

COMPUESTOS DE PTFE CON CARGAS CERÁMICAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DESEMPEÑO ANTE LA FRICCIÓN Y EL DESGASTE: UNA REVISIÓN

*PTFE COMPOSITES WITH CERAMIC FILLERS FOR OPTIMIZING
PERFORMANCE AGAINST FRICTION AND WEAR: A REVIEW*

RESUMEN

Se presenta una revisión de literatura sobre el comportamiento tribológico de compuestos de PTFE (politetrafluoroetileno) reforzados con cargas cerámicas, destacando su relevancia en aplicaciones de contacto dinámico. La tribología es la ciencia que estudia la fricción y el desgaste entre superficies en movimiento, propiedades que juegan un papel importante en diferentes industrias, como la automotriz y la aeroespacial (por mencionar algunos ejemplos), quienes buscan reducir el desgaste para prolongar la vida útil de sus componentes. Dentro de estos ensayos, el coeficiente de fricción y el índice de desgaste son parámetros clave para evaluar la eficiencia de materiales sometidos a deslizamientos continuos. Si bien, el PTFE es popular por su baja fricción, este presenta limitaciones en condiciones extremas, donde el desgaste se incrementa sustancialmente. Se ha reportado que el uso de materiales cerámicos como la wollastonita y la antigorita como cargas en composites de PTFE, mejora el comportamiento mecánico y tribológico del PTFE, aumentando su durabilidad en aplicaciones exigentes. Este artículo explora el uso de estos compuestos en sectores industriales y su potencial para optimizar componentes de alto rendimiento, abriendo camino a nuevas aplicaciones y desarrollos.

Palabras clave: composites; cerámicos; tribología; coeficiente de fricción; desgaste

JESÚS D. FLORES
OYERVIDES

LORENA FARÍAS CEPEDA

ANTONIA MARTÍNEZ
LUÉVANOS

Facultad de Ciencias
Químicas, Unidad Sureste,
UAdeC.

Correspondencia
lorenafarias@uadec.edu.mx

ABSTRACT

This literature review presents an overview of the tribological behavior of PTFE (polytetrafluoroethylene) composites reinforced with ceramic fillers, highlighting their relevance in dynamic contact applications. Tribology is the science that studies friction and wear between surfaces in motion – properties that play a key role in various industries, such as automotive and aerospace (to name a few), which aim to reduce wear to extend the lifecycle of their components. In these tests, the coefficient of friction and wear rate are essential parameters for evaluating the efficiency of materials subjected to continuous sliding. While PTFE is popular for its low friction, it has limitations under extreme conditions, where wear increases significantly. The use of ceramic materials such as wollastonite and antigorite, as fillers in PTFE composites has been reported to improve the mechanical and tribological behavior of PTFE, increasing its durability in demanding applications. This article explores the use of these composites in industrial sectors and their potential to optimize high-performance components, paving the way for new applications and developments.

Keywords: *PTFE; composites; ceramics; tribology; coefficient of friction; wear.*

INTRODUCCIÓN

La tribología desempeña un papel fundamental en la ingeniería moderna al proporcionar el conocimiento necesario para comprender y optimizar el desempeño de materiales en aplicaciones dinámicas. Su estudio permite minimizar el desgaste y aumentar la eficiencia de los sistemas mecánicos. Este trabajo analiza las propiedades tribológicas del PTFE y cómo la incorporación de materiales cerámicos mejora su rendimiento en condiciones exigentes. Derivada del término griego tribos (fricción), la tribología se centra en los fenómenos asociados con la interacción entre dos superficies en movimiento relativo, con énfasis en la fricción y el desgaste. El análisis de las propiedades tribológicas es crucial para evaluar nuevos materiales y tecnologías de superficie, ya que su comprensión es fundamental para diversas industrias, como la automotriz, aeroespacial y electrónica. Esto permite reducir el daño en los componentes, mejorar la eficiencia

y prolongar la vida útil de los sistemas mecánicos, al entender las complejas interacciones entre distintos parámetros (Bhushan, 2013; Kügler y col., 2020). A continuación, se detallan los dos principales fenómenos que ocurren cuando dos superficies se deslizan entre sí.

La fricción a través del coeficiente de fricción (μ) describe la relación entre la fuerza de fricción (F) y la fuerza normal (N) que actúa entre dos superficies en contacto, y es un valor adimensional, es decir, no tiene unidades, matemáticamente se define de acuerdo con la Figura 11. En tribología, este coeficiente es útil para calcular la fuerza necesaria para mover un objeto sobre una superficie. Sin embargo, factores como la temperatura, las propiedades de las superficies y la velocidad pueden influir en su valor (Ajimoto, 2024).

$$\mu = \frac{F}{N}$$

Figura 1. Fórmula para el cálculo del coeficiente de fricción

Existen diversas normas internacionales como las ASTM establecen las condiciones para el cálculo del coeficiente de fricción (también abreviado como CoF, por sus siglas en inglés), como las normas ASTM D 1894, D 2047 y D 3247. Sin embargo, obtener un valor confiable del CoF es un desafío, ya que además de los factores previamente mencionados, también influyen otros como las reacciones químicas entre las superficies, las fuerzas de cohesión y las uniones microscópicas presentes en ellas. El principio de estas pruebas consiste en aplicar una fuerza conocida (N) sobre un disco, bola, bloque o pin en contacto con la muestra, generando desgaste debido al movimiento entre las superficies, que puede ser rotatorio, oscilatorio o lineal, dependiendo de la aplicación. Con la ayuda de una celda de carga, se registra en tiempo real la fuerza (F) necesaria para mantener una velocidad constante, lo que permite determinar la fricción (Li, 2014).

El desgaste ocurre cuando una superficie sólida se daña gradualmente debido al contacto y movimiento con otra, lo que provoca la pérdida progresiva de material (Jeyaprakash y Yang, 2021). El índice de desgaste cuantifica la cantidad de material perdido, ya sea como peso, volumen o espesor, según el tiempo o la distancia de deslizamiento entre las superficies.

Un ejemplo claro de cómo se evalúa el desgaste es a través de la ASTM D3702-94, que prueba la resistencia de los materiales al desgaste. En este método, se hace girar una muestra contra una arandela de acero bajo una carga fija.

El procedimiento para medir el desgaste de manera general con base en la ASTM D3702-94 (2019) se describe a continuación:

- Preparación: Medir el espesor de la muestra, colocarla en su soporte, aplicar presión y ajustar la máquina.
- Prueba tribológica: Registrar la fricción durante 40 horas, luego apagar la máquina, retirar la presión y bajar el soporte.
- Medición del desgaste: Medir el espesor de la muestra al final y comparar con los valores iniciales para determinar el material perdido.

Este método permite evaluar la durabilidad de los materiales cuando están expuestos a fricción constante, ayudando a elegir los más adecuados para aplicaciones que implican movimiento y contacto continuos.

PTFE: PROPIEDADES Y SUS LIMITACIONES

El politetrafluoroetileno, más comúnmente conocido como PTFE, es un tipo de polímero que pertenece a la familia de los fluoropolímeros. Está compuesto de átomos de carbono y flúor, lo que le confiere propiedades únicas, como una baja fricción y una alta resistencia química, ya que el flúor, siendo el elemento más electronegativo, crea enlaces muy fuertes con el carbono. Esto provoca que el PTFE difícilmente reaccione con otros compuestos químicos, lo cual lo hace ideal para aplicaciones en las que se requiere estabilidad y durabilidad en entornos agresivos o de alta temperatura. Descubierta por accidente en 1938, el PTFE es similar en estructura al polietileno, pero con átomos de flúor en lugar de hidrógeno (ver Figura 2), lo que le brinda una gran estabilidad química. Este material, comúnmente conocido como Teflón®, se usa en diversas aplicaciones industriales, ya que es altamente duradero y adecuado para condiciones extremas de temperatura y contacto químico (Ebnesajjad, 2021).

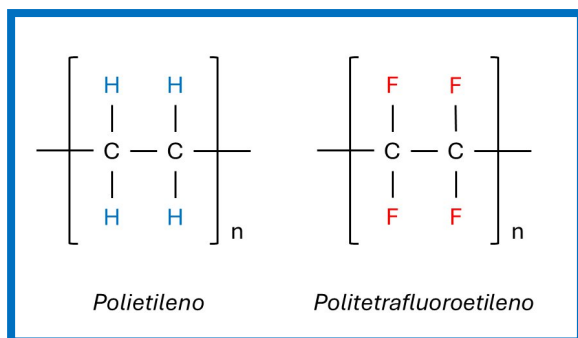


Figura 2. Comparativa entre la estructura del polietileno (PE) y el politetrafluoroetileno (PTFE)

El PTFE, con relación a la tribología se caracteriza por presentar un bajo coeficiente de fricción y una resistencia al desgaste que depende de factores como la presión, velocidad, temperatura, área de contacto y distancia de deslizamiento. Sus propiedades mecánicas incluyen una resistencia moderada a la tracción, dureza y ductilidad, aunque presenta una resistencia limitada a la deformación lenta, que es la tendencia de un material a deformarse lentamente bajo presión constante; esta característica puede mejorarse con el uso de micro y nano rellenos. Químicamente, el PTFE es inerte y no reacciona con ácidos comunes ni es soluble en solventes orgánicos, incluso a altas temperaturas, gracias a los fuertes enlaces carbono-flúor. Además, tiene una excelente estabilidad térmica, con un punto de fusión cercano a los 342 °C, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren resistencia al desgaste, baja fricción y estabilidad química y térmica (Dhanumalayan y Joshi, 2018).

El PTFE es ampliamente utilizado en industrias como la de alimentos, petroquímica, militar, eléctrica, química, entre otras, que pueden consultarse en la Figura 5. Sin embargo, sus propiedades lo hacen especialmente relevante en los sectores automotriz y aeroespacial. En la industria automotriz, el PTFE es ideal para aplicaciones de lubricación, ya que su baja energía superficial minimiza la fricción y el calor, lo cual alarga la vida útil de componentes como engranajes y cojinetes, por ejemplo, en pruebas, el PTFE demostró durabilidad en recubrimientos de engranajes operando a 30 °C, superando a otros polímeros. En la industria aeroespacial, es valioso para aplicaciones en entornos de vacío y temperaturas extremas. Bajo condiciones criogénicas, el PTFE actúa como lubricante sólido y recubrimiento de baja fricción, conservando piezas móviles en condiciones similares a

las del espacio. Además, su coeficiente de fricción responde favorablemente a la baja temperatura, lo que asegura un rendimiento óptimo en aplicaciones prolongadas y desafiantes (Dhanumalayan y Joshi, 2018).



Figura 5. Aplicaciones del PTFE en diversos campos. Nota: figura traducida y modificada de Dhanumalayan y Joshi (2018).

El PTFE es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales debido a sus propiedades de autolubricación, bajo coeficiente de fricción y alta resistencia química, sin embargo, presenta limitaciones significativas en condiciones extremas debido al desgaste. Este polímero tiende a generar partículas de desgaste bajo cargas constantes y altas velocidades, lo que afecta su eficiencia y durabilidad en aplicaciones que requieren bajo mantenimiento y larga vida útil. Aunque puede formar una película autolubrificante en condiciones bajas de deslizamiento, el desgaste aumenta drásticamente en entornos con fricción continua a altas velocidades, lo que afecta su rendimiento. Diversas cargas han sido probadas para mejorar su desempeño, incluyendo fibras de vidrio, carbono y otros compuestos inorgánicos que reducen el desgaste en diferentes magnitudes (Saisnith y Fridrici, 2021; Sun y col., 2021). Sin embargo, las cargas cerámicas han mostrado una capacidad especialmente efectiva para mejorar la resistencia al desgaste del PTFE sin afectar significativamente su fricción, lo cual es crucial en condiciones de trabajo extremas.

CARGAS CERÁMICAS COMO MEJORA DEL PTFE

Los materiales cerámicos, cuyo nombre proviene del griego "*Keramikos*" (que significa "materiales quemados"), se conocen desde hace siglos y se producen a partir de materias primas naturales. Son sólidos inorgánicos y no metálicos que requieren altas temperaturas para su procesamiento debido a sus elevados puntos de fusión. Generalmente, están compuestos por combinaciones de elementos metálicos y no metálicos, como oxígeno, boro, carbono y nitrógeno,

formando compuestos como óxidos, carburos, silicatos y boruros. Estos materiales se distinguen por sus enlaces iónicos o una combinación de enlaces iónicos y covalentes, lo que les otorga propiedades únicas, como aislamiento térmico, ligereza, resistencia al choque térmico y estabilidad en varios solventes orgánicos.

Una clasificación común de los materiales cerámicos los divide en tradicionales y avanzados. Los cerámicos tradicionales incluyen materiales como ladrillos y porcelana, mientras que los avanzados son compuestos más complejos, diseñados para satisfacer las exigencias de aplicaciones industriales. Gracias a su versatilidad y a sus propiedades distintivas, los materiales cerámicos han encontrado un papel fundamental como cargas en diversas aplicaciones industriales, contribuyendo a la durabilidad y resistencia de los productos finales (Ayode Otitoju y col., 2020). Algunas cerámicos como la wollastonita y la antigorita se han utilizado para este fin.

La wollastonita es un mineral del grupo de los silicatos, nombrado en honor a Sir William Hyde Wollaston (1766–1828), y su fórmula química es CaSiO_3 . Está compuesta principalmente por óxido de calcio (CaO) y dióxido de silicio (SiO_2), con un contenido teórico de 48.38% de CaO y 51.78% de SiO_2 . Aunque generalmente es un mineral relativamente puro, la wollastonita puede contener otros elementos como aluminio, hierro, manganeso, magnesio, potasio, sodio o, en algunos casos, calcio combinado con estroncio, lo que puede alterar su color natural blanco a tonos como gris, amarillo, verde claro, rosado, marrón o rojo debido a la presencia de impurezas (Ismail y Mohamad, 2021).

Además de su composición química, la wollastonita presenta propiedades que la hacen ideal como material de refuerzo para matrices poliméricas. Contribuye a mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de los compuestos poliméricos, y destaca por su alta estabilidad dimensional, baja contracción en el molde y notable estabilidad térmica. Gracias a estas características, la wollastonita se está posicionando como una alternativa atractiva a otros materiales de relleno convencionales, como la fibra de vidrio, el talco y el carbonato de calcio (Wong y col., 2021).

La antigorita es un mineral del grupo de la serpentina, caracterizado por su composición rica en silicato de magnesio ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) y su estructura distintiva de capas octaédricas ricas en magnesio y láminas

de tetraedros de silicato. A diferencia de otros minerales de serpentina como la lizardita y la crisotilo, la antigorita tiene capas ligeramente curvadas y se presenta comúnmente en colores que van del blanco al verde, con cristales de morfología en forma de láminas o escamas (ver Figura 6). Esta estructura única de la antigorita le permite tener una buena estabilidad térmica, alcanzando temperaturas de descomposición de hasta 700 °C. Estas propiedades de resistencia térmica y su estructura en capas hacen que la antigorita sea un material versátil en diversas aplicaciones. Como relleno en polímeros (Carmignano y col., 2020), especialmente en aquellos utilizados en aplicaciones de contacto dinámico, la antigorita mejora la lubricidad debido a su estructura laminar, que facilita el deslizamiento y reduce el desgaste entre superficies. Esta propiedad es valiosa para extender la vida útil de componentes plásticos en movimientos repetitivos, donde la reducción del coeficiente de fricción es esencial.

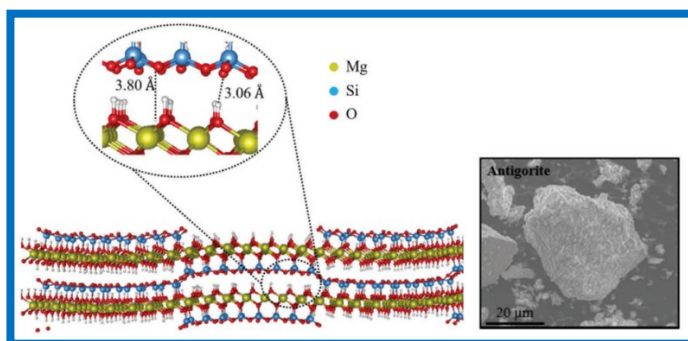


Figura 6. Patrón ondulado de la estructura de antigorita e imagen de microscopía electrónica de barrido (MEB). Nota: Imagen adaptada de Carmignano y col. (2020)

La adición de materiales cerámicos como la wollastonita y la antigorita al PTFE disminuye notablemente el coeficiente de fricción y aumenta su resistencia al desgaste, lo cual es ideal para aplicaciones de contacto dinámico. En un estudio realizado por Wang y col. (Wang y col., 2024), se investigaron composites de PTFE reforzados con wollastonita y antigorita en distintas formulaciones (una con wollastonita, otra con antigorita, y cinco combinaciones de ambos). Los resultados mostraron un aumento en la dureza de todos los composites, lo cual es favorable para su resistencia. Asimismo, se observó una significativa reducción en el desgaste, destacando que los composites con ambas cerámicas lograron reducir el desgaste a menos de la mitad en comparación con el PTFE puro (ver Figura 7); esto resulta muy ventajoso en aplicaciones industriales, donde podría

prolongarse la vida útil de los componentes en contextos dinámicos. Aunque casi todas las formulaciones redujeron el coeficiente de fricción, en el composite con wollastonita únicamente se registró un ligero aumento del 15%. Además, se analizó la tribopelícula formada en la bola metálica utilizada en las pruebas tribológicas mediante Espectroscopía de Fotoelectrones de Rayos X (XPS), encontrándose compuestos como MgSiO_3 , Mg_2SiO_4 y SiO_2 (entre otros), formados debido al calor generado por la fricción. Estos compuestos funcionan como un recubrimiento protector que mejora la fricción y la resistencia al desgaste de los materiales.

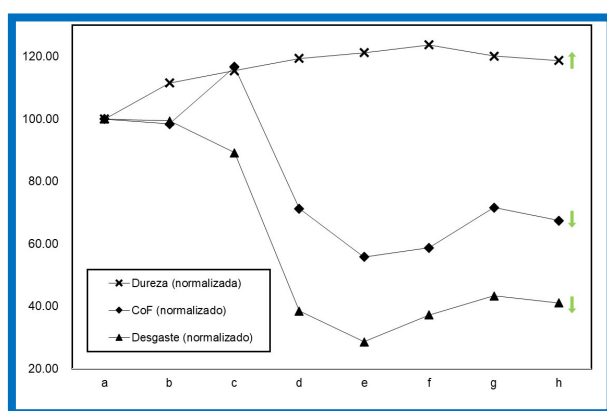


Figura 7. Resultados de dureza, coeficiente de fricción (CoF) y desgaste para a. PTFE, b. 10Atg/PTFE, c. 10W/PTFE, d. (10Atg + 10W)/PTFE, e. (10Atg + 20W)/PTFE, f. (10Atg + 30W)/PTFE, g. (15Atg + 20W)/PTFE, y h. (20Atg + 20W)/PTFE. Nota: resultados basados en el trabajo de Wang y col. (2024)

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una revisión de la literatura sobre el comportamiento tribológico de compuestos de PTFE (politetrafluoroetileno) reforzados con rellenos cerámicos como wollastonita y antigorita, subrayando su potencial en aplicaciones de contacto dinámico. Las mejoras en las propiedades tribológicas de estos compuestos convierten al PTFE, reconocido por su bajo coeficiente de fricción, pero limitado en resistencia bajo condiciones extremas, en una opción prometedora para aplicaciones industriales demandantes, como en los sectores automotriz y aeroespacial. Las propiedades mejoradas permiten que estos compuestos soporten

cargas mecánicas y fricción continua, incrementando así su durabilidad y eficiencia operativa. En el futuro, el desarrollo de estos materiales abre nuevas oportunidades para investigar combinaciones innovadoras de rellenos cerámicos y técnicas de manufactura que optimicen aún más el rendimiento y la adaptabilidad de los composites de PTFE, favoreciendo su implementación en sectores emergentes y en aplicaciones que requieren alta precisión y resistencia al desgaste extremo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca #4029837 otorgada a Jesús David Flores Oyervides para la realización de sus estudios de Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales.

REFERENCIAS

- Ajimoto, H. A. (2024). *Principles and applications of tribology*. Springer.
- ASTM D3702-94. (2019). *Standard Test Method for Wear Rate and Coefficient of Friction of Materials in Self-Lubricated Rubbing Contact Using a Thrust Washer Testing Machine (Reapproved)*.
- Ayode Otitoju, T., Ugochukwu Okoye, P., Chen, G., Li, Y., Onyeka Okoye, M., y Li, S. (2020). Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 85: 34–65. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.02.002>
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology* (Second edition). Wiley.
- Carmignano, O., Vieira, S., Brandão, P. R., Bertoli, A., y Lago, R. (2020). Serpentinites: Mineral Structure, Properties and Technological Applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190215>
- Dhanumalayan, E., y Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—A review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2): 247–268. <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>
- Ebnesajjad, S. (2021). *Introduction to fluoropolymers: Materials, technology and applications* (Second edition). William Andrew.

- Ismail, H., y Mohamad, H. (2021). Bioactivity and Biocompatibility Properties of Sustainable Wollastonite Bioceramics from Rice Husk Ash/Rice Straw Ash: A Review. *Materials*, 14(18): 5193. <https://doi.org/10.3390/ma14185193>
- Jeyapraakash, N., y Yang, C.-H. (2021). Friction, Lubrication, and Wear. En A. Patnaik, T. Singh, y V. Kukshal (Eds.), *Tribology in Materials and Manufacturing—Wear, Friction and Lubrication*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93796>
- Kügler, P., Marian, M., Schleich, B., Tremmel, S., y Wartzack, S. (2020). tribAI—Towards an Explicit Specification of Shared Tribological Understanding. *Applied Sciences*, 10(13): 4421. <https://doi.org/10.3390/app10134421>
- Li, D. (2014). *Static coefficient of friction measurement using tribometer*. NANOVEA.
- Saisnith, V., y Fridrici, V. (2021). A study of the wear damage of a PTFE coating: The effects of temperature and environment on its mechanical and tribological properties. *Wear*, 480–481: 203946. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203946>
- Sun, W., Liu, X., Liu, K., Xu, J., Lu, Y., y Ye, J. (2021). Mechanochemical functionality of graphene additives in ultralow wear polytetrafluoroethylene composites. *Carbon*, 184: 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.08.042>
- Wang, C., Yu, H., Yin, Y., Zhou, X., Wang, H., Song, Z., Wang, S., Yang, Z., y Bai, Z. (2024). Preparation and Tribological Behaviors of Antigorite and Wollastonite Mineral Dual-Phase-Reinforced Polytetrafluoroethylene Matrix Composites. *Lubricants*, 12(3): 74. <https://doi.org/10.3390/lubricants12030074>
- Wong, J. F., Chan, J. X., Hassan, A. B., Mohamad, Z. B., y Othman, N. B. (2021). Thermal and flammability properties of wollastonite-filled thermoplastic composites: A review. *Journal of Materials Science*, 56(15): 8911–8950. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05255-5>