

Implicaciones para la ingeniería de superficies del desempeño mecánico de recubrimientos Diamond-Like carbón bajo erosión seca

Implications for surface engineering of the mechanical performance of Diamond-Like carbon coatings under dry erosion

Jorge Andrés Rodas Buenaño^{1*}

E-mail: ua.jorgerb85@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5786-5262>

Giovanny Vinicio Pineda Silva¹

E-mail: ua.giovannypineda@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4159-2156>

Andrés Sebastián Villacrés Quintana¹

E-mail: ua.andresvq05@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5397-0211>

¹Universidad Regional Autónoma de los Andes, UNIANDES. Ambato, Ecuador.

*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Rodas Buenaño, J. A., Pineda Silva, G. V., & Villacrés Quintana, A. S. (2024). Implicaciones para la ingeniería de superficies del desempeño mecánico de recubrimientos Diamond-Like carbón bajo erosión seca. *Revista Científica Cultura, Comunicación y Desarrollo*, 9(S1), 194-198. <http://rccd.ucf.edu.cu/index.php/rccd>

RESUMEN

Este estudio evaluó la resistencia a la erosión de recubrimientos DLC (Diamond-Like Carbón) bajo impacto de partículas sólidas. Se diseñó y construyó un equipo modular de pruebas de erosión seca, capaz de controlar variables clave como la velocidad de las partículas y la tasa de alimentación. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en muestras de recubrimientos DLC y sustratos de PTFE, midiendo la pérdida de masa tras la exposición repetida a impactos. Los resultados confirmaron que los recubrimientos DLC exhibieron alta dureza y resistencia al desgaste, pero también revelaron una fragilidad significativa bajo impactos continuos. Las pruebas demostraron la repetibilidad de los resultados, destacando la capacidad del equipo para replicar condiciones de erosión en distintos materiales. El sistema desarrollado proporcionó un método fiable y de bajo costo para evaluar el rendimiento de los recubrimientos DLC, mostrando su potencial en futuras investigaciones. Sin embargo, la investigación subrayó la necesidad de mejorar la tenacidad de estos recubrimientos, especialmente mediante la dopación con otros elementos, para superar las limitaciones observadas. En general, el equipo resultó ser una herramienta valiosa para estudios de erosión, contribuyendo al diseño óptimo de recubrimientos protectores para aplicaciones industriales y biomédicas.

Palabras clave:

Aplicaciones, Material, Recubrimiento, Equipo.

ABSTRACT

This study evaluated the erosion resistance of DLC (Diamond-Like Carbon) coatings under the impact of solid particles. Modular dry erosion testing equipment was designed and built, capable of controlling key variables such as particle velocity and feed rate. Experimental tests were carried out on samples of DLC coatings and PTFE substrates, measuring mass loss upon repeated impact exposure. The results confirmed that the DLC coatings exhibited high hardness and wear resistance, but also revealed significant brittleness under continuous impacts. The tests demonstrated the repeatability of the results, highlighting the equipment's ability to replicate erosion conditions in different materials. The developed system provided a reliable and low-cost method to evaluate the performance of DLC coatings, showing its potential in future research. However, the research highlighted the need to improve the toughness of these coatings, especially through doping with other elements, to overcome the observed limitations. Overall, the equipment proved to be a valuable tool for erosion studies, contributing to the optimal design of protective coatings for industrial and biomedical applications.

Keywords:

Applications, Material, Coating, Equipment.

Introducción

El diseño de materiales para diversas aplicaciones está intrínsecamente ligado al estudio de las condiciones de degradación superficial y los mecanismos de desgaste que pueden afectar al material durante su uso (Koundal, et. al., 2023). La exposición de las superficies a impactos localizados de partículas sólidas es común en diversas industrias, incrementando el desgaste y comprometiendo las propiedades mecánicas del material, lo que puede llevar a fallos prematuros y pérdidas económicas significativas (Alvarez, et. al., 2022).

La ingeniería de superficies busca mejorar las características de la capa superficial mediante la aplicación de recubrimientos que actúen como barreras protectoras frente a la erosión. Sin embargo, la selección del material del recubrimiento es un desafío, ya que implica consideraciones complejas como la resistencia de la unión, el espesor del recubrimiento y las tensiones residuales. Todas las cuales afectan la capacidad del recubrimiento para resistir la penetración de partículas impactantes.

El desarrollo de los recubrimientos DLC (Diamond-Like Carbón) ha sido un área de investigación de gran interés debido a sus propiedades sobresalientes, que combinan características de materiales duros como el diamante con otras más típicas del grafito (Al-Asadi, & Al-Tameemi, 2023). Estos recubrimientos están constituidos por carbono amorfo, lo que les otorga una combinación de alta dureza, bajo coeficiente de fricción, bio compatibilidad y resistencia al desgaste y la corrosión. Estas propiedades hacen que los recubrimientos DLC sean atractivos para aplicaciones en industrias como la automotriz, aeroespacial, biomédica y microelectrónica (McMaster, et. al., 2020).

Uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de recubrimientos DLC es la variedad de metodologías de síntesis y deposición, que permiten adaptar sus propiedades a diferentes aplicaciones. Entre los métodos más comunes destacan la deposición física de vapor (PVD) y la deposición química de vapor (CVD), en donde el control de parámetros como la energía de los iones y la presión de trabajo permite ajustar la estructura del recubrimiento, su espesor y las tensiones internas. A lo largo de las últimas décadas, se han logrado avances significativos en la ingeniería de los recubrimientos DLC, optimizando sus propiedades mecánicas y tribológicas, así como su adhesión a diversos sustratos (Evaristo, et. al., 2023; Rajak, et. al., 2021).

Uno de los desafíos en el desarrollo de los recubrimientos DLC ha sido mejorar su tenacidad, ya que, si bien su alta dureza les confiere resistencia al desgaste, también pueden volverse frágiles bajo ciertas condiciones, especialmente en aplicaciones que involucran impactos repetidos o altas temperaturas. Las investigaciones recientes han explorado la dopación con otros elementos como nitrógeno, silicio o metales de transición, lo que ha permitido modificar su estructura para aumentar su ductilidad sin comprometer sus características de dureza y resistencia (Fiaschi, et. al., 2019).

El comportamiento de los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión y desgaste es otro foco crucial en su desarrollo. A medida que se profundiza en el estudio de

sus mecanismos de degradación, se ha identificado que la erosión por partículas sólidas puede provocar microfisuras o desprendimientos superficiales, particularmente en sustratos más blandos. Por ello, es esencial no solo desarrollar recubrimientos con alta resistencia, sino también investigar la interacción entre el recubrimiento y el sustrato para lograr una sinergia que maximice su durabilidad (Cheng, et. al., 2019; Tyagi, et. al., 2019; Yamada, et. al., 2022).

Cabe destacar que los recubrimientos DLC no solo tienen aplicaciones en entornos industriales agresivos, sino que también se han implementado en dispositivos médicos, como prótesis y marcapasos, gracias a su bio compatibilidad y propiedades antibacterianas. Su desarrollo ha sido clave para mejorar la vida útil y el rendimiento de dispositivos en contacto con el cuerpo humano, demostrando la versatilidad de este material. Sin embargo, la aplicación en entornos de erosión requiere un profundo entendimiento de su comportamiento bajo el impacto de partículas sólidas (Erdemir, & Martin, 2018).

Implicaciones para el diseño de superficies

Las propiedades mecánicas y el comportamiento frente a la erosión seca de los recubrimientos DLC ofrecen múltiples implicaciones para la ingeniería de superficies. Es crucial optimizar no solo la dureza del recubrimiento, sino también su elasticidad y adherencia al sustrato, buscando un equilibrio entre resistencia a la erosión y longevidad del recubrimiento (Santhosh, et. al., 2022). Esto puede lograrse a través de tratamientos de superficie previos, la aplicación de capas intermedias para mejorar la adherencia o la incorporación de elementos dopantes que ajusten las tensiones internas del recubrimiento.

Asimismo, es esencial considerar las condiciones de servicio de la aplicación. En entornos donde la erosión seca sea el principal mecanismo de desgaste, la selección de un recubrimiento DLC con una estructura balanceada en términos de dureza y flexibilidad, junto con un diseño optimizado de la interfaz sustrato-recubrimiento, puede proporcionar mejoras significativas en el rendimiento. Las investigaciones futuras podrían enfocarse en el desarrollo de recubrimientos DLC multi-capas o con gradientes de propiedades, donde las capas superficiales brinden protección contra la erosión, mientras que las capas inferiores ofrezcan mayor tenacidad y adherencia.

El objetivo de esta investigación es analizar la resistencia a la erosión de recubrimientos DLC (Diamond-Like Carbón), proporcionando datos experimentales precisos sobre las condiciones de desgaste superficial. La investigación pretende contribuir al diseño óptimo de recubrimientos protectores, abordando aspectos clave como la velocidad de las partículas, el flujo de material erosivo, y la capacidad de los recubrimientos DLC para mantener sus propiedades mecánicas en entornos de erosión seca.

Materiales y métodos

La metodología de investigación utilizada es principalmente de carácter cuantitativo experimental.

Enfoque en pruebas y experimentación: La metodología implicó llevar a cabo una serie de pruebas y experimentos para evaluar diferentes aspectos de la plataforma, como la

velocidad del aire, el control de la alimentación de arena y las capacidades de erosión. Este enfoque experimental comprendió manipular variables controladas para observar cómo afectan a los resultados.

Uso de instrumentación y mediciones: Se emplearon instrumentos de medición, como anemómetros, vacuómetros y medidores de flujo, para obtener datos cuantitativos sobre el rendimiento de la plataforma y los materiales sometidos a prueba. Estas mediciones son características de la investigación experimental, donde se buscó recopilar datos empíricos para respaldar conclusiones.

Control de variables: Necesidad de controlar variables como la velocidad del aire, la presión negativa y la cantidad de partículas de arena. Este control fue fundamental en la investigación experimental para garantizar la validez interna de los resultados, permitiendo aislar el efecto de una variable sobre otras.

El desarrollo del equipo de pruebas de erosión seca se llevó a cabo en varias fases con el objetivo de diseñar un dispositivo que replicara las condiciones de erosión seca en las que los recubrimientos DLC suelen estar expuestos. Para ello, se siguió un enfoque basado en la revisión exhaustiva de la literatura sobre los mecanismos de erosión por impacto de partículas sólidas y los equipos utilizados en estudios previos, asegurando que los parámetros clave estuvieran debidamente controlados y que los resultados pudieran replicarse en diferentes condiciones de prueba.

El equipo fue diseñado con una estructura modular que permitiera la variación de los parámetros fundamentales de la erosión, como la velocidad de las partículas, la tasa de alimentación de partículas sólidas y el ángulo de impacto sobre la muestra. Para garantizar la fiabilidad y precisión del equipo, se utilizó un sistema de boquilla basado en el principio Venturi, capaz de alcanzar velocidades de salida de hasta 29 m/s, según lo determinado en las pruebas preliminares (véanse las Tablas 2 y 3).

El sistema de alimentación de partículas sólidas se diseñó para ser uniforme y ajustable, utilizando un mecanismo de control de presión negativa que permitía variar la cantidad de partículas alimentadas por segundo. Esto se validó a través de múltiples ensayos, cuyos resultados mostraron consistencia en la alimentación de partículas, tal como se muestra en la Tabla 4.

Protocolo experimental: Para evaluar la efectividad del equipo, se realizaron pruebas con diferentes muestras, incluyendo recubrimientos DLC y sustratos de PTFE, bajo condiciones controladas de erosión seca. Cada muestra fue expuesta a impactos de partículas sólidas durante un tiempo determinado, y se midió la pérdida de masa en intervalos regulares de 5 minutos hasta un total de 20 minutos de exposición. Estos datos permitieron calcular la tasa de erosión para cada material.

Validación y análisis de los resultados: La validación del equipo se llevó a cabo mediante pruebas repetitivas, lo que permitió verificar la consistencia y confiabilidad de los resultados. Se realizaron tres pruebas bajo las mismas condiciones para cada tipo de muestra, asegurando la

repetibilidad de los resultados. Los datos obtenidos sobre la erosión de los recubrimientos y sustratos se analizaron estadísticamente para confirmar la precisión del equipo y su capacidad para replicar las condiciones de erosión en distintos materiales.

El diseño iterativo del equipo fue fundamental para alcanzar una plataforma de pruebas confiable y de bajo costo. A lo largo del proceso de desarrollo, cada componente del sistema fue evaluado y mejorado, logrando un equilibrio entre el control de las variables críticas de erosión y la adaptabilidad del equipo a diferentes condiciones experimentales.

Resultados-discusión

Resultados de la evaluación de la velocidad del aire.

En la Tabla 1 se muestran los resultados respecto a la velocidad del aire medida en la entrada y salida de la boquilla.

Tabla 1: Resultados de la velocidad del aire de entrada y salida.

| Presión (bar) | Caudal (LPM) | Velocidad de entrada (m/s)±0.1 | Velocidad de salida (m/s)±0.1 |
|---------------|--------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 2.2 | 17.67 | 23.2 | 14.9 |

Fuente: Elaboración propia.

El diseño de la boquilla cumple con el requisito de alcanzar una velocidad de salida del aire de 15 m/s. Además, la Tabla 2 muestra varias pruebas realizadas para evaluar las capacidades del equipo para proporcionar velocidades más bajas y más altas.

Tabla 2: Velocidad del aire de salida según variación de presión

| Presión (bar) | Velocidad de salida (m/s) |
|---------------|---------------------------|
| 1 | 7 |
| 2 | 14 |
| 2.2 | 15 |
| 3 | 20.6 |
| 4 | 24.6 |
| 5 | 29.1 |

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos resultados, el requisito deseado de variar la velocidad del aire se cumple en el rango de 7 a 29 m/s. La presión se puede aumentar hasta 7 bares, pero no fue posible determinar la velocidad del aire debido a las limitaciones del dispositivo de medición.

Mecanismo de alimentación uniforme de arena.

Los resultados de estas pruebas en la Tabla 3 mostraron consistencia y la disponibilidad de cambiar la masa de partículas por segundo a una velocidad de aire fija aumentando o reduciendo la presión negativa en la sección VENTURI de la boquilla.

Tabla 3: Variación de la alimentación de partículas en términos de control de vacío.

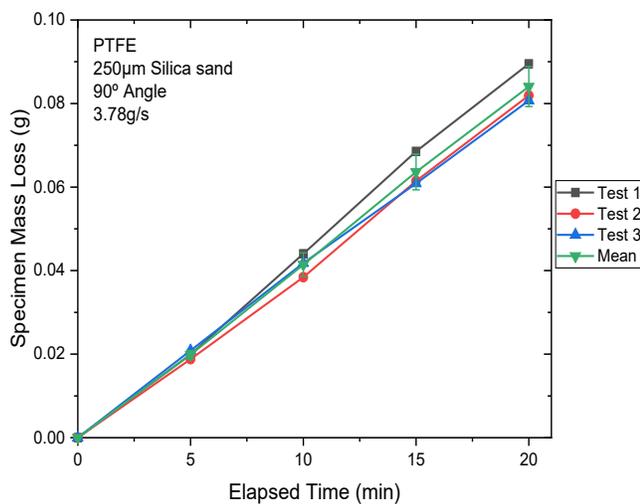
| Vacío | Gramos | Tiempo 1(s) | Tiempo 2(s) | Tiempo 3(s) | Promedio tiempo | gramos/segundos |
|-------|--------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 1KPa | 15 | 91.56 | 94.9 | 93.45 | 93.30 | 0.16 |
| 4KPa | 100 | 104.58 | 105.59 | 105.47 | 105.21 | 0.95 |
| 8KPa | 100 | 90.13 | 90.97 | 91.34 | 90.81 | 1.10 |

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de confiabilidad de la erosión de la plataforma

Después de tres pruebas realizadas en la plataforma bajo las mismas condiciones, los resultados mostrados en la Figura 1 con respecto a la pérdida de masa de las muestras de PTFE mostraban consistentemente repetibilidad.

Fig. 1: Tasa de erosión de PTFE hasta 20 min, mediciones cada 5 min.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados-discusión

Se logró una plataforma de erosión seca simple, de bajo costo y versátil. Este equipo proporciona control de diferentes parámetros involucrados en las pruebas de erosión seca, como la velocidad de las partículas, el flujo másico de partículas, el ángulo de impacto, la ubicación y orientación de la muestra. El equipo demostró replicar los requisitos de rendimiento utilizados en las pruebas de lodos para tratar de mejorar la comprensión de los recubrimientos DLC bajo erosión.

Las pruebas de erosión son un área de estudio amplia y es difícil definir o predecir grados específicos de desgaste de diferentes materiales. A lo largo de los años se han diseñado y desarrollado muchos instrumentos de prueba para este estudio; Cada diseño estaba destinado a replicar una variedad de condiciones que los hicieran adecuados no solo para una aplicación.

El proceso actual de diseño de la plataforma pasó por varios desafíos con el objetivo de encontrar confiabilidad en

los resultados y la calibración. Se realizaron varias pruebas de prototipos básicos para minimizar el coste real del montaje final. Después de un proceso iterativo, cada concepto detrás de los sistemas fue probado y mejorado. A partir de los resultados se puede evaluar sólo una estimación de la durabilidad en las condiciones de funcionamiento específicas. Recordando la revisión de la literatura, la erosión del recubrimiento tiene varias variables que pueden influir en el rendimiento, como la arquitectura del recubrimiento, el espesor de la película, el método de deposición y el sustrato. Cada caracterización de un recubrimiento es un mundo completamente nuevo en cuanto a propiedades y, por tanto, aplicaciones. Esta plataforma es sólo un instrumento más disponible para apoyar los estudios de erosión que se realizarán en el futuro.

Cuando se analiza un recubrimiento bajo erosión seca, es crucial identificar las características del sustrato y del recubrimiento individualmente y en conjunto como un todo. En este caso, la dureza de los recubrimientos supera los 14GPa lo que podría volverlos quebradizos. Por lo tanto, se puede esperar un comportamiento frágil ante la erosión.

Conclusiones

Las pruebas realizadas con el equipo de erosión seca desarrollado permitieron alcanzar los objetivos de la investigación, proporcionando un método confiable para evaluar la resistencia de recubrimientos DLC bajo condiciones de impacto de partículas sólidas. El diseño modular del sistema permitió ajustar con precisión los parámetros de erosión, como la velocidad de las partículas y el flujo másico, lo que resultó en datos experimentales consistentes y repetibles. Los resultados indicaron que los recubrimientos DLC presentan una elevada dureza, pero su fragilidad ante impactos reiterados sigue siendo un desafío a considerar.

Además, el equipo demostró su capacidad para replicar condiciones de erosión seca en diferentes materiales, lo que valida su aplicabilidad en estudios futuros de caracterización de recubrimientos. Las tasas de erosión observadas proporcionaron información clave sobre el comportamiento de los recubrimientos DLC, destacando la importancia de su interacción con el sustrato y la influencia de parámetros como el espesor y la metodología de deposición.

El desarrollo de este equipo representa un avance significativo en la investigación de la erosión de materiales, ofreciendo una plataforma versátil, de bajo costo y fácil calibración. No obstante, el comportamiento complejo de los recubrimientos DLC, especialmente en términos de fragilidad bajo ciertas condiciones, sugiere que futuras investigaciones deberán enfocarse en optimizar la estructura de

los recubrimientos y explorar nuevos métodos de dopaje que mejoren su tenacidad sin sacrificar otras propiedades críticas como la dureza y la resistencia al desgaste.

Referencias bibliográficas

- Al-Asadi, M. M., & Al-Tameemi, H. A. (2023). The effect of diamond like carbon coating on the solid particles erosion resistance of grade 410 stainless steel. *Wear*, *514*, 204584. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164822003416>.
- Alvarez, C., Berrospe-Rodriguez, C., Wu, C., Pasek-Allen, J., Khosla, K., Bischof, J., Mangolini, L., & Aguilar, G. (2022). Photothermal heating of titanium nitride nanomaterials for fast and uniform laser warming of cryopreserved biomaterials. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *10*, 957481. <https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2022.957481/full>.
- Cheng, F., Ji, W., & Zhao, J. (2019). Influence of adhesion strength on cavitation erosion resistance of diamond-like carbon coating. *Industrial Lubrication and Tribology*, *71*(5), 724–730. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ILT-01-2019-0024/full/html>.
- Erdemir, A., & Martin, J. M. (2018). Superior wear resistance of diamond and DLC coatings. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, *22*(6), 243–254. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359028618300950>.
- Evaristo, M., Fernandes, F., & Cavaleiro, A. (2023). Influence of the alloying elements on the tribological performance of DLC coatings in different sliding conditions. *Wear*, *526*, 204880. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164823002636>.
- Fiaschi, G., Rota, A., Ballestrazzi, A., Marchetto, D., Vezzalini, E., & Valeri, S. (2019). A chemical, mechanical, and tribological analysis of DLC coatings deposited by magnetron sputtering. *Lubricants*, *7*(4), 38. <https://www.mdpi.com/2075-4442/7/4/38>.
- Koundal, R., Khanduja, R., Sharma, A., & Singh, K. (2023). A review of natural fiber-reinforced polymer composite chemical, physical, and thermo-mechanical properties. *Journal of Fibers and Polymer Composites*, *2*(2), 67–80. <https://journals.gesociety.org/index.php/jfpc/article/view/73>.
- McMaster, S. J., Liskiewicz, T. W., Neville, A., & Beake, B. D. (2020). Probing fatigue resistance in multi-layer DLC coatings by micro-and nano-impact: Correlation to erosion tests. *Surface and Coatings Technology*, *402*, 126319. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897220309889>.
- Rajak, D. K., Kumar, A., Behera, A., & Menezes, P. L. (2021). Diamond-like carbon (DLC) coatings: classification, properties, and applications. *Applied Sciences*, *11*(10), 4445. <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/10/4445>.
- Santhosh, N., Shankar, G., & Nunthavarawong, P. (2022). Mechanical and Tribological Performance of Diamond-Like Carbon Coatings: An Overview. *Diamond-Like Carbon Coatings*, 255–274. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003189381-9/mechanical-tribological-performance-diamond-like-carbon-coatings-santhosh-shankar-peerawatt-nunthavarawong>.
- Tyagi, A., Walia, R. S., Murtaza, Q., Pandey, S. M., Tyagi, P. K., & Bajaj, B. (2019). A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *78*, 107–122. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263436818303597>.
- Yamada, Y., Murashima, M., Umehara, N., Tokoroyama, T., Lee, W.-Y., Takamatsu, H., Tanaka, Y., & Utsumi, Y. (2022). Effect of fracture properties and surface morphology on wear of DLC coatings at severe contact condition. *Tribology International*, *169*, 107486. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X22000597>.