$$\epsilon_c = \epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \epsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} \dots\dots\dots(1)$$



**Figura 1.** Diagrama esquemático de: a) Un material compuesto con fibras continuas alineadas; b) Una representación del material constituido por dos rebanadas de matriz y fibra y c) Aplicación de un esfuerzo  $\sigma_c$  paralelo al eje de la fibra, experimentando ambas rebanadas la misma deformación obtenida de la referencia D. Hull, 1996

Siguiendo la disposición de los componentes, el material compuesto puede ser representado como un sistema análogo de resortes (dentro del límite elástico) en paralelo (Figura 2). De esta manera, la resistencia total del material compuesto ( $\sigma_c$ ) es la suma de sus dos resistencias en paralelo ( $\sigma_f$  y  $\sigma_m$ ), multiplicadas por la contribución de la fracción en volumen de cada una de ellas, esto es:

$$\sigma_c = (1 - f)\sigma_m + f\sigma_f \dots\dots\dots(2)$$



**Figura 2:** Representación análoga de la resistencia a la tensión del material compuesto ( D. Hull, 1996)

Por otro lado tomando la expresión (2), la premisa de deformaciones iguales ( $\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m$ ) y sustituyendo dichas consideraciones en la fórmula conocida del módulo de Young se tiene:

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{(1 - f)\sigma_m + f\sigma_f}{\frac{\sigma_f}{E_f}} = E_f \left[ \frac{(1 - f)\sigma_m + f\sigma_f}{\sigma_f} \right]$$

Además, si aplicamos la relación (1) llegamos a:

$$E_c = (1 - f)E_m + fE_f \dots \dots \dots (3)$$

La expresión (3) es denominada la ley de las mezclas, la cual considera que el módulo de Young de un material compuesto depende del módulo de sus componentes y la aportación de sus fracciones en volumen.

Las expresiones (2) y (3) son los modelos utilizados para predecir el comportamiento del esfuerzo y el módulo a la tensión de los materiales compuestos.

## 2.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES UTILIZADOS

Se utilizaron los resultados experimentales reportados para las matrices de poli(tereftalato de etileno) [PET, por sus siglas en inglés] reforzado con óxido de grafeno (GO, por sus siglas en inglés) [0.0463 GP para el esfuerzo a la tensión y 2.9 GP para el módulo de Young (Kim et al., 2016)], Resina Epóxica con GO [0.0592 GP de esfuerzo a tensión y 3.15 GP de módulo (Wan et al., 2014)] y polipropileno (PP) reforzado con GO (0.02 GP de esfuerzo a tensión y 0.449 GP de módulo (An, Jeon, & Jeong, 2012). Para el grafeno puro (G), se tomará el valor reportada de 130 GP para el esfuerzo a tensión y 1 TP para el módulo de Young (Lee et al., 2008).

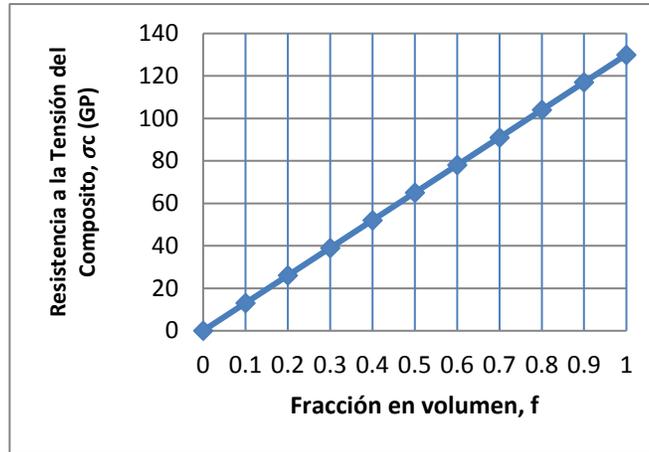
## 2.3 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A LA TENSIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON GRAFENO

La Comparación de las propiedades mecánicas a la tensión de materiales compuestos reforzados con grafeno se hizo con los valores calculados con el modelo teórico descrito en la sección 2.1, utilizando los valores de las matrices y del grafeno definidos en la sección 2.2, con los valores experimentales reportados para los materiales nanocompuestos hechos con matrices de PET (Kim et al., 2016)], Resina Epóxica (Wan et al., 2014)] y polipropileno (PP) (An et al., 2012) reforzadas con GO.

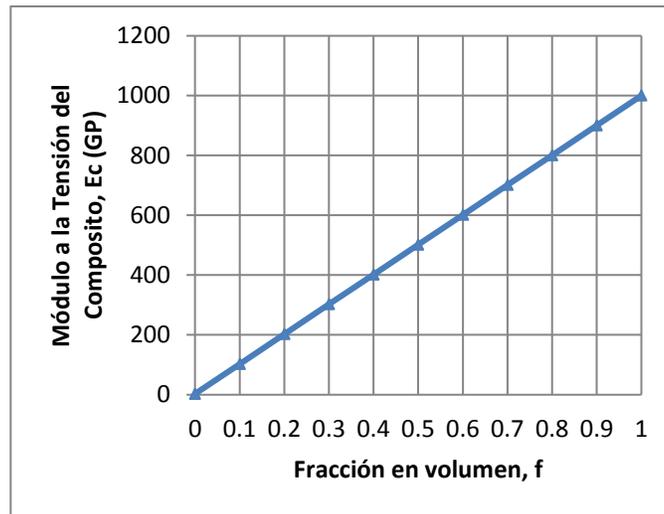
# 3. RESULTADOS

## 3.1 COMPORTAMIENTO TEÓRICO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN FUNCIÓN DE LA FRACCIÓN EN VOLUMEN.

A continuación, se muestra el comportamiento mecánico teórico calculado con las ecuaciones 2 y 3 del esfuerzo y del módulo de Young a la tensión en función de la fracción en volumen, Figura 3(a) y 3(b), respectivamente. Como puede apreciarse ambas propiedades tienen un comportamiento lineal. Cuando  $f = 0$  el material compuesto tiene la resistencia a la tensión y el módulo de Young de la matriz, como era de esperarse y a  $f = 1$ , el material compuesto tiene la resistencia a la tensión y el módulo de Young de la fibra.



(a)



(b)

**Figura 3.** (a) El esfuerzo a tensión estimado con la ecuación 2 (b) Módulo de Young estimado con la ecuación 3 ambos comportamientos fueron calculados para el material compuesto PET/G en función de la fracción en volumen de la fibra (grafeno).

Como puede observarse en las Figuras tenemos que el mayor reforzamiento teórico de los materiales compuestos a base de PET es cuando  $f = 1$ , de donde obtenemos los valores del módulo de Young y Resistencia a la tensión de la fibra. Esto no es posible en la práctica ya que de acuerdo a la referencia (D. Hull, 1996) solo puede llegarse a concentraciones teóricas con una  $f_{\max} = 0.907$  (Para un arreglo hexagonal de las fibras) y  $f_{\max} = 0.785$  (para un cuadrado), pero, existe un límite práctico de la fracción en volumen para aplicaciones comerciales y este no debe ser mayor a 0.7.

### 3.2 COMPARACIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES CON LOS TEÓRICOS DE LOS MATERIALES NANOCOMPUESTOS.

Los datos necesarios para los cálculos y la aplicación de los modelos teóricos para los polímeros considerados como matriz y para el grafeno se muestran en la tabla 3.1. Mientras que, la Tabla 3.2 presenta los resultados experimentales del esfuerzo a la tensión y módulo de Young reportados en las referencias (citadas en la tabla) comparados con los teóricos calculados en la sección 3.1.

**Tabla 1. Magnitudes de los materiales que se requirieron para los cálculos en los modelos teóricos**

Material	Densidad ( $\rho$ ) g/cm <sup>3</sup>	Esfuerzo a tensión ( $\sigma$ ) GP	Módulo de Young (E) GP
Grafeno	0.0017	130	1000
PET	1.38	0.0463	2.9
Epoxi (Estándar DGEBA)	1.16	0.0592	3.15
PP	.946	0.02	0.449

**Tabla 2. Comparación de los valores teóricos y experimentales de diferentes materiales compuestos poliméricos reforzados con grafeno.**

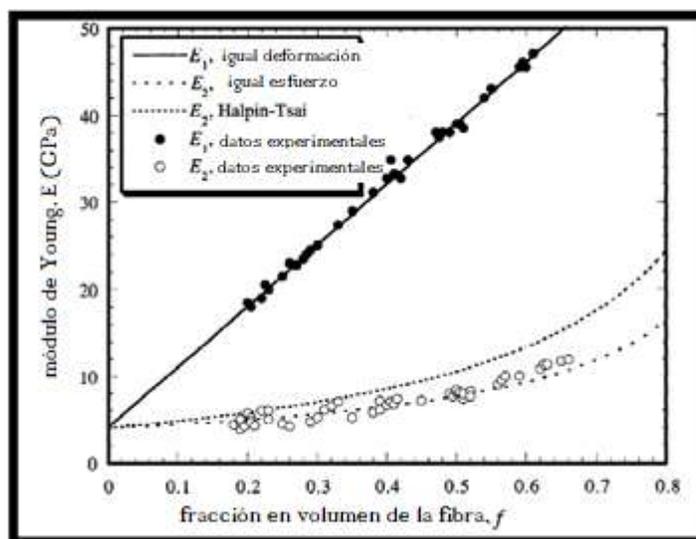
Material compuesto	%wt	Equivalente en fracción en volumen (f)	Resistencia a tensión ( $\sigma_c$ ) experimental	Módulo a tensión ( $E_c$ ) Experimental	Resistencia a tensión ( $\sigma_c$ ) teórico calculado con la ecuación 2	Módulo a tensión ( $E_c$ ) teórico calculado con la ecuación 3
PET/(GO/AEGO/GO) (Kim et al., 2016)	0.01	0.075	0.0746	4.1	9.8	77.77
Epoxi/GO (Wan et al., 2014)	0.1	0.405	0.07154	3.36	52.79	407.70
PP/GO (An et al., 2012)	0.1	0.357	0.0141	0.627	46.52	358.03
	0.5	0.735	0.0157	0.71	95.76	736.70
	1	0.847	0.0163	0.668	110.36	849.03

## 4. DISCUSIONES

En la Tabla 2 se puede apreciar que los valores experimentales de la resistencia y módulo a la tensión muestran una gran diferencia con los teóricos de los materiales compuestos con matriz polimérica/óxido de Grafeno. Para el compuesto PET/(GO/AEGO/GO) se encuentran reportados los valores para el esfuerzo a tensión y módulo de Young de 0.0746 GP y 4.1 GP (Kim et al., 2016) respectivamente, comparados con los valores teóricos de 9.8 GP y 77.77 GP, Haciendo el cálculo del porcentaje alcanzado de los valores experimental respecto a los teóricos, estos alcanzan solo un 0.76% y un 5.27% para la resistencia a la tensión y módulo de Young respectivamente. Para el

compuesto EPOXI/GO (Wan et al., 2014) se reportan 0.07154 GP y 3.36 GP contra 52.79 GP y 407.70 GP teóricos para la resistencia a tensión y módulo de Young respectivamente, lo que nos dan los porcentajes de 0.13% y 0.82% del valor teórico. Finalmente, para el compuesto PP/GO (An et al., 2012) se realizaron los cálculos y comparaciones con lo valores teórico para 3 distintas concentraciones del GO, donde se obtuvieron para el esfuerzo a la tensión los valores experimentales de 0.0141 (0.1 % wt), 0.0157 (0.5 % wt) y 0.0163 (1 % wt) GP, comparados contra 46.52, 95.76 GP y 110.36 GP del valor teórico calculado, respectivamente. Por lo que los valores experimentales representan el 0.030%, 0.016% y 0.014% de los teóricos. Mientras que, para el módulo de Young se obtuvieron los valores experimentales de 0.626 GP (0.1 % wt) contra 358.03 GP (valor teórico), 0.71 (0.5 % wt) contra 736.70 GP (valor teórico) y 0.668 GP (1 % wt) contra 849.03 GP (valor teórico), donde los valores experimentales representan el 0.17%, 0.09% y 0.078% de los teóricos calculados.

Las comparaciones realizadas indican que los materiales compuestos poliméricos reforzados con GO se encuentran aún muy alejados de aprovechar eficientemente las propiedades mecánicas del grafeno. La anterior comparación de propiedades nos indica que no se han logrado un acercamiento a los valores ideales, tal y como se ha logrado con otros materiales compuestos desarrollados (Ver Figura 4). Como puede apreciarse en la Figura, el modelo teórico utilizado para predecir el comportamiento mecánico del material compuesto fibra de vidrio-resina poliéster es muy exacto comparado con los valores experimentales.



**Gráfica 4.1:** Datos experimentales del módulo de Young obtenidos con una carga axial comparados con el modelo de deformaciones iguales y con una carga transversal comparados con el modelo de esfuerzos iguales y el modelo de Halpin-Tsai, para una  $\xi = 1$  para materiales compuestos de fibra de vidrio-resina poliéster (D. Hull, 1996).

Estas grandes diferencias entre propiedades experimentales y calculadas se han atribuido a que la baja energía superficial del grafeno puro a temperatura ambiente ( $46.7 \text{ mJ/m}^2$ ) (Wang S, Zhang, 2009) nos conduce a tener pobre mojabilidad con las matrices, generando una baja dispersión en matrices poliméricas y con esto se reducen las propiedades mecánicas en los nanocompuestos. Por el contrario, el grafeno oxidado (GO) tiene una energía superficial más alta ( $62.1 \text{ mJ/m}^2$ ) (Wang S, Zhang, 2009) y eso ayuda a mejorar su dispersión en matrices poliméricas, pero, conlleva a pérdidas de conductividad eléctrica (Phaedon Avouris, 2012). Por consiguiente, el método de síntesis del grafeno y la forma en que se encuentre el reforzante grafeno (monocapa o multicapa, intercalado, exfoliado o láminas expandidas de grafito) es de crucial importancia para el desarrollo de excelentes propiedades mecánicas en estos materiales.

El estudio de la sobreposición de las nanoláminas de grafeno es fundamental, de acuerdo a la teoría de los materiales compuestos, para que exista una completa transferencia de la carga de la matriz a cada una de las nanocapas del reforzante (Jang-Kyo, K, 1998). En otras palabras, si existe sobreposición de las nanolaminas de grafeno se disminuye el área de contacto (área interfacial) disminuyendo las interacciones totales que existirían entre la carga (grafeno) y la matriz utilizada en la elaboración de los nanomateriales compuestos. Además, El control y el tipo de especies que contienen oxígeno en el GO es el principal foco de investigación en la comunidad de desarrolladores de nanocompuestos basados en grafeno (Mukhopadhyay, P, 2011) debido a que esto conllevaría a la compatibilidad o no compatibilidad de la matriz con el reforzante. Aclarando que a medida que se vaya alcanzando una buena compatibilidad entre Matriz y Grafeno conllevaría también a desarrollar cada vez mejores propiedades mecánicas. Esta compatibilidad y la modificación química y física del reforzante se ha estudiado extensivamente para mejorar la interfase con las matrices y por consiguiente mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto (Alvarez, C. A., et al, 1995), (Salgado, D. R., et al, 2005), (López, R., et al 2000), (García, H. E., et al 2004), (Carrillo, E. H. J., et al 2016) . Pero se ha demostrado que al utilizar grafeno oxidado (GO) como reforzante, los grupos funcionales de oxígeno que posee mejoran las interacciones favorables al tener un carácter más polar que el grafeno puro, ya que interactúan mejor con su carácter polar con algunas matrices poliméricas, como el PET (referencia), mejorando las propiedades mecánicas de los materiales compuestos desarrollados aunque sin acercarse al valor ideal.

## 5. CONCLUSIONES Y/O PROYECTOS FUTUROS

Como se puede apreciar, el modelo teórico nos calcula valores muy por encima de los que se han obtenido experimentalmente. Por lo que, los bajos valores experimentales son ciertamente debido a una interfase imperfecta que presenta el grafeno con las matrices poliméricas (i.e., PET, PP y Epoxi). Esta interfase imperfecta ocurre cuando existen interacciones desfavorables entre matriz y reforzante y aún hoy en día es motivo de debate y estudio. Para obtener propiedades mecánicas en los GPNCs más cercanas a las ideales (teóricas), existen varios retos que se deben vencer para beneficiarse completamente de las propiedades del grafeno en los materiales compuestos, estas son, una dispersión homogénea, una buena distribución espacial en la matriz (la dispersión de hojas individuales de grafeno u GO), que exista una fuerte interacción interplanar entre el grafeno y la matriz, la alineación en la matriz de las nanoláminas y su sobreposición (Phiri J., 2017), etc.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AN, J. E., JEON, G. W., & JEONG, Y. G. (2012). Preparation and properties of polypropylene nanocomposites reinforced with exfoliated graphene. *Fibers and Polymers*, 13(4), 507–514. <https://doi.org/10.1007/s12221-012-0507-z>
- BLANCO, S. C., Macías, E. J., Fernández, J. B., Pérez, M., Parte, D., Cámara, E. M., & Muro, J. C. S. (2015). MODELOS PARA CARACTERIZACIÓN DE NANOCOMPOSITES Resumen Nanomateriales y nanocomposites de modelado para determinar propiedades mecánicas en nanocomposites Modelos analíticos de rigidez en, 2–4.
- KIM, S. G., You, N. H., Lee, W., Hwang, J. Y., Kim, M. J., Hui, D., ... Lee, J. H. (2016). Effects of the functionalized graphene oxide on the oxygen barrier and mechanical properties of layer-by-layer assembled

films. *Composites Part B: Engineering*, 92, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.028>

KUILLA, T., Bhadra, S., Yao, D., Kim, N. H., Bose, S., & Lee, J. H. (2010). Recent advances in graphene based polymer composites. *Progress in Polymer Science Volume*, 35(11), 1350–1375. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.07.005>

LEE, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science*, 321(5887), 385–388. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>

LI, M., & JEONG, Y. G. (2011). Poly(ethylene terephthalate)/exfoliated graphite nanocomposites with improved thermal stability, mechanical and electrical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(5), 560–566. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.015>

MUKHOPADHYAY, P., & GUPTA, R. (2011). Trends and frontiers in graphene-based polymer nanocomposites. *Plastics Engineering*, (January), 32–43. Retrieved from [https://www.avanzare.es/test\\_g40/modulo\\_galeria\\_2.01/panel/tmp/ficha\\_110.pdf](https://www.avanzare.es/test_g40/modulo_galeria_2.01/panel/tmp/ficha_110.pdf)

NOVOSELOV, K. S. S., Geim, A. K. K., Morozov, S. V. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V. V., ... Firsov, A. A. A. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>

POTTS, J. R., Lee, S. H., Alam, T. M., An, J., Stoller, M. D., Piner, R. D., & Ruoff, R. S. (2011). Thermomechanical properties of chemically modified graphene/poly(methyl methacrylate) composites made by in situ polymerization. *Carbon*, 49(8), 2615–2623. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.02.023>

SEYYED MONFARED ZANJANI, J., Saner Okan, B., & Menciloglu, Y. (2015). Manufacturing of multilayer graphene oxide/poly(ethylene terephthalate) nanocomposites with tunable crystallinity, chain orientations and thermal transitions. *Materials Chemistry and Physics*, 176, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.03.020>

SZYMCZYK, A., Paszkiewicz, S., Pawelec, I., Lisiecki, S. B., Jotko, M., Špitalský, Z., ... B, Z. R. (2015). Oxygen Barrier Properties and Melt Crystallization Behavior of Poly (ethylene terephthalate) / Graphene Oxide Nanocomposites, 2015.

WAN, Y.-J., Gong, L.-X., Tang, L.-C., Wu, L.-B., & Jiang, J.-X. (2014). Mechanical properties of epoxy composites filled with silane-functionalized graphene oxide. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.023>

D. HULL AND T.W. CLYNE, 1996, *An Introduction to composite Materials*, second edition, Cambridge University Press, Cambridge

WANG S, Zhang Y, Abidi N, Cabrales L., *Langmuir*. 2009 Sep 15;25(18):11078-81. doi: 10.1021/la901402f.

Phaedon Avouris, Christos Dimitrakopoulos, (2012), *Materials Today* 15(3), 86-97

JANG-KYO K., Yiu-Wing, M., “Engineered interfaces in fiber reinforced composites”, 1st ed., pp 1, 1998

MUKHOPADHYAY P., PLASTICS ENGINEERING, JANUARY 2011, 32-42

ALVAREZ, C. A., V. M. Castaño, R. Avilés, R. López, T. Castrejón, U. Aguilar, *CIENCIA*, 46, 1-4 (1995)

SALGADO-DELGADO, R., Vazquez, S.R., Alvarez-Castillo, A., Licea-Claverie, A., Castaño, V.M. 2005 *Materials Technology* 20 (1), pp. 26-29

LÓPEZ, R., POBLANO, V.M., Licea-Claverie, A., Avalos, M., Alvarez-Castillo, A., Castaño, V.M. 2000 *Advanced Composite Materials*, 9 (2), pp. 99-108

GARCÍA-HERNÁNDEZ, E., Licea-Claverie, A., Zizumbo, A., Alvarez-Castillo, A., Herrera-Franco, P.J. 2004 *Polymer Composites* 25 (2), pp. 134-145

H.J. CARRILLO-ESCALANTE, A. Álvarez-Castillo, A. Valadez-González, P. J. Herrera-Franco, *Carbon Letters*, 19, 47-56 (2016).

PHIRI J., *Materials Science and Engineering: B*, Volume 215, January 2017, Pages 9-28;

MUKHOPADHYAY, P., & Gupta, R. (2011). Trends and frontiers in graphene-based polymer nanocomposites. *Plastics Engineering*, (January), 32–43. Retrieved from [http://www.avanzare.es/test\\_g40/modulo\\_galeria\\_2.01/panel/tmp/ficha\\_110.pdf](http://www.avanzare.es/test_g40/modulo_galeria_2.01/panel/tmp/ficha_110.pdf)

BLANCO, S. C., Macías, E. J., Fernández, J. B., Pérez, M., Parte, D., Cámara, E. M., & Muro, J. C. S. (2015). MODELOS PARA CARACTERIZACIÓN DE NANOCOMPOSITES Resumen Nanomateriales y nanocomposites de modelado para determinar propiedades mecánicas en nanocomposites Modelos analíticos de rigidez en, 2–4.