

Lubricación Sólida: Fundamentos y Aplicaciones en Transporte

Solid Lubrication: Fundamentals and Transport Applications

Presentación: 05/09/2023

Germán Prieto

Instituto de Física del Sur, UNS-CONICET, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, CP8000, Argentina.

Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, CP8000, Argentina.

german.prieto@uns.edu.ar

Resumen

En este trabajo se tratarán los conceptos básicos de la lubricación sólida y se discutirán los desafíos que se buscan resolver empleando diferentes tipos de lubricantes sólidos y recubrimientos. Se presentarán materiales y técnicas de aplicación de vanguardia, comentando sobre las ventajas que ofrece cada uno y los diferentes campos de aplicación en los que se destacan. El enfoque estará puesto en sectores de avanzada, tales como la industria aeroespacial y la movilidad eléctrica. Finalmente, se plantearán las oportunidades y líneas de investigación con más proyección en el campo de la lubricación sólida.

Palabras clave: Lubricantes sólidos, sulfuros metálicos, MoS_2 , nanotubos de carbono

Abstract

In this work, we will discuss the basic concepts of solid lubrication and explore the challenges that are being addressed by employing different types of solid lubricants and coatings. Cutting-edge materials and application techniques will be presented, highlighting the advantages offered by each of them and their diverse fields of application. The focus will be on advanced sectors such as the aerospace industry and electric mobility. Finally, the opportunities and research directions with the greatest potential in the field of solid lubrication will be outlined.

Keywords: Solid lubricants, metal sulfides, MoS_2 , carbon nanotubes

Introducción

La tribología es la ciencia y tecnología que estudia la interacción entre las superficies en movimiento relativo, enfocándose en los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación. La fricción es una fuerza resistente que actúa cuando dos superficies se deslizan una sobre la otra, lo cual genera pérdidas de energía, desgaste y calor. Por otro lado, el desgaste se refiere al deterioro gradual de las superficies en contacto debido a la fricción, lo que puede llevar a fallos prematuros de los componentes y sistemas.

En este contexto, la lubricación sólida se presenta como una solución eficaz para reducir tanto la fricción como el desgaste en diferentes aplicaciones. A diferencia de la lubricación líquida convencional, donde un fluido, como un aceite o una grasa, se introducen entre las superficies en movimiento para reducir la fricción, la lubricación sólida se basa en la aplicación de materiales sólidos especiales en las superficies de contacto.

La lubricación sólida puede lograrse mediante el uso de lubricantes sólidos, como los sulfuros metálicos, los metales blandos, algunos polímeros, el grafito y los nanotubos de carbono, que tienen propiedades únicas para reducir la fricción y el desgaste. Estos materiales pueden adherirse a las superficies en movimiento y actúan como una barrera protectora, formando una capa lubricante que reduce el contacto directo entre las superficies. Esta capa lubricante sólida facilita el deslizamiento suave y controlado, minimizando la fricción y el desgaste (Bowden & Tabor, 2001).

La lubricación sólida ha demostrado ser particularmente efectiva en aplicaciones sometidas a condiciones extremas, como la industria aeroespacial y el transporte, debido a las altas cargas, velocidades y temperaturas a las que están expuestos los componentes en estos sectores. Los lubricantes sólidos permiten un funcionamiento más eficiente y duradero de los sistemas, reduciendo la necesidad de mantenimiento y aumentando la vida útil de los componentes críticos.

Los lubricantes sólidos son a menudo, la única opción viable para lubricar componentes sometidos a condiciones de alta exigencia, como por ejemplo cuando las cargas aplicadas son elevadas, las temperaturas son muy altas o bajas, cuando hay paradas y arranques frecuentes y también para mejorar las propiedades lubricantes de aceites y grasas convencionales.

Para poder ser utilizado como lubricante sólido, un compuesto químico debe reunir una serie de requisitos. Los lubricantes sólidos ideales tienen una estructura en capas que permite un deslizamiento suave entre ellas. Esto permite que las capas se desplacen una sobre la otra, formando una barrera lubricante que reduce el contacto directo entre las superficies en movimiento. Además, un lubricante sólido efectivo debe tener una baja fricción estática y dinámica. Esto implica que debe ofrecer una resistencia mínima al inicio del movimiento y durante el deslizamiento, reduciendo la fricción y las pérdidas de energía asociadas. También debe tener capacidad para adherirse a las superficies en deslizamiento y una buena estabilidad térmica, es decir, que pueda mantener sus propiedades lubricantes en un amplio rango de temperaturas sin descomponerse o perder su efectividad.

Actualmente, existe una amplia gama de compuestos que se utilizan en aplicaciones de lubricación sólida. Los sulfuros metálicos, como el sulfuro de molibdeno (MoS_2) y el sulfuro de tungsteno (WS_2), son de los lubricantes sólidos de más amplia utilización. Estos materiales tienen una estructura laminar que permite el deslizamiento entre las capas, lo que reduce la fricción y el desgaste. Los sulfuros metálicos son eficaces en una amplia gama de temperaturas y se utilizan en diversas aplicaciones industriales. Sin embargo, su desempeño depende en gran medida de la humedad ambiental (Singer, 1992).

Otro lubricante sólido de tipo laminar es el grafito. Se compone de capas de átomos de carbono organizados en una estructura hexagonal. Estas capas tienen una baja fuerza de unión entre ellas, lo que facilita el deslizamiento. El grafito es conocido por su excelente lubricidad y es muy utilizado gracias a su bajo costo. Sin embargo, sus propiedades tribológicas también se ven afectadas por la humedad ambiente, requiriendo de entornos relativamente húmedos para operar correctamente. Los nanotubos de carbono en cambio, son estructuras cilíndricas de carbono con propiedades mecánicas y tribológicas excepcionales. Estos nanomateriales tienen una baja fricción y alta resistencia mecánica.

En este trabajo se presentan resultados referidos a las siguientes líneas de investigación del Centro de Desarrollo en Tribología y Tecnología de Superficies de la Universidad Nacional del Sur (CDTTS-UNS):

- Desempeño en entornos de humedad relativa variable de recubrimientos blandos compuestos por mezclas de sulfuros metálicos.

- Aditivación de aceites lubricantes con sulfuros metálicos, nanotubos de carbono y aditivos extrema presión.
- Performance de grasas lubricantes con el agregado de grafito, sulfuro de bismuto y nitruro de boro hexagonal para la prevención del desgaste adhesivo severo.
- Comportamiento tribológico de resinas epoxídicas aditivadas con mezclas de sulfuros metálicos.
- Formulación de compuestos sinterizados de base cobre con el agregado de sulfuros metálicos para su aplicación en pastillas de freno de alto desempeño.
- Desarrollo de siliconas aditivadas con sulfuros metálicos para la fabricación de burletes y sellos mecánicos para vehículos eléctricos.

El objetivo del presente trabajo es presentar los fundamentos de la lubricación sólida en conjunto con resultados de diversas líneas de investigación del CDTTS-UNS con aplicabilidad directa al campo del transporte en sus diferentes modalidades.

Desarrollo

Desempeño en entornos de humedad relativa variable de recubrimientos blandos compuestos por mezclas de sulfuros metálicos.

En este estudio, se investigaron los efectos de diferentes formulaciones y niveles de humedad en recubrimientos blandos compuestos por Bi_2S_3 - MoS_2 . Se prepararon diferentes formulaciones, a saber 100% Bi_2S_3 (A), 75% Bi_2S_3 – 25% MoS_2 (B), 50% Bi_2S_3 – 50% MoS_2 (C), 25% Bi_2S_3 – 75% MoS_2 (D), 100% MoS_2 (E). Los recubrimientos se aplicaron utilizando una técnica de pulverizado y se evaluaron mediante pruebas de deslizamiento recíproco en diferentes condiciones. Se observó que los recubrimientos compuestos presentaban una fricción más estable y una mayor durabilidad en comparación con los recubrimientos de Bi_2S_3 o MoS_2 puros (Fig. 1).

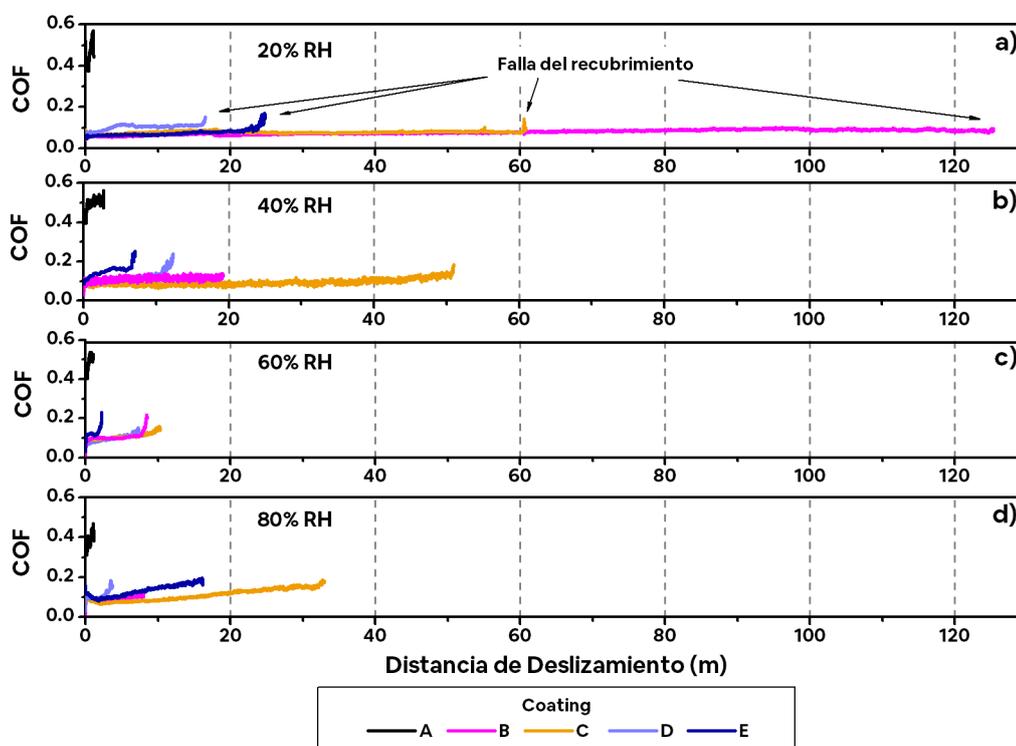


Figura 1 – Coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento bajo diferentes niveles de humedad relativa de recubrimientos compuestos $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{MoS}_2$.

La mejora en la respuesta tribológica dependía de la formulación y del nivel de humedad. Los recubrimientos con una proporción de 50% de Bi_2S_3 y 50% de MoS_2 mostraron una durabilidad 760% mayor en comparación con los recubrimientos de MoS_2 puro. Además, se encontró que la adición de Bi_2S_3 contribuía a la formación de tribofilms más gruesos en las superficies en contacto, y los recubrimientos compuestos mostraron una formación más rápida de tribofilms en comparación con los recubrimientos puros (Pilotti, B., et al, 2021) (Prieto, G., et al, 2023). Estos recubrimientos tienen potencial uso en aplicaciones aeroespaciales, para la lubricación de componentes de satélites y aeronaves expuestos a bajas velocidades de deslizamiento, tales como antenas, estabilizadores o gimbals.

Aditivación de aceites lubricantes con sulfuros metálicos, nanotubos de carbono y aditivos extrema presión

En este estudio, se probaron diferentes formulaciones de aceite que combinaban dialquilditiofosfato de zinc (ZDDP), sulfuro de molibdeno (MoS_2), sulfuro de bismuto (Bi_2S_3), sulfuro de tungsteno (WS_2) y nanotubos de carbono (CNT). Las diferentes formulaciones ensayadas se presentan en la Tabla 1. Las pruebas se realizaron en ensayos tipo bloque-sobre-anillo y se evaluó la fricción, el desgaste y la formación de películas protectoras.

ID	ZDDP	Bi_2S_3	MoS_2	WS_2	CNT
A	1	0	0	0	0
B	1	4	0	0	0
C	1	0	4	0	0
D	1	0	0	4	0
E	1	0	0	0	0.1
F	1	0	4	0	0.1
G	1	0	0	4	0.1
H	1	2	2	0	0
I	1	0	2	2	0.1
J	1	2	2	0	0

Tabla 1 – Porcentaje de adición de aditivos (%p/p) para cada formulación de aceite ensayada.

Los resultados mostraron que las formulaciones que contenían ZDDP y CNT presentaron el mejor rendimiento tribológico, reduciendo la fricción en un 24% y el desgaste en un 70% (Fig. 2). La adición de lubricantes sólidos, especialmente ZDDP y CNT, resultó en una reducción consistente de la fricción. Sin embargo, algunas formulaciones con Bi_2S_3 mostraron mayores tasas de desgaste. El análisis de las superficies de desgaste reveló la formación de almohadillas de fosfato y tribocapas de sulfuro) (Prieto, G., et al, 2021) (Prieto, G., et al, 2022).

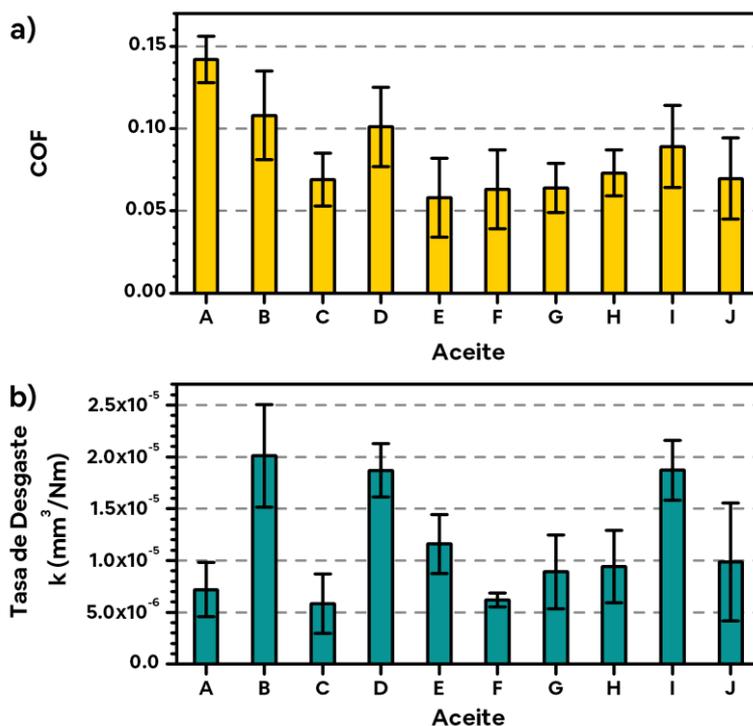


Figura 2 – a) Coeficiente de Fricción y b) Tasa de Desgaste promedio para diferentes formulaciones de aceites lubricantes aditivados con ZDDP, sulfuros metálicos y CNTs.

La presencia de CNT facilitó la formación y regeneración de las almohadillas de fosfato. La inclusión de ZDDP y CNT en las formulaciones de aceite puede mejorar el rendimiento tribológico y reducir el desgaste en aplicaciones tales como cajas reductoras de vehículos eléctricos.

Aditivación de grasas lubricantes con grafito, sulfuro de bismuto y nitruro de boro hexagonal para la prevención del desgaste adhesivo severo.

Se investigaron las propiedades de fricción y prevención del desgaste adhesivo severo (galling) de una grasa lubricante aditivada con Bi_2S_3 . Para lograr esto, se utilizaron grasas de litio comerciales que contenían 10% en peso de Bi_2S_3 , nitruro de boro hexagonal y grafito para lubricar contactos de acero-aluminio en diferentes configuraciones tribológicas. Se realizaron ensayos de deslizamiento alternativo con cargas normales y velocidades de deslizamiento variables, y pruebas en un tribómetro tipo load-scanner a 25, 200 y 300 °C. La adición de Bi_2S_3 mejoró la respuesta tribológica, mejorando significativamente su capacidad de carga (Fig. 3). Las grasas que contenían Bi_2S_3 también mostraron una mejora en el coeficiente de fricción y en la prevención de eventos adhesivos severos hasta 200 °C (Prieto, G., et al, 2022).

Por lo tanto, el Bi_2S_3 mostró propiedades prometedoras como aditivo para grasas lubricantes que operan en una amplia gama de cargas normales, velocidades de deslizamiento y temperaturas moderadas. Estas grasas aditivadas podrían ser utilizadas como grasas de chasis para equipamiento minero y de transporte de cargas, al proveer excelente lubricación en condiciones de confinamiento y altas presiones de contacto.

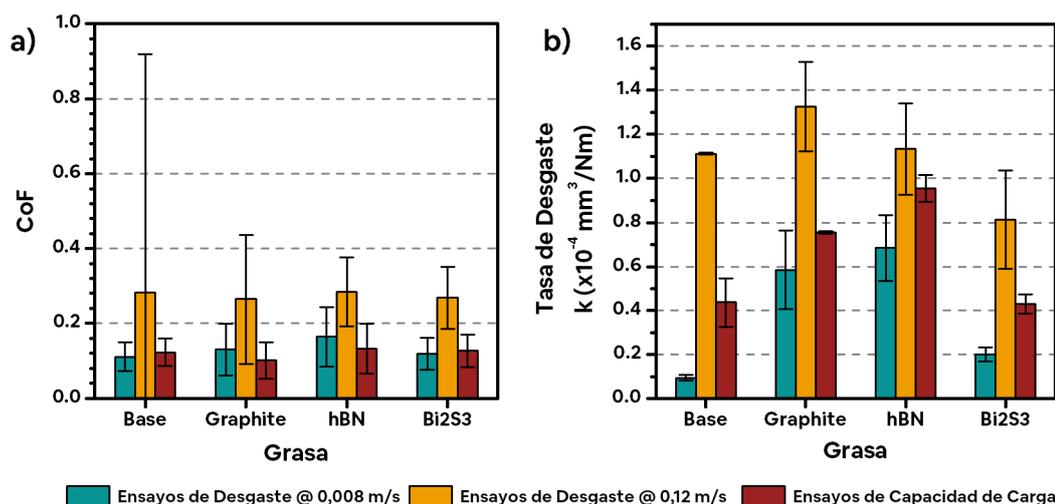


Figura 3 – a) Coeficiente de fricción y b) Tasa de desgaste en ensayos recíprocos para diferentes formulaciones de grasa.

Comportamiento tribológico de resinas epoxídicas aditivadas con mezclas de sulfuros metálicos

En este estudio, se probaron formulaciones novedosas de recubrimientos epoxi compuestos, con el agregado de diferentes cantidades de MoS₂, Bi₂S₃, nanotubos de carbono (CNT) y grafito en un aparato de anillo en disco. Las pruebas se realizaron utilizando un tribómetro pin-on-box, donde se aplicó una carga continuamente creciente hasta alcanzar un valor constante, equivalente a una presión de contacto de 300 MPa. Se midieron el espesor y la dureza de cada muestra recubierta. Se utilizaron resinas epoxi de alto rendimiento (Gekko Tool 4005, Carmas Composites, Argentina) junto con MoS₂, Bi₂S₃, CNTs y grafito para crear los recubrimientos. Las formulaciones se identificaron como A, B y C, con diferentes proporciones de lubricantes sólidos, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 2. Los resultados mostraron que las formulaciones que contenían MoS₂, Bi₂S₃ y CNT proporcionaban una mejor protección de la superficie y presentaban tiempos de falla hasta un 80% más altos que el recubrimiento A (Fig. 4).

ID	MoS2	Bi2S3	CNT	Grafito
A	5	0	0	5
B	5	5	0	0
C	5	5	0.1	0

Tabla 2 – Formulación de recubrimientos epoxy compuestos (%p/p)

Esto se debe a la durabilidad de las tribocapas compuestas de MoS₂/Bi₂S₃ y al aumento de la resistencia mecánica de las resinas epoxi con la adición de CNT. Estos resultados son de aplicabilidad en la formulación de lubricantes tanto de aparatos de vía como de movilidad ferroviaria, tal es el caso de los lubricadores de pestaña.

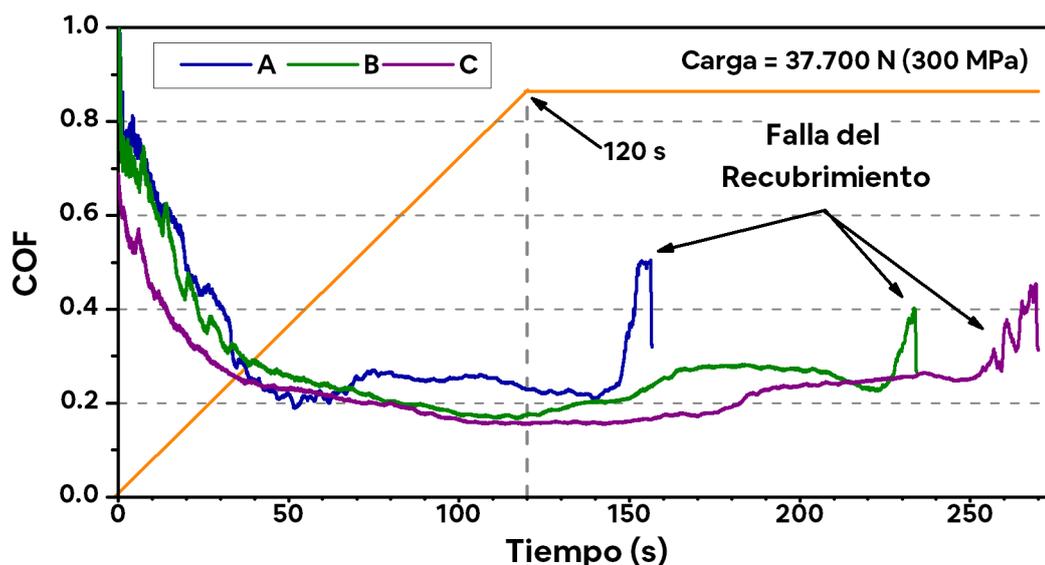


Figura 4 – Coeficiente de Fricción en función del tiempo para los diferentes recubrimientos epoxídicos.

Formulación de compuestos sinterizados de base cobre con el agregado de sulfuros metálicos para su aplicación en pastillas de freno de alto desempeño

Es crucial garantizar la eficiencia y seguridad de los sistemas de frenado en vehículos pesados. Por lo tanto, las pastillas de freno desempeñan un papel esencial, ya que deben contar con características como un coeficiente de fricción adecuado y estable, una baja tasa de desgaste, resistencia mecánica a altas temperaturas y una buena conductividad térmica. Estas cualidades se pueden encontrar en materiales compuestos a base de cobre (Cu), que consisten en una fase abrasiva, un componente lubricante (generalmente grafito) y una matriz metálica. En este estudio, se investigó la viabilidad de utilizar combinaciones de sulfuros metálicos como componente lubricante en la fabricación de pastillas de freno a base de cobre. Se produjeron polvos de cobre, partiendo de hojuelas de cobre de grado electrolítico (pureza 99,9%) mediante atrición mecánica en un molino de bolas de alta energía. Posteriormente se agregaron diferentes proporciones de MoS_2 y Bi_2S_3 al molino, para luego ser prensados en caliente en una atmósfera inerte. El tiempo óptimo de sinterización se determinó en 1 hora y la temperatura de prensado en $800\text{ }^\circ\text{C}$. Se estudió el efecto del contenido de sulfuros metálicos en las propiedades mecánicas y tribológicas de las pastillas. Se encontró que un mayor contenido de sulfuros metálicos resultaba en un menor coeficiente de fricción y una menor dependencia del valor del COF en función de la carga normal aplicada. Estos resultados indican la posibilidad de utilizar combinaciones de $\text{MoS}_2/\text{Bi}_2\text{S}_3$ en la fabricación de pastillas de freno de base cobre mediante técnicas de sinterizado a alta temperatura.

Desarrollo de siliconas aditivadas con sulfuros metálicos para la fabricación de burletes y sellos mecánicos para vehículos eléctricos

Con el creciente interés en la movilidad eléctrica, los vehículos eléctricos (VE) están experimentando una rápida expansión en el mercado automotriz. Estos vehículos, impulsados por motores eléctricos y baterías de alta capacidad, ofrecen una alternativa más sostenible y eficiente en comparación con los vehículos de combustión interna tradicionales. Sin embargo, esta transición hacia los VE también plantea nuevos desafíos y oportunidades en el diseño y desarrollo de componentes específicos para estos vehículos. Los sellos poliméricos para vehículos eléctricos deben cumplir con requisitos específicos en comparación con los vehículos de combustión interna. Debido a las diferentes características y condiciones de funcionamiento de los VE, como el menor ruido, las altas tensiones eléctricas y las variaciones extremas de temperatura, los sellos poliméricos deben ser diseñados y fabricados considerando estos factores.

Se prepararon mezclas de silicona con sulfuros metálicos ($\text{MoS}_2/\text{Bi}_2\text{S}_3$) para su evaluación reológica y tribológica. Los resultados preliminares mostraron que las siliconas compuestas presentaron menores coeficientes de fricción, hasta un 25% más bajo que para el caso de las siliconas puras y una excelente compatibilidad entre la silicona y las partículas de lubricante sólido.

Conclusiones

La tribología y la lubricación sólida son fundamentales para comprender y abordar los desafíos relacionados con la fricción y el desgaste en la interacción de las superficies en movimiento. La lubricación sólida, mediante el uso de lubricantes sólidos especiales, se ha convertido en una solución efectiva para reducir la fricción y el desgaste en aplicaciones industriales avanzadas, ofreciendo mejoras significativas en la eficiencia, durabilidad y vida útil de los sistemas, especialmente en sectores exigentes como la industria aeroespacial y el transporte. El desempeño de los lubricantes sólidos depende en gran medida de las condiciones a las que está sometido, eso hace necesaria la exploración continua de nuevas combinaciones de materiales y formas de aplicación que garanticen su efectividad en entornos operativos.

Referencias

- Bowden, F. P., & Tabor, D. (2001). *The friction and lubrication of solids* (Vol. 1). Oxford university press
- Pilotti, B. A., Prieto, G., Juan, A., Faccio, R., Broitman, E., Dennehy, M., & Tuckart, W. (2021). Bi_2S_3 and MoS_2 Soft Coatings: A Comparative Study of Their Frictional Behavior Under Different Humidity Levels, Contact Stresses, and Sliding Speeds. *Tribology Letters*.
- Prieto G., Silva Cárdenas, I. H., Antonelli, M. M., Abdelnabe, J. P., Tuckart, W. R. Influencia de la adición de nanotubos de carbono en el desempeño tribológico de un aceite aditivado con ZDDP. 1era Reunión Latinoamericana de Ingeniería de Superficies y Tribología, 2022.
- Prieto, G., Dennehy, J., Tuckart, W.R. (2021). Synergetic effect of metal sulfides and ZDDP on the lubricating performance of a PAO oil. 10th International Conference on Materials Science and Engineering.
- Prieto, G., Kafexhiu, F., Tuckart, W. R., & Podgornik, B. (2022). Tribological properties of bismuth sulfide (Bi_2S_3) particles as grease additive for aluminum forming operations. *Wear*, 506, 204442.
- Prieto, G., Pilotti, B., Sobanski, G., Bajos, J., Tuckart, W. R., & Dennehy, M. (2023). Enhancing the Tribological Performance of MoS_2 Coatings in Humid Environments with the Addition of Bi_2S_3 . *Tribology Letters*, 71(1), 18.
- Singer, I. L. (1992). Solid lubrication processes. In *Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Processes* (pp. 237–261).