



# Método neutrosófico para evaluar los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca

## Neutrosophic method for evaluating DLC coatings under dry weathering conditions

Jorge Andrés Rodas Buenaño<sup>1</sup>, Antonio Gabriel Castillo Medina<sup>2</sup>, Andrés Sebastián Villacrés Quintana<sup>3</sup>, and Javier Renato Moyano Arévalo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Regional Autónoma de Los Andes, Ambato, Ecuador. [ua.jorgerb85@uniandes.edu.ec](mailto:ua.jorgerb85@uniandes.edu.ec)

<sup>2</sup> Universidad Regional Autónoma de Los Andes, Ambato, Ecuador. [ua.antonio83@uniandes.edu.ec](mailto:ua.antonio83@uniandes.edu.ec)

<sup>3</sup> Universidad Regional Autónoma de Los Andes, Ambato, Ecuador. [ua.andresvq05@uniandes.edu.ec](mailto:ua.andresvq05@uniandes.edu.ec)

<sup>4</sup> Universidad Regional Autónoma de Los Andes, Ambato, Ecuador. [ua.javierma42@uniandes.edu.ec](mailto:ua.javierma42@uniandes.edu.ec)

**Resumen.** Este estudio tiene como objetivo desarrollar un Método Neutrosófico para evaluar los recubrimientos de carbono tipo diamante (DLC) bajo condiciones de erosión seca. Se presenta una evaluación exhaustiva del comportamiento de estos recubrimientos, utilizando una plataforma de erosión seca diseñada específicamente para esta investigación. Se investigó el rendimiento de diversos recubrimientos DLC, incluyendo carbono amorfo hidrogenado (a-C:H), carbono amorfo dopado con silicio (a-C:H:Si) y carbono amorfo dopado con tungsteno (a-C:H:W). Las pruebas se realizaron utilizando partículas de arena de sílice de 250  $\mu\text{m}$  a una velocidad de impacto de 15 m/s y un ángulo de 90 grados. Los resultados revelan diferencias significativas en la resistencia a la erosión entre los diversos tipos de recubrimientos DLC, así como la influencia crucial del material del sustrato en su rendimiento. Este enfoque permitirá no solo evaluar de manera más rigurosa las propiedades de erosión de los recubrimientos DLC, sino también establecer una metodología reproducible que se pueda aplicar en futuros estudios. De este modo, se contribuirá al entendimiento de cómo optimizar estos recubrimientos en aplicaciones industriales donde la resistencia al desgaste es esencial, potenciando así su uso en diversas aplicaciones tecnológicas. El desarrollo del Método Neutrosófico promete ser un avance significativo en la caracterización y mejora de los recubrimientos DLC en condiciones de erosión seca.

**Palabras Claves:** método neutrosófico, criterio de experto, recubrimientos DLC, erosión seca, carbono amorfo, desgaste, ingeniería de superficies.

**Abstract.** This study aims to develop a Neutrosophic Method to evaluate diamond-like carbon (DLC) coatings under dry erosion conditions. A comprehensive evaluation of the performance of these coatings is presented, using a dry erosion rig specifically designed for this investigation. The performance of various DLC coatings was investigated, including hydrogenated amorphous carbon (a-C:H), silicon-doped amorphous carbon (a-C:H:Si) and tungsten-doped amorphous carbon (a-C:H:W). Tests were performed using 250  $\mu\text{m}$  silica sand particles at an impact velocity of 15 m/s and a 90 degree angle. The results reveal significant differences in erosion resistance between the various types of DLC coatings, as well as the crucial influence of the substrate material on their performance. This approach will not only allow a more rigorous evaluation of the erosion properties of DLC coatings, but also establish a reproducible methodology that can be applied in future studies. In this way, it will contribute to the understanding of how to optimize these coatings in industrial applications where wear resistance is essential, thus enhancing their use in various technological applications. The development of the Neutrosophic Method promises to be a significant advance in the characterization and improvement of DLC coatings under dry erosion conditions.

**Keywords:** Neutrosophic method, expert judgment, DLC coatings, dry erosion, amorphous carbon, wear, surface engineering

## 1 Introducción

El desgaste erosivo representa un desafío significativo en numerosas aplicaciones industriales, desde turbinas de gas hasta sistemas de transporte de partículas [1]. La exposición de las superficies de los materiales al impacto localizado de partículas sólidas aumenta el desgaste, retirando material de la superficie mediante un proceso de deformación [2]. Este fenómeno provoca la reducción de las propiedades mecánicas, exponiendo el componente a fallar y comprometiendo su vida útil, lo que resulta en pérdidas económicas significativas [3,19].

La ingeniería de superficies ha emergido como una solución prometedora para mitigar los efectos del desgaste erosivo. En particular, los recubrimientos de carbono tipo diamante (DLC) han atraído considerable atención debido a sus propiedades excepcionales, como alta dureza, bajo coeficiente de fricción y transparencia [4]. Sin embargo, la aplicación efectiva de estos recubrimientos en entornos de erosión requiere una comprensión profunda de su comportamiento bajo el impacto de partículas sólidas.

Los recubrimientos DLC abarcan una amplia gama de estructuras de carbono amorfo, desde carbono amorfo hidrogenado (a-C:H) hasta carbono amorfo tetraédrico (ta-C), con diversas composiciones y propiedades mecánicas [5]. La concentración de enlaces sp<sup>3</sup> en estos recubrimientos determina en gran medida sus propiedades, con valores de dureza que pueden variar desde 10 hasta 80 GPa [6].

El estudio del comportamiento erosivo de los recubrimientos DLC presenta desafíos únicos [7]. A diferencia de los materiales a granel, donde la tasa de erosión se puede medir fácilmente por pérdida de masa, los recubrimientos delgados requieren técnicas más sofisticadas para rastrear su degradación. El daño del recubrimiento por erosión depende de factores como el material y espesor de la película, el material del sustrato, las propiedades de la interfaz y los parámetros de prueba [8]. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar un método neutrosófico para evaluar los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca.

## 2 Materiales y métodos

Los conjuntos Neutrosóficos son una generalización de un conjunto borroso (especialmente de conjunto intuicionístico borroso) [9, 10]. Deja ser  $U$ , un universo de discurso, y  $M$  un conjunto incluido en  $U$ . Un elemento  $x$  de  $U$  es notado en respeto del conjunto  $M$  como  $x(T, I, F)$  y pertenece a  $M$  en el modo siguiente: Es  $t\%$  verdad en el conjunto,  $i\%$  indeterminante (desconocido si sea) en el conjunto, y  $f\%$  falso, donde  $t$  varía en  $T$ ,  $i$  varía en  $I$ ,  $f$  varía en  $F$  [11]. Estadísticamente  $T, I, F$  son subconjuntos, pero dinámicamente  $T, I, F$  son funciones u operaciones dependientes de muchos parámetros desconocidos o conocidos.

Con el propósito facilitar la aplicación práctica a problema de toma de decisiones se realizó la propuesta de los conjuntos neutrosóficos de valor único (SVNS por sus siglas en inglés) los cuales permiten el empleo de variables lingüísticas [12] lo que aumenta la interpretabilidad en los modelos de recomendación y el empleo de la indeterminación. Sea  $X$  un universo de discurso. Un SVNS  $A$  sobre  $X$  es un objeto de la forma.

$$A = \{ \langle x, u_A(x), r_A(x), v_A(x) \rangle : x \in X \} \quad (1)$$

Donde  $u_A(x): X \rightarrow [0,1]$ ,  $r_A(x): X \rightarrow [0,1]$  y  $v_A(x): X \rightarrow [0,1]$  con  $0 \leq u_A(x) + r_A(x) + v_A(x) \leq 3$  para todo  $x \in X$ .

El intervalo  $u_A(x), r_A(x)$  y  $v_A(x)$  denotan las membrecías a verdadero, indeterminado y falso de  $x$  en  $A$ , respectivamente.

Por cuestiones de conveniencia un número SVN será expresado como  $A = (a, b, c)$ , donde  $a, b, c \in [0,1]$ , y  $a + b + c \leq 3$ .

### 2.1 Método neutrosófico para evaluar los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca

El método Delphi es una técnica de recogida y procesamiento de información, que consiente obtener la valoración de un grupo de expertos a través de la consulta. Esta técnica, de carácter cualitativo, es recomendable cuando es necesario, recoger opiniones especializadas consensuadas y representativas de un colectivo de individuos de alta especialización, constituyendo un importante referente de validación teórica de las propuestas interventivas [13-15].

El método para evaluar los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca, utiliza el criterio de experto para realizar la inferencia en la evaluación y decisión. Se contactaron un total de 9 expertos.

Se les pidió que respondieran un Test de conocimiento, a lo que accedieron amablemente todos los expertos convocados. Con esta técnica se evaluaron los siguientes elementos cognitivos para la determinación de sus competencias sobre el tema que serían consultados [16, 17,20]:

- Kc: Nivel de información relevante y conocimiento que sobre el tema que tienen los expertos.
- Ka: Coeficiente de argumentación de los expertos a partir del análisis crítico sobre el tema.
- K: Determinación del coeficiente de competencia de los expertos consultados, utilizando la fórmula, según la metodología del método Delphi donde  $K = 0,5 \times (Kc + Ka)$ .

Este enfoque multidisciplinario en la selección de los expertos asegura que las inferencias realizadas en la evaluación y decisión sean pertinentes y reflejen un amplio espectro de conocimientos y experiencias en el área de estudio.

### 3 Resultados y discusión

Para implementar el Método Neutrosófico y evaluar los recubrimientos de carbono tipo diamante (DLC) bajo condiciones de erosión seca, se convocó un panel de 9 expertos en materiales y recubrimientos industriales. Este panel fue cuidadosamente seleccionado de acuerdo con criterios de inclusión que contemplaron la experiencia mínima de 10 años en investigación y desarrollo de materiales, así como la participación en proyectos relacionados con recubrimientos avanzados. Los expertos provienen de diversas especializaciones, entre las que se incluyen la ingeniería de materiales, la física aplicada y la tribología, lo que garantiza un enfoque multidisciplinario en el análisis y la interpretación de los resultados. Todos los miembros del panel han publicado en revistas de alto impacto y han sido involucrados en normativas y estándares internacionales relacionados con la evaluación de recubrimientos, lo que evidencia su conocimiento profundo y actualizado sobre las propiedades y comportamientos de los recubrimientos DLC. [21,22]

Después de la determinación del nivel de información de cada experto (Kc) y los niveles de argumentación sobre el objeto de la investigación, se determinaron sus competencias con el siguiente resultado. Los atributos se valorarán en la siguiente escala lingüística (Tabla 1). Estas valoraciones serán almacenadas para nutrir la base de datos.

**Tabla 1:** Términos lingüísticos empleados.

Término lingüístico	Números SVN
Extremadamente alto(EA)	(1,0,0)
Muy muy alto (MMA)	(0.9, 0.1, 0.1)
Muy alto (MA)	(0.8,0,15,0.20)
Alto (A)	(0.70,0.25,0.30)
Medianamente alto (MDA)	(0.60,0.35,0.40)
Media(M)	(0.50,0.50,0.50)
Medianamente bajo (MDB)	(0.40,0.65,0.60)
Bajo (B)	(0.30,0.75,0.70)
Muy bajo (MB)	(0.20,0.85,0.80)
Muy muy bajo (MMB)	(0.10,0.90,0.90)
Extremadamente bajo (EB)	(0,1,1)

La tabla 2 recoge los resultados obtenidos en el proceso de selección de expertos y describe el reconocimiento del coeficiente de conocimientos o de información sobre los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca.

**Tabla 2:** Resultados obtenidos en el proceso de selección de expertos.

Expertos	Kc.	Ka.	K.	VALORACIÓN
1	(0.9, 0.1, 0.1)	(0.8,0,15,0.20)	(0.85,0,15,0.20)	Muy muy alto (MMA)
2	(1,0,0)	(0.8,0,15,0.20)	(0.9, 0.1, 0.1)	Extremadamente alto(EA)
3	(0.50,0.50,0.50)	(0.6,0,15,0.20)	(0.55,0,15,0.20)	Media(M)
4	(0.8,0,15,0.20)	(0.9, 0.1, 0.1)	(0.85,0,15,0.20)	Muy alto (MA)
5	(1,0,0)	(0.9, 0.1, 0.1)	(0.95, 0.1, 0.1)	Extremadamente alto(EA)
6	(0.60,0.35,0.40)	(0.8,0,15,0.20)	(0.70,0.25,0.30)	Medianamente alto (MDA)
7	(0.50,0.50,0.50)	(0.6,0,15,0.20)	(0.55,0,15,0.20)	Media(M)
8	(0.8,0,15,0.20)	(0.9, 0.1, 0.1)	(0.85,0,15,0.20)	Muy alto (MA)
9	(0.70,0.25,0.30)	(1,0,0)	(0.85,0,15,0.20)	Muy alto (MA)
<b>Total</b>			<b>9/9=1</b>	<b>Alto</b>

La tabla 3 muestra la codificación de los valores de competencia de los expertos para evaluar los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca.

**Tabla 3:** Resultados obtenidos codificación de los valores de competencia de los expertos.

Desde	Valor	Hasta	Competencia
0.8 <	K	≤ 1.0	Alto
0.5 <	K	≤ 0.8	Medio
	K	≤ 0.5	Bajo

Como resultado se decidió la selección de los 7 expertos con niveles de competencias Alto y Medio.

### 3.1 Implementación del método neutrosófico para evaluar los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca

Para la validación de la propuesta se establecieron 3 criterios contentivos de la propuesta, los cuales fueron revisados y evaluados minuciosamente por los expertos. La tabla 4 muestra los criterios identificados.

**Tabla 4:** Criterios evaluativos identificados por los expertos.

Criterio	Descripción
1	Resistencia a la erosión: Medida mediante la evaluación de la pérdida de masa o el desgaste superficial de los recubrimientos tras exposición a partículas erosivas, utilizando un sistema de medición que permita un monitoreo preciso antes y después de las pruebas.
2	Dureza y módulo elástico: Determinación de la dureza (en GPa) y del módulo elástico de los recubrimientos a través de pruebas como la indentación micro o nanoindentación, lo cual proporciona información fundamental sobre la capacidad de los recubrimientos para soportar impactos y estrés mecánico.
3	Integridad de la Adhesión del Recubrimiento: Evaluación mediante ensayos de rasgado o pruebas de adherencia, que midan la capacidad del recubrimiento para permanecer unido al sustrato bajo condiciones de erosión, utilizando sustratos como acero para herramientas M2 endurecido y acero inoxidable 316L, que se han demostrado efectivos en pruebas de desgaste.

Las tablas siguientes muestran los resultados del procesamiento de las respuestas en la consulta a los expertos sobre la evaluación de los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca.

**Tabla 5:** Resultados obtenidos de frecuencia absoluta.

Criterios	C1 Muy adecuado	C2 Bastante adecuado	C3 Adecuado	C4 Poco Adecuado	C5 No adecuado	Total
1	7	0	0	0	0	7
2	6	1	0	0	0	7
3	6	1	0	0	0	7

**Tabla 6:** Resultados obtenidos de frecuencia acumulada sumativa.

Criterios	C1 Muy adecuado	C2 Bastante adecuado	C3 Adecuado	C4 Poco adecuado
1	(1,0,0)	(0,1,1)	(0,1,1)	(0,1,1)
2	(0.85,0,15,0.20)	(0.25,0.85,0.80)	(0,1,1)	(0,1,1)
3	(0.85,0,15,0.20)	(0.25,0.85,0.80)	(0,1,1)	(0,1,1)

**Tabla 7:** Resultados obtenidos de determinación de las imágenes neutrosófica.

Criterios	C1	C2	C3	Suma	Promedio
1	(1,0,0)	(0,1,1)	(0,1,1)	(1,0,0)	(1,0,0)
2	(0.85,0,15,0.20)	(0.25,0.85,0.80)	(0,1,1)	(1,0,0)	(0.8,0,15,0.20)
3	(0.85,0,15,0.20)	(0.25,0.85,0.80)	(0,1,1)	(1,0,0)	(0.8,0,15,0.20)
<b>Puntos de corte</b>					

$N = \text{Suma de suma} / \text{Número de ítems} \times \text{número de categorías}$

$N = 38,45 / 14 \times 5 = 38,45/70$

$N = 0,5593$

La tabla 8 muestra la valoración de los criterios de los expertos por ítems sobre la evaluación de los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca.

**Tabla 8:** Resultados obtenidos de valoración de los criterios de los expertos por ítems.

Valor del paso N-P	Criterio
(1,0,0)	Criterio 1: Resistencia a la erosión
(0.8,0,15,0.20)	Criterio 2: Dureza y módulo elástico
(0.8,0,15,0.20)	Criterio 3: Integridad de la adhesión del recubrimiento
<b>Índice</b>	<b>(0.9,0,15,0.20)</b>

A partir del procesamiento de los instrumentos se pudo obtener un índice de evaluación de los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca Medio (M) lo que representa un alto índice, sin embargo, esto depende de la resistencia a la erosión entre los diversos tipos de recubrimientos DLC y la influencia crucial del material del sustrato en su rendimiento, tal como se muestra en el siguiente caso de aplicación práctica:

### 3.2 Descripción del caso práctico

Para evaluar el rendimiento de los recubrimientos DLC bajo condiciones de erosión seca, se diseñó y fabricó una plataforma de erosión específica. El aparato utiliza un principio de aceleración de gas, donde las partículas de arena de sílice se introducen en una corriente de aire confinada mediante la succión generada por un Venturi dentro de un tubo de aceleración de 5 mm de diámetro interior.

Se utilizaron dos tipos de sustratos: acero para herramientas M2 endurecido y acero inoxidable 316L. Sobre estos sustratos se depositaron tres tipos diferentes de recubrimientos DLC:

- Carbono amorfo hidrogenado (a-C:H)
- Carbono amorfo dopado con silicio (a-C:H:Si)
- Carbono amorfo dopado con tungsteno (a-C:H:W)

Las características de las muestras se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 1** Muestras de prueba y recubrimientos [18].

Muestras				
Sustratos	Revestimiento	Dureza	Módulos elásticos	Espesor
Acero para herramientas endurecido	aC: H	~21 GPa	210 GPa	1 micrón
	aC: H: Si	~16GPa	150 GPa	1 micrón
	aC:H:W	~14GPa	220 GPa	1 micrón
Acero inoxidable	aC: H	~21 GPa	210 GPa	1 micrón
	aC: H: Si	~16GPa	150 GPa	1 micrón
	aC:H:W	~14GPa	220 GPa	1 micrón

Las pruebas de erosión se realizaron bajo las siguientes condiciones:

- Presión del aire: 2,2 bares
- Caudal de aire: 17,67 LPM
- Velocidad del aire portador: 14,9 m/s
- Velocidad de las partículas: 14,5 m/s
- Tasa de masa de partículas: 1,011 g/s
- Distancia de la boquilla a la muestra: 5 mm
- Ángulo de impacto: 90°
- Tipo de partículas erosivas: Arena de sílice con diámetro medio de 250  $\mu\text{m}$

#### Procedimiento de prueba

1. Se midió la masa inicial de las muestras con una balanza de precisión de 0,1 mg.
2. Las muestras se colocaron y alinearon en el portamuestras.
3. Se realizaron pruebas de erosión con intervalos de tiempo incrementales: 10 segundos hasta 30 segundos; cada 30 segundos hasta 3 minutos; después, mediciones cada minuto.
4. Después de cada intervalo, se retiraron las muestras para medir la pérdida de masa.
5. El área erosionada se analizó con un microscopio óptico Leica DM6B a 500  $\mu\text{m}$  y 50  $\mu\text{m}$  después de cada intervalo para identificar el momento exacto del fallo del recubrimiento.

#### Recubrimientos sobre sustrato de acero para herramientas

Los tres recubrimientos DLC sobre sustrato de acero para herramientas mostraron comportamientos distintivos bajo erosión:

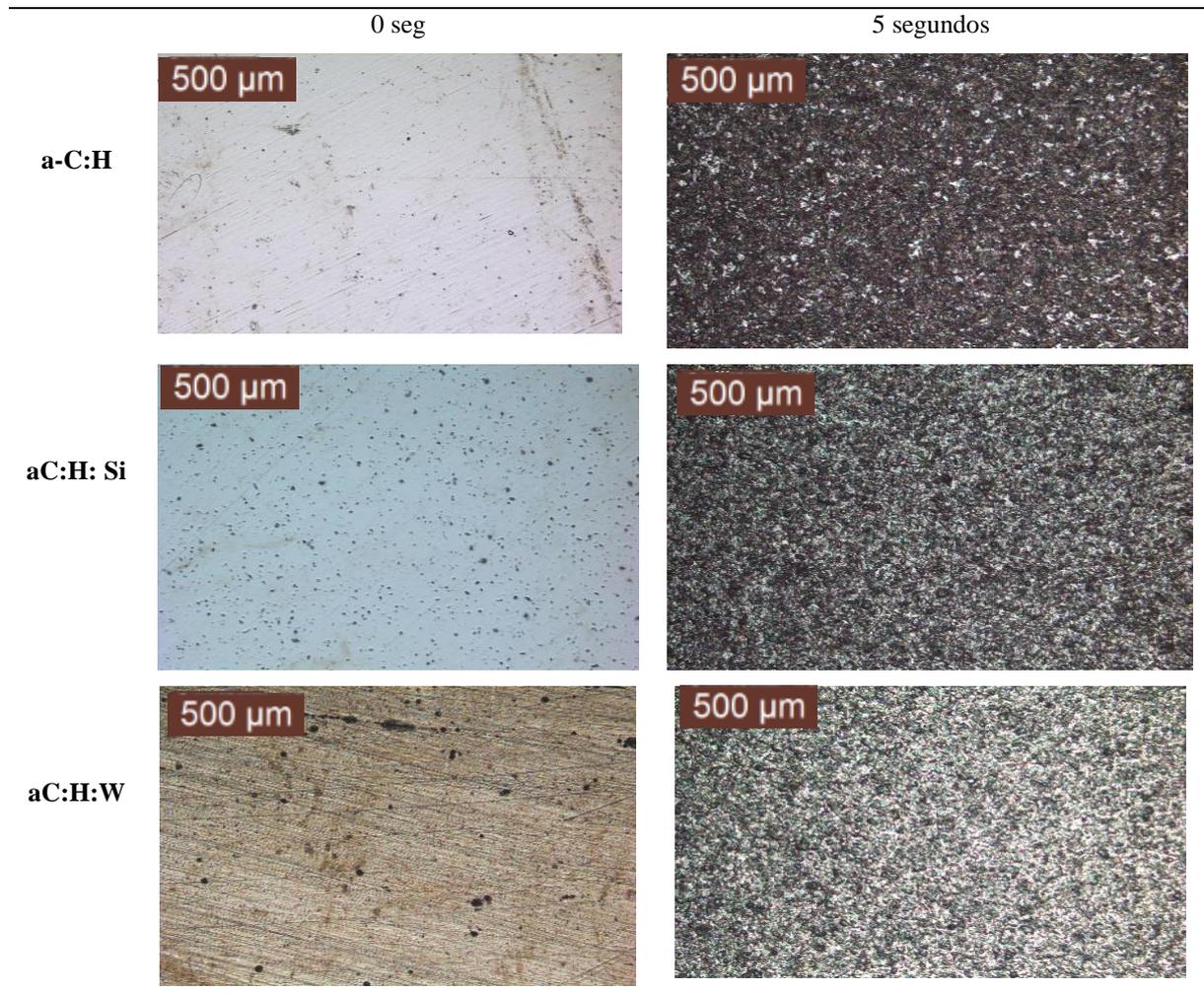
- **a-C:H:** La falla del recubrimiento comenzó después de 30 segundos de prueba. La eliminación completa se produjo a los 210 segundos, dejando solo pequeños rastros de recubrimiento en el sustrato.
- **a-C:H:Si:** El proceso de degradación comenzó después de 10 segundos, con una falla total identificada a los 150 segundos. Este fue el recubrimiento con la eliminación completa más temprana, sin dejar rastro en el sustrato.
- **a-C:H:W:** El proceso de degradación comenzó a los 90 segundos y no se registró una falla completa incluso después de 420 segundos de prueba.

#### Recubrimientos sobre sustrato de acero inoxidable

En contraste marcado con los resultados sobre acero para herramientas, los tres recubrimientos DLC sobre

sustrato de acero inoxidable mostraron un comportamiento de falla rápida:

Todos los recubrimientos (a-C:H, a-C:H:Si, a-C:H:W) se eliminaron completamente del sustrato después de solo 10 segundos de exposición a la erosión. Incluso en pruebas adicionales de 5 segundos, los recubrimientos se eliminaron completamente, imposibilitando el rastreo del momento exacto de la falla.



**Figura 1** Resultados de la erosión de a-C:H, a-C:H:Si, a-C:H:W en sustrato de acero inoxidable.

#### 4 Discusiones

Los resultados obtenidos revelan diferencias significativas en el comportamiento erosivo de los recubrimientos DLC, que pueden atribuirse tanto a las características intrínsecas de los recubrimientos como a la influencia del material del sustrato.

**Influencia de la composición del recubrimiento:** Entre los recubrimientos sobre sustrato de acero para herramientas, el a-C:H:W demostró la mayor resistencia a la erosión, seguido por el a-C:H, mientras que el a-C:H:Si mostró el peor rendimiento. Este comportamiento puede explicarse por las diferencias en las propiedades mecánicas de los recubrimientos:

- a-C:H:W: A pesar de tener la menor dureza (14 GPa), su alto módulo elástico (220 GPa) puede contribuir a una mejor absorción de energía durante el impacto de las partículas.
- a-C:H: Con una dureza intermedia (21 GPa) y un módulo elástico alto (210 GPa), muestra un rendimiento equilibrado.
- a-C:H:Si: Su menor módulo elástico (150 GPa) podría explicar su menor resistencia a la erosión, a pesar de tener una dureza intermedia (16 GPa).

Estos resultados sugieren que, en condiciones de erosión severa, la capacidad de absorción de energía del recubrimiento (relacionada con su módulo elástico) puede ser más crítica que su dureza para determinar la resistencia a la erosión. [23,24]

**Influencia del material del sustrato:** La diferencia dramática en el rendimiento de los recubrimientos entre los sustratos de acero para herramientas y acero inoxidable subraya la importancia crucial del material del sustrato en

la resistencia a la erosión de los sistemas recubrimiento-sustrato.

El acero para herramientas endurecido, con su mayor dureza y resistencia, proporciona un soporte más efectivo al recubrimiento DLC. Esto permite que el sistema recubrimiento-sustrato distribuya mejor la energía de impacto de las partículas erosivas, retrasando la falla del recubrimiento.

En contraste, el acero inoxidable, siendo más blando y dúctil, se deforma más fácilmente bajo el impacto de las partículas. Esta deformación del sustrato puede conducir a la flexión y fractura prematura del recubrimiento DLC, que es inherentemente frágil debido a su alta dureza. [25]

#### **Implicaciones para el diseño de sistemas recubrimiento-sustrato**

Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para el diseño de sistemas recubrimiento-sustrato resistentes a la erosión: La selección del material del sustrato es tan crucial como la del recubrimiento. Un sustrato duro y resistente es esencial para proporcionar el soporte necesario al recubrimiento DLC en condiciones de erosión severa. En la selección de recubrimientos DLC, se debe considerar no solo la dureza, sino también el módulo elástico y la tenacidad. Un balance óptimo entre estas propiedades puede proporcionar la mejor resistencia a la erosión. Para aplicaciones en condiciones de erosión severa sobre sustratos relativamente blandos, podrían ser necesarias estrategias adicionales, como el uso de capas intermedias o recubrimientos multicapa, para mejorar la resistencia a la erosión del sistema.

## **5 Conclusión**

Los resultados de esta investigación destacan el éxito en el desarrollo y validación de una plataforma de erosión seca, que ha demostrado ser eficaz para evaluar el rendimiento de recubrimientos de carbono tipo diamante (DLC) bajo condiciones controladas de erosión por partículas sólidas. Los resultados indican que los recubrimientos DLC presentan una resistencia a la erosión significativamente mejorada en comparación con los sustratos sin recubrir, especialmente cuando se aplican sobre sustratos duros como el acero para herramientas endurecido. Entre los diferentes recubrimientos evaluados, el carbono amorfo dopado con tungsteno (a-C:H:W) mostró la mayor resistencia a la erosión, seguido por el carbono amorfo hidrogenado (a-C:H) y el carbono amorfo dopado con silicio (a-C:H:Si). Este hallazgo sugiere que en condiciones de erosión severa, un alto módulo elástico puede ser más crítico que la dureza del recubrimiento.

Adicionalmente, se resaltó la importancia del material del sustrato, ya que los sustratos más duros y resistentes proporcionan un mejor soporte para los recubrimientos, optimizando así su rendimiento. Se recomienda adoptar un enfoque de diseño integral que considere tanto las propiedades del recubrimiento como las del sustrato para maximizar la resistencia a la erosión del sistema completo. La utilidad del Método Neutrosófico en este contexto es evidente, ya que permite una evaluación más precisa y completa del comportamiento de los recubrimientos DLC en entornos de erosión severa. Estos hallazgos son fundamentales para el diseño y selección de sistemas de recubrimiento, abriendo nuevas vías para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito de los recubrimientos DLC.

## **Referencias**

- [1] I. Finnie, "Some reflections on the past and future of erosion," *Wear*, vol. 186, pp. 1-10, 1995.
- [2] A. Algahtani, A. Neville, S. Shrestha, and T. Liskiewicz, "Erosion resistance of surface engineered 6000 series aluminium alloy," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 227, no. 11, pp. 1204-1214, 2013.
- [3] T. Su, X. Ma, J. Tong, H. Ji, Z. Qin, and Z. Wu, "Surface engineering of MXenes for energy and environmental applications," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 10, no. 19, pp. 10265-10296, 2022.
- [4] C. Donnet, and A. Erdemir, *Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications*: Springer Science & Business Media, 2007.
- [5] J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon. Materials Science & Engineering R-Reports," 2002.
- [6] S. V. Hainsworth, and N. Uhure, "Diamond like carbon coatings for tribology: production techniques, characterisation methods and applications," *International materials reviews*, vol. 52, no. 3, pp. 153-174, 2007.
- [7] E. Dalibón, L. Escalada, S. Simison, C. Forsich, D. Heim, and S. Brühl, "Mechanical and corrosion behavior of thick and soft DLC coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 312, pp. 101-109, 2017.
- [8] P. Shipway, and I. Hutchings, "Measurement of coating durability by solid particle erosion," *Surface and Coatings Technology*, vol. 71, no. 1, pp. 1-8, 1995.
- [9] F. Smarandache, "Neutrosophia y Plitogenia: fundamentos y aplicaciones," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 17, no. 8, pp. 164-168, 2024.
- [10] F. Smarandache, "Significado Neutrosófico: Partes comunes de cosas poco comunes y partes poco comunes de cosas comunes," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 18, no. 1, pp. 1-14, 2025.
- [11] B. Bron Fonseca, and O. Mar Cornelio, "Método para el análisis lingüístico de estadísticas médica," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 18, no. 1, pp. 110-127, 2025.

- [12] O. Mar, R. C. Jiménez Hernández, and B. B. Fonseca, "Procedimiento para determinar el índice de control organizacional," *Revista Infociencia*, abril-junio, Año 2014, vol. 18, no. 2, 2014.
- [13] N. B. Hernández, N. V. Izquierdo, M. Leyva-Vázquez, and F. Smarandache, *Validation of the pedagogical strategy for the formation of the competence entrepreneurship in high education through the use of neutrosophic logic and Iadov technique*: Infinite Study, 2018.
- [14] B. B. Fonseca, O. M. Cornelio, and I. P. Pupo, "Sistema de recomendaciones sobre la evaluación de proyectos de desarrollo de software," *Revista Cubana de Informática Médica*, vol. 13, no. 2, 2021.
- [15] B. B. Fonseca, O. M. Cornelio, and F. R. R. Marzo, "Tratamiento de la incertidumbre en la evaluación del desempeño de los Recursos Humanos de un proyecto basado en conjuntos borrosos," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 13, no. 6, pp. 84-93, 2020.
- [16] M. Cornelio, "Estación de trabajo para la práctica de Microbiología y Parasitología Médica en la carrera de medicina integrado al sistema de laboratorios a distancia," *Revista de Ciencias Médicas de Pinar del Río*, vol. 20, no. 2, pp. 174-181, 2016.
- [17] N. Caedentey Moreno, and O. Mar-Cornelio, "Monitoreo energético en los laboratorios de la Universidad de las Ciencias Informáticas," *Ingeniería Industrial*, vol. 37, no. 2, pp. 190-199, 2016.
- [18] S. J. McMaster, "Nanomechanical Characterisation of Diamond-like Carbon Coatings for Tribological Performance (In progress)," School of Mechanical Engineering University of Leeds, 2019.
- [19] Vázquez, Á. B. M., Carpio, D. M. R., Faytong, F. A. B., & Lara, A. R. "Evaluación de la satisfacción de los estudiantes en los entornos virtuales de la Universidad Regional Autónoma de Los Andes". *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 2024.
- [20] Romero, A. V., Sánchez, F. M., & Estupiñán, C. P. "Inteligencia artificial en gestión hotelera: aplicaciones en atención al cliente". *El patrimonio y su perspectiva turística*, pp. 409-423, 2024.
- [21] Márquez Carriel, D. C., Oña Garcés, L., Vergara Romero, A., & Márquez Sánchez, F. "Assessing the need for a feminist foreign policy in Ecuador through a sentiment analysis based on neutroAlgebra". *Neutrosophic Sets and Systems*, vol. 71, num. 1, pp. 16, 2024.
- [22] Vergara-Romero, A., Macas-Acosta, G., Márquez-Sánchez, F., & Arencibia-Montero, O. "Child Labor, Informality, and Poverty: Leveraging Logistic Regression, Indeterminate Likert Scales, and Similarity Measures for Insightful Analysis in Ecuador". *Neutrosophic Sets and Systems*, vol 66, pp 136-145, 2024
- [23] von Feigenblatt, O. F. "Research Ethics in Education. In *Ethics in Social Science Research: Current Insights and Practical Strategies*", pp. 97-105. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025.
- [24] von Feigenblatt, O. F. "Immediacy and Sustainable Development: The Perspective of Youth". *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época REMEF*, vol. 19, num 2, 2024
- [25] de León, E. R., Marqués, L. L., Poleo, A., & von Feigenblatt, O. F. "El estilo del liderazgo educativo en el proceso de enseñanza: una revisión de la literatura". In *Anales de la Real Academia de Doctores*. vol. 9, num. 2, pp. 289-308, 2024

Recibido: febrero 19, 2025. Aceptado: marzo 09, 2025