

Rheological properties of carbon nanotubes as additive in a lubricating fluid

Jesús Antonio Carlos Cornelio^a, Paula Andrea Cuervo-Velásquez^b, María Isabel Ardila^c, William Orozco-Murillo^c,
Luis Felipe Jaramillo-Zuluaga^b, Lina Marcela Hoyos-Palacio^d, Javier Lara-Romero^a & Alejandro Toro^b

^a Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México jacarlosc@unal.edu.co,
jlara_romero@hotmail.com

^b Grupo de Tribología y Superficies, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia pacuervo@unal.edu.co, lufjaramillozu@unal.edu.co,
aotoro@unal.edu.co

^c Grupo de Mantenimiento y Materiales, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia
isabel.ardila@pascualbravo.edu.co, william.orozco@pascualbravo.edu.co

^d Grupo de Dinámica Cardiovascular, Facultad de Medicina, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia lina.hoyos@upb.edu.co

Received: December 23th, 2015. Received in revised form: July 20th, 2016. Accepted: August 21th, 2016.

Abstract

The rheological properties of polyalphaolefin lubricant oil with the addition of multi-walled and single-walled carbon nanotubes were studied. The rheological tests were performed by varying the viscosity as a function of temperature, load and shear rate of mixtures with carbon nanotubes concentrations of 0.01 and 0.05 wt.%. The effect of the addition of carbon nanotubes on the wettability of the lubricant was also evaluated. The results showed that the addition of carbon nanotubes at the concentrations tested led to a variation in viscosity with respect to temperature. Shear stress showed significant increase with respect to strain rate and reached maximum values when the concentration of CNT was 0.05 wt % for both single-walled and multi-walled cases.

Keywords: Viscosity; Shear stress; Carbon nanotubes; Polyalphaolefin.

Propiedades reológicas de nanotubos de carbono como aditivo en un fluido lubricante

Resumen

Se estudiaron las propiedades reológicas de un aceite lubricante base polialfaolefina (PAO) al que se agregaron nanotubos de carbono (NTC) monocapa y multicapa como aditivos. Los ensayos reológicos realizados apuntaron a estudiar la variación de la viscosidad en función de la temperatura, la carga y la tasa de cizallamiento para mezclas con contenidos de nanotubos de carbono de 0.01% y 0.05% en peso. Adicionalmente, se evaluó la mojabilidad del PAO con y sin la adición de los nanotubos de carbono. Los resultados mostraron que la adición de los nanotubos de carbono a las concentraciones ensayadas lleva a una variación de la viscosidad con respecto a las temperaturas probadas. Fue observado un incremento significativo del esfuerzo de corte con respecto a la tasa de deformación, y tanto para el caso de monocapa como de multicapa dicho esfuerzo presentó tendencia a aumentar cuando la concentración de NTC fue de 0.05%.

Palabras clave: Viscosidad; Esfuerzo cortante; Nanotubos de carbono; Polialfaolefina.

1. Introducción

Los nanotubos de carbono (NTC), tanto monocapa como multicapa, han atraído un enorme interés desde su descubrimiento debido a sus propiedades electrónicas y mecánicas [1]. Se ha

reportado que los NTC son excepcionalmente resistentes y rígidos, sin embargo, notablemente flexibles a la vez. [2]. En otros términos, los nanotubos pueden funcionar como resortes extremadamente firmes ante pequeños esfuerzos y, frente a cargas muy altas, pueden deformarse drásticamente y volver

How to cite: Carlos-Cornelio, J. A., Cuervo-Velásquez, P. A., Ardila, M. I., Orozco-Murillo, O. M., Jaramillo-Zuluaga, L. F., Hoyos-Palacio, L. M., Lara-Romero, J. & Toro, A. Propiedades reológicas de nanotubos de carbono como aditivo en un fluido lubricante DYNA 83 (

posteriormente a su forma original. Diversos estudios han tratado de medir las propiedades mecánicas y la tensión máxima soportada por un nanotubo de carbono, con resultados heterogéneos, si bien se podría asumir de manera general que la tensión máxima de rotura podría rondar los 150 GPa [3, 4]. Estas propiedades los convierten en excelentes aditivos para eventualmente mejorar las propiedades mecánicas, electrónicas, tribológicas, térmicas o reológicas de un fluido [2].

La posibilidad de dispersión de los nanotubos de carbono los convierte en candidatos prometedores para fluidos debido a sus propiedades. Sin embargo se necesitan métodos de mezcla mecánicos para producir dispersiones de nanotubos de carbono que sean homogéneas y estables durante largos períodos de tiempo [5]. Los factores que afectan a la reología de dispersiones de nanotubos incluyen la química de la fase continua (el líquido base), la cantidad de nanotubos en todo el volumen de fluido, la relación de aspecto y la química de superficie promedio de los nanotubos (métodos de dispersión mecánica y tratamiento químico) [6,7]. La temperatura influye en las propiedades reológicas de los fluidos de base, pero también puede afectar a la estabilidad de las dispersiones de nanotubos ya sea a través de cambios en la conformación dispersante en el líquido o a través de cambios en las interacciones entre el dispersante y la superficie sólida de los nanotubos de carbono [5]. Por lo tanto, las propiedades reológicas de dispersiones de nanotubos de carbono son muy importantes para su aplicación en sistemas prácticos.

En este trabajo se evaluaron las propiedades reológicas de un aceite lubricante PAO (Polialfaolefina) aditivado con nanotubos de carbono (SWCNT [nanotubos de carbono monocapa] y MWCNT [nanotubos de carbono multicapa]) en concentraciones de 0.01% y 0.05% en peso. Los nanotubos de carbono fueron purificados y funcionalizados por modificación química para mejorar su estado de dispersión en la base lubricante PAO, y los ensayos reológicos se realizaron variando la temperatura y la tasa de cizallamiento. Adicionalmente se estudió el efecto de los nanotubos de carbono en la mojabilidad del PAO.

2. Materiales y métodos

2.1. Síntesis de nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono fueron sintetizados por deposición química de vapor (CVD). Se usó un tubo de cuarzo como sustrato para el crecimiento de los nanotubos y un horno equipado con un controlador de temperatura permitiendo alcanzar la temperatura de reacción requerida ($700^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). Como fuente de carbono se utilizó acetileno; el catalizador usado para la producción de nanotubos de carbono multicapa (MWCNT) fue níquel y para los nanotubos de carbono monocapa (SWCNT) fue cobalto, la mezcla de gas estuvo compuesta de 80 cc/min de nitrógeno, 20 cc/min acetileno y 15 cc/min de hidrógeno. La secuencia de procesamiento incluyó el tiempo de reducción de 20 min, tiempo de acetileno 20 minutos y el tiempo de enfriamiento de 60 minutos.

2.2. Purificación y funcionalización de los nanotubos de carbono

Para la purificación donde se eliminan los restos de

catalizador se empleó un método basado en el lavado repetido de la muestra con diferentes ácidos. El proceso está compuesto por tres pasos; dos en la purificación y uno en la funcionalización. El primer componente que se elimina de la muestra es la sílice, que actúa como soporte de las partículas catalizadoras. Para este paso es agregado HF al 2% en volumen, y la solución es sometida a agitación por 30 min (paso 1). Posteriormente se lava varias veces para eliminar por completo el HF y se adiciona HCl en una concentración 2M (paso 2). Se agita por 30 min y nuevamente la muestra es lavada varias veces para ser sometida a un tratamiento de secado a 80°C en ambiente de O_2 en aire en un horno convencional por una hora, finalmente la muestra se pasa a un desecador completamente sellado por 24 horas [8].

El método para la funcionalización de los nanotubos de carbono está basado en la investigación de Matthew W. Marshall y colaboradores del 2006 [9], quienes propusieron un método simple de funcionalización con ácido carboxílico. Se utilizó 1 ml de solución 3:1 (V/V) de H_2SO_4 y HNO_3 por cada 2 mg de nanotubos, esto se sometió a agitación ultrasónica por 20 minutos en agua a 20°C (paso 3) utilizando hielo para control de la temperatura, evitando el rompimiento de los nanotubos para mantener su longitud original (Fig. 1). Después del tratamiento anterior el material fue lavado en agua desionizada limpiando el excedente de ácidos hasta llegar un pH de alrededor de 5. El material posteriormente se secó en horno sellado a 60°C .

Los nanotubos de carbono obtenidos (SWCNT y MWCNT) fueron caracterizados por SEM mediante el uso de equipos JEOL JSM-6490 LV y FEI Nova NanoSEM 200, espectroscopia RAMAN usando un espectrómetro Raman confocal marca Horiba Jobin Yvon, Modelo Labram HR de alta resolución con una distancia focal de 800 mm, Laser spot size de 1 a 300 μm , detector CCD con resolución de 1024×256 píxeles, rango espectral optimizado de 400-1100 nm y rejillas de difracción de 1800 y 600 líneas/m. Para el análisis FTIR se usó un equipo Marca Perkin Elmer modelo Spectrum one, detector DTGS con una resolución de 4 cm^{-1} y un rango de número de onda de 450 a 4000 cm^{-1} .

2.3. Dispersión de nanotubos de carbono en PAO

Para la preparación de las soluciones se usó como fluido lubricante una Polialfaolefina (PAO) S4 GX 320 (P&G Colombia). Se midieron 20 ml de PAO y se le agregó 0.01% y 0.05% en peso de MWCNTs y SWCNTs respectivamente. Para obtener una mezcla homogénea de las soluciones preparadas y que los nanotubos se dispersaran bien en el PAO, las soluciones se sometieron a 30 min de agitación mecánica seguidos de agitación ultrasónica durante 5 min.

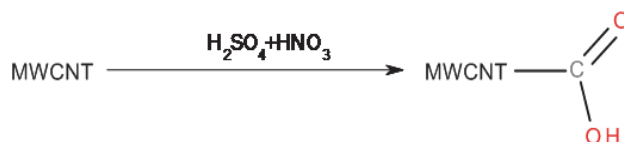


Figura 1. Mecanismo de funcionalización con ácido carboxílico. Fuente: Adaptado de [9]

En general, la homogeneidad y estabilidad de la dispersión son mayores cuando el tamaño de las nanopartículas es pequeño, por ejemplo por debajo de 100 nm. En el caso de los nanotubos, el problema de la dispersión es más complejo y no hay relaciones simples para expresar las diversas tendencias. Generalmente los nanotubos se entremezclan y tienden a formar haces, lo que dificulta la dispersión [10]. La longitud de los nanotubos es sin duda un parámetro crucial, sin embargo realizando una buena funcionalización con grupos carboxilos se puede lograr que se dispersen en la base lubricante. Aunado a esto, proporcionando una buena agitación mecánica y ultrasónica se puede garantizar que las nanotubos se queden suspendidos en el PAO y no se sedimenten.

2.4. Ensayos reológicos

La caracterización reológica de las soluciones se llevó a cabo en un viscosímetro Brookfield LVDV-II+Pro con baño de temperatura e interfaz bi-direccional RS-232PC y el software Rheocalc®. El equipo tiene la capacidad de realizar ensayos con velocidad variable de 0.01 a 200 rpm, un rango de temperatura de prueba de 0°C a 100°C y una velocidad de cizalla máxima de 57s⁻¹ a 200 RPM y poder de resolución de 1% del valor de viscosidad medido.

Los ensayos de rampa de velocidad controlada se realizaron con un husillo LV SC4-16 de tal manera que la velocidad de rotación del husillo incrementaba las revoluciones por minuto (rpm) cada 30 segundos, y se registraron los cambios de viscosidad para determinar el comportamiento newtoniano o no newtoniano de los lubricantes estudiados. El efecto de la temperatura sobre la viscosidad también se midió mediante la realización de pruebas en el rango de entre 0°C y 100°C con una velocidad de cizalla fija de 30s⁻¹. Finalmente, los lubricantes se ensayaron a una velocidad de cizalla específica de 30s⁻¹ durante 1200 segundos con el fin de observar cualquier cambio en la viscosidad respecto al tiempo.

El ángulo de contacto se midió utilizando un dispositivo Dataphysics OCA Number 15 series con una jeringa con capacidad de 1 ml para aplicar una gota en la superficie de la muestra. La superficie usada para los ensayos de mojabilidad fue una sección de riel de ferrocarril fabricado en acero al carbono de 5x8x14 cm, cuya rugosidad superficial fue caracterizada usando un dispositivo Mitutoyo SJ-201. Se realizaron ensayos a las muestras preparadas con nanotubos de carbono, así como al aceite base como punto de referencia.

3. Resultados y discusión

3.1. Microestructura de los nanotubos de carbono

En la Fig. 2 se muestra el aspecto de los nanotubos de carbono obtenidos. Las Figs. 2a y 2c muestran los nanotubos antes del proceso de purificación, mientras que las Figs. 2b y 2d presentan las muestras purificadas. Puede notarse que la purificación remueve de manera eficiente los residuos del catalizador así como los restos de sílice en las muestras obtenidas con níquel como catalizador, pero el proceso no es tan exitoso en las muestras fabricadas usando cobalto.

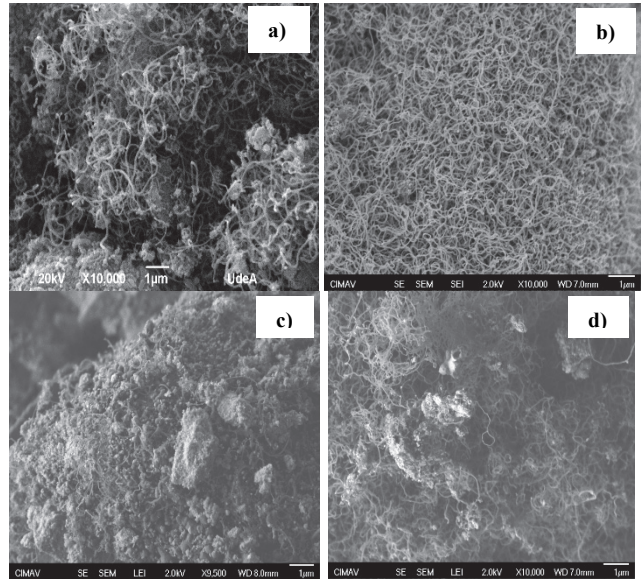


Figura 2. Imágenes SEM de los nanotubos de carbono obtenidos. a) MWCNT sintetizados, b) MWCNT purificados, c) SWCNT sintetizados, d) SWCNT purificados.

Fuente: Autores

La Fig. 3 muestra el aspecto de nanotubos de carbono monocapa (a) y multicapa (b) observados en TEM. Se puede observar que en el caso de monocapa el número de capas es menor a 10, mientras que en los multicapa el número de capas es del orden de 35. La Fig. 3c muestra un ejemplo de mediciones en una muestra de multicapa en el que el diámetro exterior es de aproximadamente 34.31 nm y el diámetro interno es alrededor de 7.45 nm, con una separación media entre nanotubos de aproximadamente 0,34 nm (que corresponde a la separación entre láminas de grafeno en la distancia de grafito).

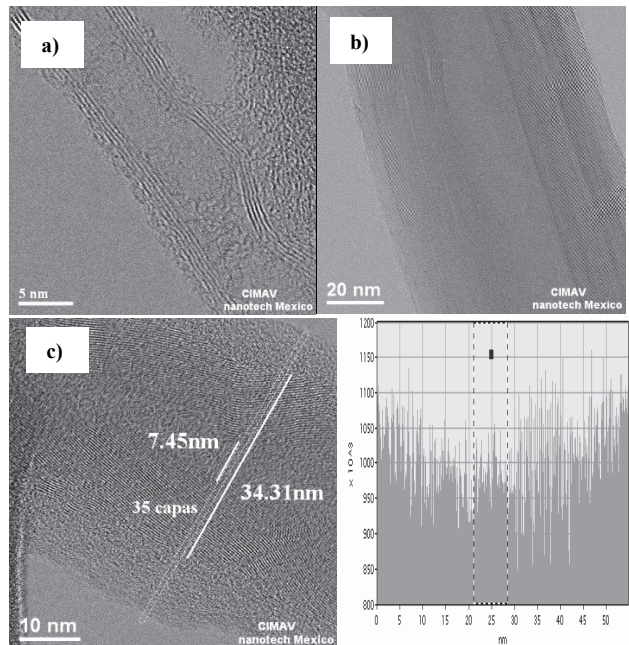


Figura 3. Imágenes TEM de los nanotubos de carbono. a) NTC monocapa, b) NTC multicapa, c) imagen TEM que muestra un análisis del diámetro y el esquema perfiles de que muestra el número de capas de nanotubos de carbono.

Fuente: Autores

En la Fig. 4 se observan espectros Raman para los nanotubos de carbono con sus relaciones de las bandas D, G y G' para cada etapa. La Fig. 4a muestra la relación de banda para nanotubos monocapa; la relación D y G (I_D/I_G) en los nanotubos sintetizados es de 0.52 y disminuye hasta 0.48. Para los multicapa (Fig. 4b) en los sintetizados es de 0.51 y disminuye a 0.48, esto para cada etapa del tratamiento de ácidos donde se puede observar que ya no hay un cambio significativo. Este cambio indica que al eliminar el cobalto y el níquel de la estructura de los NTC las capas se reacomodan generando un aumento en la cristalinidad de los NTC [11].

La relación de las bandas G y G' ($I_{G'}/I_G$) es un indicativo de la rugosidad en la superficie de los NTC, es decir, del ordenamiento alineado de las paredes de los NTC desde la superficie al interior [11,12]. Para los NTC sintetizados el valor es de 1.69 mientras que en los purificados y funcionalizados oscila entre 1.67-1.68. Esta ligera disminución se asocia a un reacomodo del nivel de alineamiento que logran tener las paredes de los NTC ya sea por el retiro de partículas de cobalto o níquel de la superficie de los NTC y/o por el efecto térmico del calentamiento durante cada paso [11].

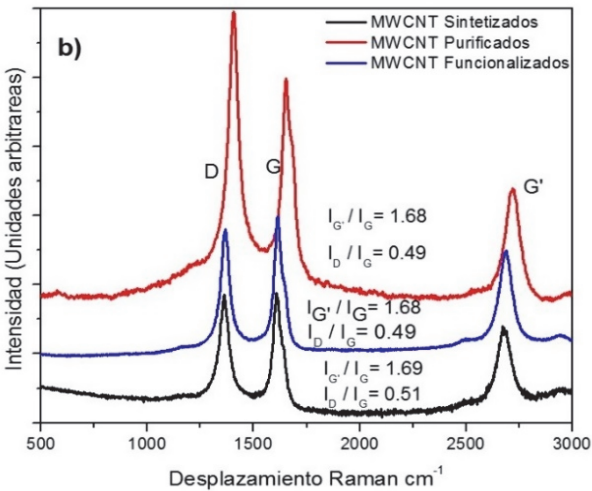
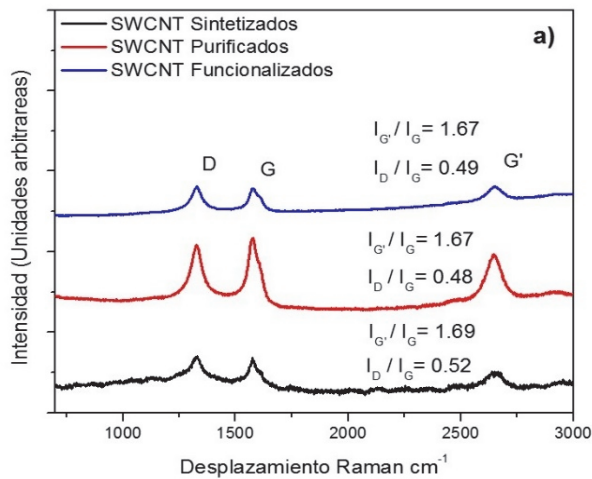


Figura 4. Análisis de espectroscopia Raman para los nanotubos obtenidos a) Nanotubos de carbono monocapa b) Nanotubos de carbono multicapa. Fuente: Autores

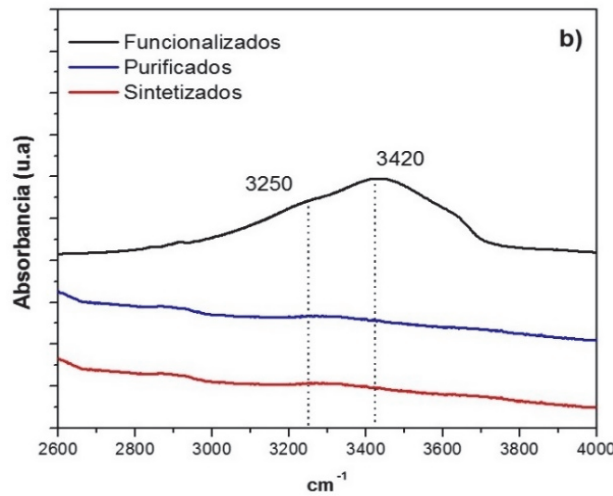
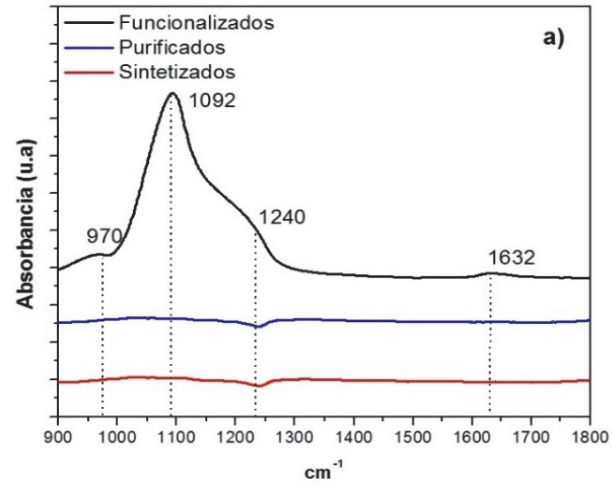


Figura 5. Secciones del espectro IR de los NTC en las condiciones de sintetizados, purificados y funcionalizados, a) sección 1 (de 900 a 1800 cm^{-1}) y b) sección 2 (de 2600 a 4000 cm^{-1}). Fuente: Autores

El análisis mediante FTIR se presenta en dos secciones para tener una mejor visualización de las señales detectadas. La primera sección comprende el intervalo de longitudes de onda de 900 a 1800 cm^{-1} (Fig. 5a) y la segunda sección se localiza entre 2600 y 4000 cm^{-1} (Fig. 5b).

En ambas secciones se observa que los NTC sintetizados y NTC purificados obtenidos al realizar los pasos 1 y 2 del tratamiento con ácidos no producen ninguna señal relacionada con la presencia de algún grupo funcional orgánico (Ver sección 2.2). Por el contrario, los NTC funcionalizados obtenidos al realizar el paso 3 del tratamiento con ácidos generan señales que pueden ser asociadas a la formación de grupos orgánicos sobre los NTC. En la sección 1 se detectan señales a las siguientes longitudes de onda: 970, 1092, 1240 y 1632 cm^{-1} , las cuales corresponden a la formación de dímeros carboxílicos que interactúan entre sí por puentes de hidrógeno. En la sección 2 se detectan señales localizadas a 3250 y 3420 cm^{-1} que corresponden al estiramiento de grupos hidroxilo asociados a los grupos carboxílicos que interactúan por puentes de hidrógeno [13].

3.2. Comportamiento reológico de la mezcla PAO-NTC

3.2.1. Efecto de la velocidad de cizallamiento

En la Fig. 6 se observa el comportamiento de la viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla para tres temperaturas: 25°C, 40°C y 100°C. En general, para las temperaturas de 25°C y 40°C la viscosidad aumentó con la velocidad de cizalla tanto para las muestras aditivadas con NTC como con las de PAO sin aditivos, lo cual indica un comportamiento dilatante (*shear thickening*) en ambos casos. Sin embargo, para bajas velocidades de cizalla se observó una caída en la viscosidad para el PAO aditivado con 0.05% tanto para monocapa como multicapa, y un aumento para la concentración menor de NTC. Cuando la velocidad de cizalla aumenta ($>20s^{-1}$) todas las soluciones de PAO-NTC manifiestan la tendencia dilatante pero tienen una viscosidad del orden de 20 cP menor con respecto al PAO. A la temperatura de 40°C el PAO-MWCNT 0.01% presenta rasgos de pseudoplasticidad (*shear thinning*) y a partir de una velocidad de cizalla de $30s^{-1}$ tiende a ser un fluido newtoniano (ver Fig. 6b). Para la temperatura de 100°C y por encima de una velocidad de cizalla de $20s^{-1}$ todos los aceites exhibieron un comportamiento Newtoniano. A esta misma temperatura, para velocidades de cizalla muy bajas el PAO aditivado en la mayoría de los casos presentó un comportamiento dilatante, siendo que sólo el PAO-SWCNT 0.05% mostró una tendencia a ser pseudoplástico.

Los resultados con respecto a otros estudios donde se evaluaron nanotubos multicapa (MWCNT) con porcentajes de 0.3% y 1% [14,15] muestran que la viscosidad no cambia significativamente con la velocidad de cizalla al estar en una condición de temperatura del fluido de 25°C, sin embargo cuando la concentración de nanotubos está por debajo de 0.3%, comparando los resultados obtenidos a concentraciones más bajas se observa un cambio importante en la viscosidad con respecto al PAO sin aditivar.

En la literatura se encuentran resultados de viscosidad-velocidad de cizalla a temperaturas por encima de 25°C cuando la concentración de MWCNT es alta. Echandía y colaboradores [14] encontraron, por ejemplo, que a 55°C la viscosidad alcanza valores mayores que el lubricante no aditivado pero la mezcla tiene un comportamiento pseudoplástico. Para el caso de las concentraciones bajas utilizadas en este trabajo, se encontró que a 40°C la mezcla con la concentración de 0.05% de NTC tiene una viscosidad aproximada a la del PAO no aditivado y su comportamiento es dilatante, mientras que a la concentración de 0.01% la viscosidad aumenta para bajas velocidades de cizalla y a altas velocidades de cizalla se aproxima a la del PAO mostrando un comportamiento pseudoplástico. En general, el comportamiento del fluido al variar la velocidad de cizalla (dilatante, pseudoplástico y/o newtoniano) sufre cambios de gran magnitud en función de la concentración de NTC y naturalmente depende de la temperatura en la que se realice la prueba de viscosidad-velocidad de cizalla.

Echandía y colaboradores señalan que la variación de viscosidad con respecto a la velocidad de cizalla se debe a que la temperatura ayuda a dispersar los nanotubos y a las cantidades representativas de partículas en una fase continua,

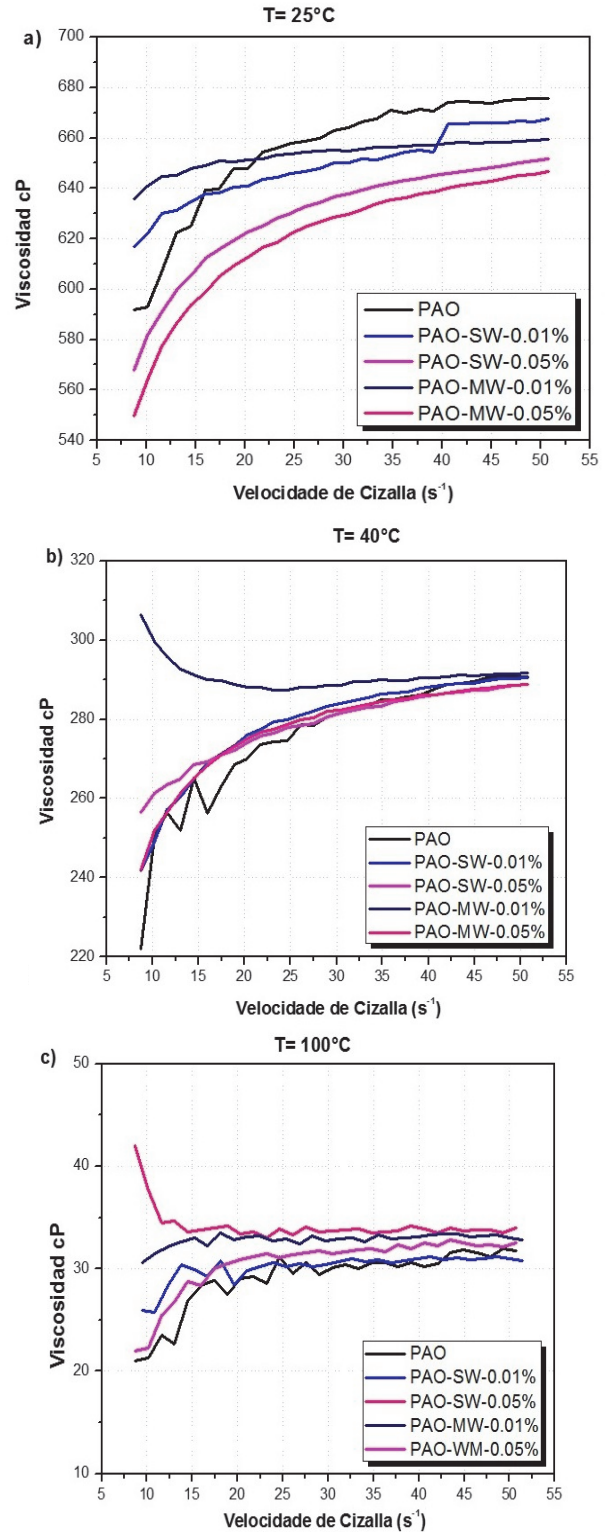


Figura 6. Viscosidad vs. Velocidad de cizalla para PAO. a) T=25°C, b) T=40°C, c) T=100°C.

Fuente: Autores

ya que se requiere una mayor energía cuando hay una mayor cantidad de partículas en el fluido [14]. En el presente trabajo este resultado se pone en contexto al realizar análisis de

mezclas con concentraciones de NTC bajas, para las cuales se evidenció que la dependencia de la viscosidad con la velocidad de cizalla es menos relevante en la medida en que la concentración de NTC se va haciendo más baja.

3.2.2. Efecto de la temperatura

La Fig. 7 muestra la variación de la viscosidad de los lubricantes con la temperatura. Puede notarse que los resultados obtenidos para el aceite no aditivado coinciden con el valor de la ficha técnica, correspondiente a un lubricante de base sintética PAO. Además, se observa que el PAO aditivado con nanotubos presenta una tendencia muy similar a la del aceite base, de manera que se puede decir que los nanotubos no modifican la respuesta del lubricante hasta una temperatura de aproximadamente 60°C. A temperaturas mayores se observa que hay un ligero incremento de la viscosidad respecto al PAO, las razones para este comportamiento pueden en principio atribuirse a las propiedades térmicas de los nanotubos, pero para ser concluyente a este respecto es necesario adelantar pruebas específicas que se encuentran en ejecución y escapan al propósito de este trabajo.

3.2.3. Efecto del tiempo de ensayo

En la Fig. 8 se observan los resultados de la variación de la viscosidad con respecto al tiempo para una velocidad de cizalla fija de 30s⁻¹. Al igual que el PAO no aditivado, la mayoría de las mezclas PAO-NTC presentaron un comportamiento independiente del tiempo. Sólo al inicio de las pruebas se observó una variación, especialmente en las mediciones a 25°C y 40°C, la cual se atribuyó principalmente a acomodación del equipo utilizado en los ensayos.

3.2.4. Mojabilidad (Ángulo de contacto)

La Fig. 9 muestra la variación del ángulo de contacto respecto al tiempo. En términos generales se puede observar que la adición de nanotubos de carbono tiene un efecto poco significativo en el ángulo de contacto del PAO. Sin embargo, puede decirse que existe una pequeña tendencia del ángulo

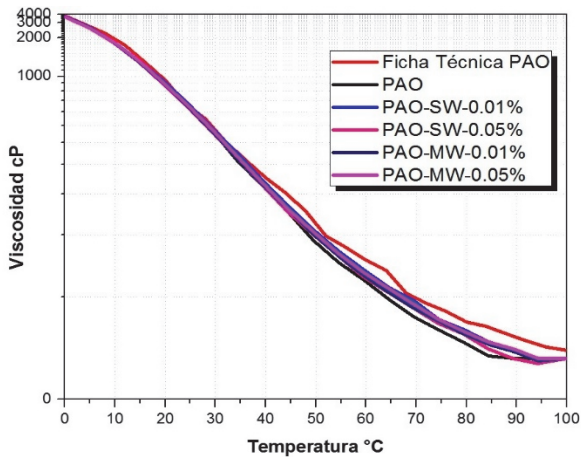


Figura 7. Viscosidad vs. Temperatura para PAO. Velocidad de cizalla 30 s⁻¹
Fuente: Autores

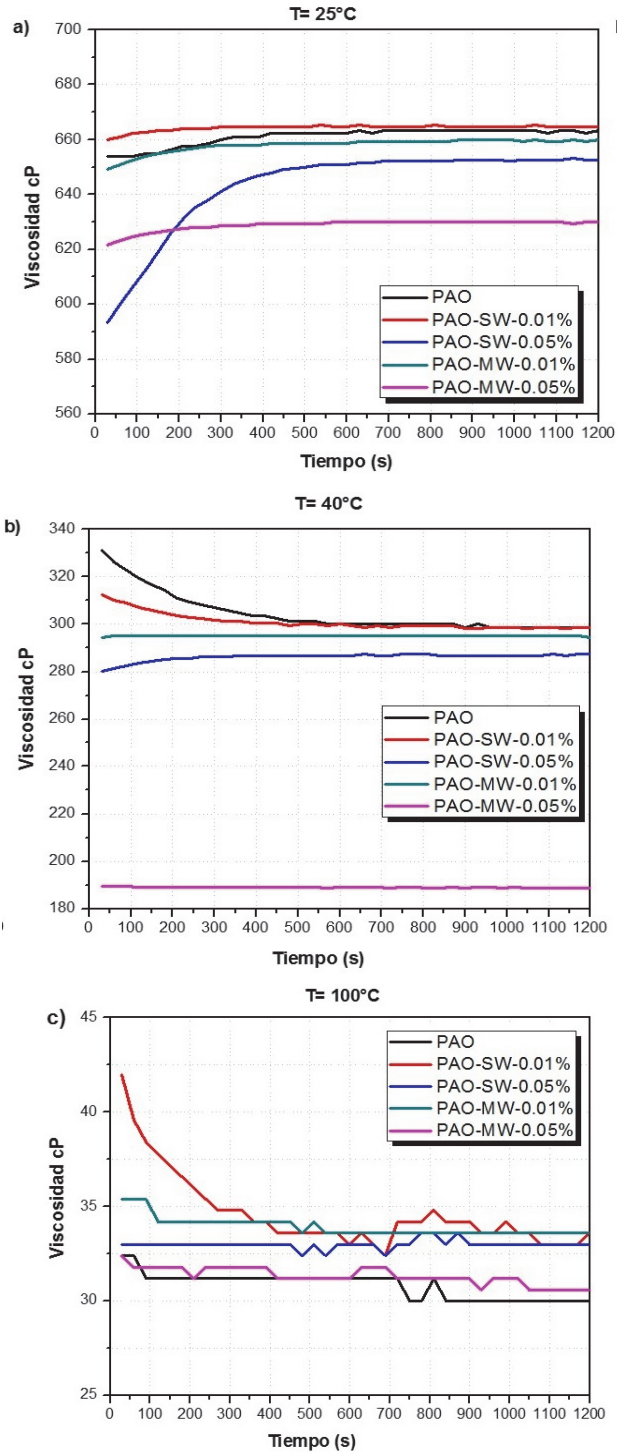


Figura 8. Viscosidad vs. Tiempo para PAO. Velocidad de cizalla 30 s⁻¹
Fuente: Autores

de contacto a disminuir con nanotubos de carbono monocapa, mientras que cuando se usan nanotubos multicapa el ángulo de contacto se incrementa respecto al PAO.

La Tabla 1 muestra el tiempo que requiere la gota para poder estabilizarse así como el ángulo de contacto promedio. Comparando el tiempo de estabilidad de la gota cuando se

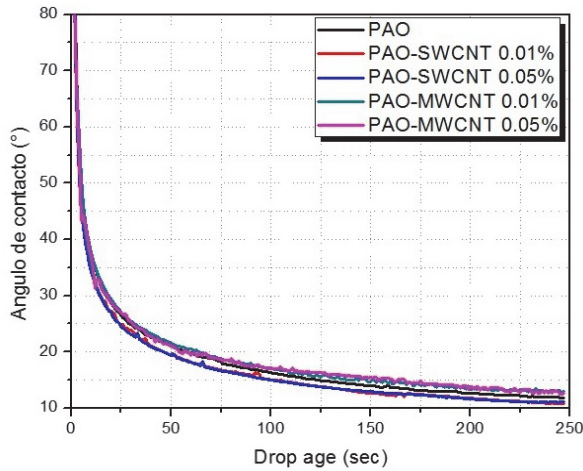


Figura 9. Ángulo de contacto para el Pao y PAO-NTC
Fuente: Autores

Tabla 1. Tiempo de estabilidad y ángulo de contacto para PAO y PAO-NTC

Muestra	Tiempo de estabilidad (s)	Ángulo de contacto (°)
PAO	30	11
PAO-SWCNT 0.01%	28	10.5
PAO-SWCNT 0.05%	28	10.5
PAO-MWCNT 0.01%	35	13
PAO-MWCNT 0.05%	35	13

Fuente: Autores

usan nanotubos de carbono monocapa estos requieren un menor tiempo de estabilidad y por lo tanto el ángulo de contacto disminuye con respecto al PAO. Cuando se usan nanotubos de carbono multicapa el tiempo de estabilidad de la gota aumenta así como el ángulo de contacto con respecto al PAO.

Se ha reportado en la literatura que la modificación del comportamiento del PAO y la incorporación de nanotubos de carbono monocapa y multicapa, puede estar relacionado debido al peso y la densidad que presentan los nanotubos de carbono monocapa respecto a los multicapa, en la cual puede influir el número de paredes, así como el diámetro interno y externo de los nanotubos de carbono usados [16].

4. Conclusiones

En este estudio se evaluaron las propiedades reológicas de nanotubos de carbono como aditivo en un aceite lubricante base Polialfaolefina (PAO). Se logró obtener nanotubos monocapa y multicapa por medio del método CVD así como su purificación y funcionalización con los grupos funcionales necesarios para que se dispersen en el PAO.

Los resultados indican que las concentraciones de NTC utilizadas condujeron a cambios en la respuesta del lubricante con la velocidad de cizallamiento, dependiendo del tipo de nanotubo usado como aditivo. Por otro lado, no se observaron

efectos significativos de la adición de nanotubos en la respuesta del lubricante con la temperatura.

Al igual que el PAO sin NTC, la mayoría de las mezclas PAO-NTC presentan un comportamiento independiente del tiempo. La modificación del PAO con NTC aumenta de resistencia al corte del lubricante, lo que podría ser significativo frente al desgaste y al coeficiente de fricción. Aunque los cambios son de pequeña magnitud, se observó que la mojabilidad del PAO aumenta con NTC multicapa y disminuye con NTC monocapa.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Institución Universitaria Pascual Bravo mediante el financiamiento del proyecto “Evaluación tribológica de un lubricante modificado con nanotubos de carbono para aplicación en sistemas rodantes-deslizantes” número de proyecto IN201404. Igualmente a la empresa P&G Colombia por el suministro del PAO y a la Universidad Pontificia Bolivariana por el acceso a la infraestructura para obtención de los NTC.

Referencias

- [1] [1] Arai, S., Fujimori, A., Murai, M. and Endo, M., Excellent solid lubrication of electrodeposited nickel-multiwalled carbon nanotube composite films. *Materials Letters*, 62(20), pp. 3545-3548, 2008. DOI: 10.1016/j.matlet.2008.03.047
- [2] [2] Wang, B., Wang, X., Lou, W. and Hao, J., Rheological and tribological properties of ionic liquid-based nanofluids containing functionalized multi-walled carbon nanotubes. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(19), pp. 8749-8754, 2010. DOI: 10.1021/jp1005346
- [3] [3] Sánchez-Carrillo, A., Resistencia al rayado de nanocomposites de poliestireno reforzados con nanotubos de carbono modificados. Tesis, de Grado en Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia, 2013, 176 P.
- [4] [4] Abdel-Goad, M. and Pötschke, P., Rheological characterization of melt processed polycarbonate-multiwalled carbon nanotube composites. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 128(1), pp. 2-6, 2005. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2005.01.008
- [5] [5] Yang, Y., Grulke, E. A., Zhang, Z. G. and Wu, G., Temperature effects on the rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 298(3), pp. 216-224, 2007. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.10.065
- [6] [6] Xu, J., Chatterjee, S., Koelling, K.W., Wang, Y. and Bechtel, S.E., Shear and extensional rheology of carbon nanofiber suspensions. *Rheologica Acta*, 44(6), pp. 537-562, 2005. DOI: 10.1007/s00397-005-0436-5
- [7] [7] Kim, B., Park, H. and Sigmund, W.M., Rheological behavior of multiwall carbon nanotubes with polyelectrolyte dispersants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 256(2), pp. 123-127, 2005. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2004.12.063
- [8] [8] García, A., Obtención y caracterización teórica y experimental de nanotubos de carbono dopados con diferentes elementos. Tesis Doctorado en Materiales. Centro de Investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional: Santiago de Querétaro, México, 2010, 230 P.
- [9] [9] Marshall, M.W., Popa-Nita, S. and Shapter, J.G. Measurement of functionalised carbon nanotube carboxylic acid groups using a simple chemical process. *Carbon*, 44(7), pp. 1137-1141, 2006. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.11.010
- [10] [10] Martin, J. M. and Ohmae, N., *Nanolubricants*, 13. John Wiley & Sons 2008. DOI: 10.1002/9780470987711

- [11] [11]López, J., Síntesis de nanopartículas metálicas de Ce y Zr soportadas sobre nanotubos de carbono y su aplicación en la adsorción de colorantes sintéticos. Tesis de Doctorado en Ingeniería Química. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, 2014, 135 P.
- [12] [12]Dresselhaus, M.S., Dresselhaus, G., Saito, R. and Jorio, A. Raman spectroscopy of carbon nanotubes. Physics reports, 409(2), pp. 47-99, 2005. DOI: 10.1016/j.physrep.2004.10.006
- [13] [13] Lambert, J.B., Shurvell, H.F., Lightner, D.A. and Cooks, R.G. Introduction to organic spectroscopy. Macmillan Publishing Company, 1987.
- [14] [14] Echandía, L., Mejía, S., Osorio, D. y Rojas, N., Efecto reológico de la agregación de nanopartículas a fluidos lubricantes. Revista Colombiana de Materiales, [En línea]. (5), pp. 100-106, 2014. Disponible en: <http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/articulo/view/19437/16599>
- [15] [15]Sánchez, M.C., Berjano, M., Guerrero, A. y Gallegos, C., Evolución de las propiedades reológicas de emulsiones aceite vegetal en agua durante el proceso de emulsificación y almacenamiento. Grasas y aceites, [En línea]. 51(4), pp. 230-238, 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Antonio_Guerrero2/publication/26523687_Evolucion_de_las_propiedades_reologicas_de_emulsiones_aceite_vegetal_en_agua_durante_el_proceso_de_emulsificacin_y_almacenamiento/links/0912f50cc3feab2b82000000.pdf
- [16] [16]Laurent, C., Flahaut, E. and Peigney, A., The weight and density of carbon nanotubes versus the number of walls and diameter. Carbon, 48(10), pp. 2994-2996 2010. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.04.010

L.F. Jaramillo, es estudiante de Ingeniería Química de la Universidad Nacional sede Medellín. Desde el 2014 pertenece al grupo de Tribología y Superficies de la Facultad de Minas de esta misma universidad. Actualmente cursa el sexto semestre.
ORCID: 0000-0003-1649-2399

L.M. Hoyos-Palacio, es Ing. Química en 2005, de la Universidad Nacional de Colombia. Dra. en Ingeniería; actualmente ocupa el cargo de coordinadora de Línea de Nanotecnología y Biomateriales, del Centro de Bioingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana. Es autora de múltiples artículos en revistas indexadas y en ponencias de congresos internacionales. Es par evaluador de proyectos de Colciencias y de revistas, es directora de trabajos de pregrado y postgrado en la Universidad Pontificia Bolivariana.
ORCID: 0000-0003-2430-8504

J. Lara-Romero, es Ing. Químico en 1992, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México y Dr. en Química en 1999, de la Universidad de Wisconsin-Milwaukee, Estados Unidos. Actualmente es Profesor-Investigador adscrito a la Facultad de Ingeniería Química en la Universidad Michoacana, México. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), nivel II en México y sus áreas de interés son tribología y nano-materiales.
ORCID: 0000-0003-0216-364X

A. Toro, es Ing. Mecánico en 1997, de la Universidad Nacional de Colombia, Dr. en Ingeniería en 2001, de la Universidad de São Paulo, Brasil. Se desempeña como profesor de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín desde 2002.
ORCID: 0000-0002-5589-5820

J.A.C. Cornelio, es Ing. Químico en 2010, del Instituto Tecnológico de Villahermosa México, MSc. en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2012. Dr. en Ciencias en Ingeniería Química, Se desempeña como Investigador de la Universidad Pontificia Bolivariana, en el Centro de Bioingeniería desde el 2015.
ORCID: 0000-0003-1953-6887

P.A. Cuervo, es Ing. Mecánica en 2010, de la Universidad Nacional de Colombia, MaSc. en Ingeniería - Materiales y Procesos en 2015, de la Universidad Nacional de Colombia. Se desempeña como Investigador en el Grupo de Tribología y Superficies de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín desde 2011.
ORCID: 0000-0003-3647-2096

M.I. Ardila, es Ing. Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, Esp. Tecnológica en Gestión de Proyectos con Énfasis en Finanzas de la Institución Universitaria Pascual Bravo, y candidata a MSc en Gestión Energética Industrial del Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Actualmente ocupa el cargo de docente ocasional en la Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia; donde dirige el grupo de investigación IDEGMA.
ORCID: 0000-0002-6817-0378

W. Orozco-Murillo, es Ing. Mecánico en 1994, de la Universidad Nacional de Colombia, Esp. en Gerencia de Mantenimiento en 2000 de la Universidad de Antioquia y MSc. en Gestión Energética Industrial en 2011 del Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Es Par Académico CNA, Conferencista en temáticas de la Gestión de Mantenimiento Industrial y Hospitalaria. Decano encargado en una oportunidad del programa de Tecnología en Mantenimiento de Equipo Biomédico (ITM). Veinte (20) años de experiencia en docencia, Institución Universitaria Pascual Bravo, Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Universidad Nacional de Colombia. Un (1) año de experiencia en coordinación de prácticas empresariales (ITM). Más de diez (10) años como investigador Grupo de Investigación e Innovación Biomédica GI2B, ITM y Grupo de materiales y mantenimiento, IDEGMA, I.U Pascual Bravo, Autor de más de 10 artículos en revistas indexadas y en congresos internacionales, Asesor de Tesis de Grado en Pregrado y posgrados. En la actualidad docente auxiliar I.U Pascual Bravo.
ORCID: 0000-0003-4115-0286



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Química e Ingeniería de Petróleos

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317