

This article is featured in the Special Issue on TRIBOLOGY

Guest editors:

Ezequiel Alberto GALLARDO HERNÁNDEZ | Instituto Politecnico Nacional

Manuel VITE TORRES | Instituto Politecnico Nacional

Nelson Federico GARZA MONTES DE OCA | Universidad Autónoma de Nuevo León

César SEDANO DE LA ROSA | Universidad de Guadalajara

Análisis en tiempo real de micropartículas de desgaste mediante
microabrasión por ball cratering: integración de captura óptica,
calibración de fuerza y cuantificación tribológica

*Real-time Analysis of Wear Microparticles by Microabrasion through Ball Cratering:
Integration of Optical Capture, Force Calibration, and
Tribological Quantification*

Mitzi Matias Matias

Tecnológico Nacional de México | MÉXICO

Leonardo Martínez Marcelo

Tecnológico Nacional de México | MÉXICO

Minerva Teresa Chimal Benhumea

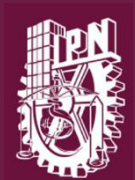
Tecnológico Nacional de México | MÉXICO

Tomas De la Mora Ramirez

Tecnológico Nacional de México | MÉXICO

<https://cientifica.site>

Recibido 03/06/2026, aceptado 20/06/2026, publicado 25/06/2026.



Análisis en tiempo real de micropartículas de desgaste mediante microabrasión por ball cratering: integración de captura óptica, calibración de fuerza y cuantificación tribológica

Real-time Analysis of Wear Microparticles by Microabrasion through Ball Cratering: Integration of Optical Capture, Force Calibration, and Tribological Quantification

Mitzi Matias Matias ¹
Leonardo Martínez Marcelo ²
Minerva Teresa Chimal Benhumea ³
Tomas De la Mora Ramirez ^{4*}

Tecnológico Nacional de México,
Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán,
MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0003-2033-7567 / mitzi.matias4@outlook.es

² ORCID: 0009-0004-8011-2615 / martinez_marcelo@live.com

³ ORCID: 0009-0009-1856-2304 / minervachimal020202@gmail.com

^{4*} ORCID: 0000-0001-6594-2777 / tomas.delamora@tesjo.edu.mx

* Corresponding author

<https://cientifica.site>

Recibido 03/06/2026, aceptado 20/06/2026, publicado 25/06/2026.



Resumen

En este trabajo se estudió la evolución de la huella de desgaste generada en una probeta de policarbonato sólido durante ensayos de microabrasión en seco mediante la prueba de ball cratering. El análisis se realizó a partir de tres videos obtenidos por microscopía óptica a una magnificación de 500X, lo que permitió seguir la evolución del cráter durante la prueba. La probeta evaluada fue de 6 mm de espesor y 25 mm de diámetro, las pruebas se realizaron en seco bajo una velocidad de 200 rpm, a una carga normal de 200 g (1.961 N) y el uso de una esfera de acero AISI 52100 de 25 mm de diámetro. El material se seleccionó debido a la transparencia del policarbonato, lo que permitió la observación óptica del contacto y su modificación superficial. A partir de los videos experimentales se extrajeron secuencias temporales a tiempo determinados. La evidencia visual mostró que la huella se forma progresivamente, pasando por una etapa inicial de establecimiento del contacto, seguida por oscurecimiento central, definición del borde y acumulación o redistribución de partículas. La morfología se observa como un mecanismo dominante de abrasión por microarado, acompañado por la participación intermitente de partículas como tercer cuerpo. El análisis de las gráficas de señal fuerza-tiempo permitió distinguir corridas estables. El volumen del cráter obtuvo un valor central de 0.000245 mm³ para una huella promedio de 0.5 mm y un coeficiente de fricción (COF) promedio de 0.0702, 0.0640 y 0.0624. En conjunto, las imágenes, la señal de fuerza, el COF y el cálculo geométrico del volumen permitieron interpretar el desgaste con mayor cuidado, sin depender únicamente del diámetro final de la huella, así como el uso de datos para futuras simulaciones numéricas a niveles micrométricos.

Palabras clave: microdesgaste en seco, ball cratering, policarbonato, huella de desgaste, microscopía óptica, abrasión, microsurcado, tercer cuerpo.

2

Abstract

In this study, the evolution of the wear scar produced on a solid polycarbonate specimen during dry micro-abrasion tests was investigated using the ball-cratering technique. The analysis was based on three videos recorded by optical microscopy at 500× magnification, which made it possible to monitor the evolution of the crater during the test. The evaluated specimen was 6 mm thick and 25 mm in diameter. The tests were performed under dry conditions at a rotational speed of 200 rpm, with a normal load of 200 g, equivalent to 1.961 N, using a 25 mm-diameter AISI 52100 steel ball. Polycarbonate was selected because of its transparency, which enabled optical observation of the contact zone and the resulting surface modification.

Time-resolved image sequences were extracted from the experimental videos at selected intervals. The visual evidence showed that the wear scar developed progressively, beginning with the establishment of contact, followed by central darkening, edge definition, and the accumulation or redistribution of particles. The observed morphology suggests that micro-ploughing abrasion was the dominant wear mechanism, accompanied by the intermittent participation of particles acting as a third body. The analysis of the force–time signal plots made it possible to identify stable test runs. The crater volume showed a central value of 0.000245 mm³ for an average wear scar diameter of 0.5 mm, while the average coefficients of friction (COF) were 0.0702, 0.0640, and 0.0624.

Overall, the integration of optical images, force signals, COF measurements, and the geometric calculation of crater volume allowed a more careful interpretation of the wear process, without relying solely on the final wear scar diameter. This data also provide a useful basis for future numerical simulations at the micrometric scale.

Index terms: dry micro-wear, ball cratering, polycarbonate, wear scar, optical microscopy, abrasive wear, micro-ploughing, third body.

I. INTRODUCCIÓN

La técnica de microabrasión por cráteres de bola ha sido ampliamente utilizada en el estudio del desgaste localizado de metales, polímeros y recubrimientos, ya que permite producir una marca relativamente pequeña y estimar el volumen del material removido mediante relaciones geométricas simples. Rutherford y Hutchings desarrollaron una de las bases más influyentes de este método, tanto desde la perspectiva experimental como teórica; que podría funcionar en tales sistemas con baja pérdida de material y un tamaño de cráter pequeño [1].

La prueba no debe limitarse al diámetro final de la marca. Trezona, Allsopp y Hutchings mostraron que la microabrasión puede cambiar entre abrasión de dos cuerpos y regiones impactadas por partículas dependiendo de la condición de contacto [2]. En la misma línea, Adachi y Hutchings propusieron mapas de modos de desgaste que ayudan a explicar la presencia relativa de ranurado, rodadura de partículas y abrasión mixta [3].

En pruebas en seco, la ausencia de lubricante o lodo hace que las partículas generadas por el contacto en sí sean más relevantes. Estas partículas pueden permanecer en la interfaz, compactarse o ser arrastradas y, si no son arrastradas, pueden actuar como un tercer cuerpo, cambiando la forma de la marca y el comportamiento dinámico del sistema. Gates advirtió que la separación de la abrasión de dos cuerpos de la abrasión de tres cuerpos debe considerarse cuidadosamente, y Cozza, Tanaka y Souza sugieren que en el caso de registrar fuerza o fricción es útil registrar la fuerza (o fricción) para medir cuándo cambia el régimen durante la prueba [4].

El material transparente de policarbonato, se capturan imágenes del proceso y se observa el proceso de contacto, cómo se modifica el centro del cráter y cómo las partículas se acumulan en el medio. Esto hace que la lectura tribológica sea más robusta para pruebas en seco donde la movilidad y permanencia de las partículas en la huella son importantes. Por lo tanto, el propósito de este estudio fue investigar la evolución temporal de la marca de microdesgaste en una muestra sólida de policarbonato producida por la técnica de cráteres de bola en condiciones secas, en una bola de acero AISI 52100 de 25 mm de diámetro, girando a 200 rpm y 200 g. Para este propósito, las secuencias ópticas obtenidas a 500X de aumento se combinaron con la señal de fuerza dinámica para describir la formación progresiva del cráter y el mecanismo de desgaste dominante y para estimar preliminarmente el volumen. La evolución morfológica de la marca también se vinculó a la acumulación de partículas y la respuesta de fuerza-tiempo a la formación de la marca para proporcionar una mejor interpretación tribológica del proceso de microdesgaste en seco.

II. DESARROLLO

La figura 1, muestra la metodología del proceso para la obtención del video para el análisis de huellas de desgaste en tiempo real.

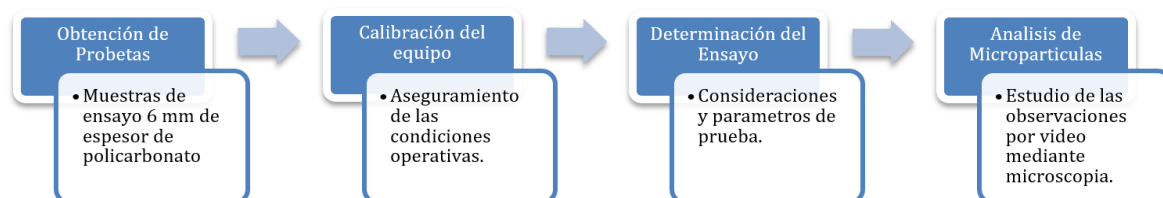


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología llevada a cabo.

Material de estudio y condición de ensayo

El material evaluado fue una probeta circular de policarbonato sólido con 6 mm de espesor y 25 mm de diámetro. Una condición experimental fundamental fue que todas las pruebas se realizaron en seco, sin lubricante y sin suspensión abrasiva líquida. La transparencia del material permitió registrar el área de contacto mediante microscopía óptica a 500X en tiempo real de prueba.

Configuración experimental del ensayo de microdesgaste

El microdesgaste se evaluó mediante una configuración tipo ball cratering. Se empleó una esfera de acero AISI 52100 de 25 mm de diámetro en contacto con la probeta, una velocidad de rotación de 200 rpm y una carga normal de 200 g, equivalente a 1.961 N. La huella de desgaste reportada fue de 0.5 ± 0.1 mm de diámetro. Estas condiciones se utilizaron para la interpretación visual del proceso y para la estimación del volumen de desgaste.

La selección del acero AISI 52100 se consideró adecuada para este tipo de ensayo debido a su uso frecuente como acero de rodamientos y contraparte esférica en pruebas tribológicas, proporcionando una superficie rígida y resistente al desgaste frente al policarbonato evaluado.

Parámetros experimentales

La tabla 1 muestra los materiales y condiciones que se utilizaron durante la prueba de microabrasión.

4 TABLA 1
PARÁMETROS PRINCIPALES DEL ENSAYO DE MICRODESGASTE EN SECO Y GEOMETRÍA DEL SISTEMA.

| Parámetro | Valor | Observación |
|-----------------------|-------------------------------------|--|
| Material de probeta | Policarbonato sólido | Probeta transparente para observación óptica |
| Condición de ensayo | En seco | Sin lubricante ni slurry |
| Dimensiones | 6 mm de espesor; 25 mm de diámetro | Probeta circular |
| Aumento óptico | 500X | Captura de video en formato mp4 del contacto entre superficies |
| Velocidad de rotación | 200 rpm | Condición nominal de ensayo |
| Carga normal | 200 g = 1.961 N | Carga aplicada |
| Bola de ensayo | acero AISI 52100; 25 mm de diámetro | Acero AISI 52100; R = 12.5 mm |

Adquisición de video y extracción de secuencias temporales

Se examinaron tres videos con un microscopio óptico montado en la máquina para pruebas de microdesgaste bajo las mismas condiciones. El Video 1 se mostró a los 30, 90, 150, 270, 390, 510, 630 y 720 segundos, mientras que los Videos 2 y 3 se mostraron a los 30, 90, 150, 210, 270 y 299 segundos. En todos los casos, solo se recortó la región donde progresa la marca de desgaste.

Tratamiento de la señal dinámica

La respuesta del sistema se registró con una celda de carga conectada a un Arduino y se adquirió utilizando el software CoolTerm. Los archivos de texto se limpiaron para mantener las filas numéricas de lectura, tiempo, masa equivalente,

fuerza y señal en bruto. Para cada ejecución, se calcularon el tiempo de prueba, la distancia de deslizamiento, la fuerza dinámica aparente promedio en valor absoluto, la dispersión, la fuerza máxima, un índice de fricción aparente y un coeficiente preliminar de desgaste específico.

Estimación del volumen de desgaste

El volumen del cráter se estimó empleando la ecuación (1) para cráter esférico pequeño [5].

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad (1)$$

Donde:

V , volumen de desgaste a microescala;

b , diámetro de la huella;

R , radio de la esfera;

Para $b = 0.5$ mm y $R = 12.5$ mm se obtuvo un valor central de 0.000245 mm³.

Considerando la variación de ± 0.1 mm en el diámetro de la huella, el rango estimado del volumen fue de 0.000101 a 0.000509 mm³.

5

III. RESULTADOS

La tabla 2 muestra los resultados técnicos de las pruebas de microdesgaste, el diámetro de la huella de desgaste se obtuvo mediante el software de ImageJ, el volumen central de desgaste se calculó con la ecuación 1

TABLA 2

PARÁMETROS PRINCIPALES DEL ENSAYO DE MICRODESGASTE EN SECO Y ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE DESGASTE A MICROESCALA.

| Parámetro | Valor | Observación |
|---------------------------|---|-------------------------------|
| Huella de desgaste | 0.5 ± 0.1 mm | Diámetro promedio reportado |
| Volumen central | 0.000245 mm ³ | Estimado con $b = 0.5$ mm |
| Rango estimado de volumen | 0.000101 a 0.000509 mm ³ | Estimado con $b = 0.4-0.6$ mm |

Evolución temporal de la huella de desgaste

Los gráficos de las figuras muestran las imágenes actualizadas del área del cráter y el área local de la huella de desgaste. Las micrografías se han tomado a los 30 segundos para enfocarse en las etapas ligeramente posteriores del proceso y tener una mejor vista del contorno del cráter y la redistribución local de partículas.

En la Figura 2, a los 30 segundos, la primera marca de desgaste comienza a aparecer en el área de estudio, con una región central donde el contraste está cambiando y la uniformidad de la superficie en esta región se pierde parcialmente. Esta primera etapa es el comienzo del contacto entre la bola de acero y el policarbonato. Dado que es un polímero relativamente dúctil en comparación con un material metálico rígido, la primera reacción no significa que el material

se elimine inmediatamente, sino que solo se deforma y se alisa parcialmente y se mueve lentamente hacia los bordes del área de contacto.

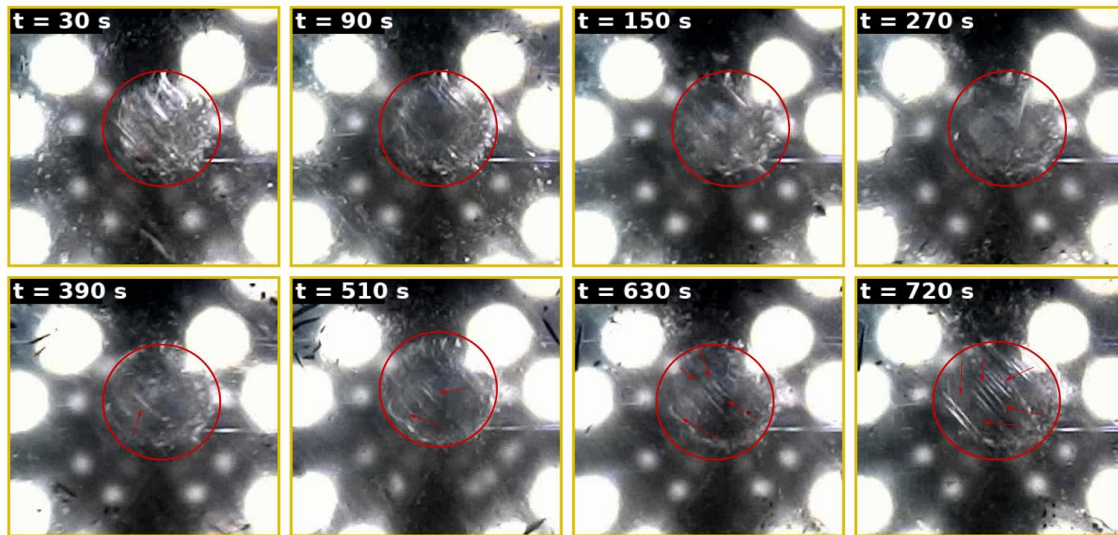


Fig. 2. Secuencia de desgaste de 30 s a 720 s. Zona de la huella de desgaste a 500X.

6

De 90 a 150 segundos, la huella es más visible, con un área central más prominente y una mayor heterogeneidad de contraste. Este cambio sugiere que el contacto no comenzó como un asentamiento inicial, sino que comenzó a desarrollarse en un cráter de desgaste. En este punto, pueden existir la deformación plástica de la superficie del polímero, la compactación de partículas finas y el arrastre de material por la trayectoria relativa de la esfera.

Cuando el tiempo se escala de 210 a 299 segundos, comenzamos a ver surcos que van en la dirección del deslizamiento (flechas en la secuencia). Aunque los tiempos mostrados en la figura más adelante aumentan a 270, 390, 510, 630 y 720 segundos, la progresión de las líneas orientadas permite identificar el inicio del mecanismo abrasivo por arado. En este mecanismo, la contraparte o las partículas atrapadas no cortan completamente el material desde el primer contacto, sino que lo empujan lateralmente (de modo que pueden crear canales, crestas u otros depósitos periféricos). Tal comportamiento se vuelve característico para el contacto abrasivo en seco de polímeros, ya que la fricción puede causar deformación localizada antes de que el material se desprenda completamente. La morfología no corresponde a un pulido homogéneo porque hay trazas lineales, desplazamiento de material y zonas de acumulación. No tiene las mismas características que el microcorte puro, y es difícil decir si es microcorte puro, ya que la evidencia óptica es de material empujado y redistribuido, en lugar de una eliminación limpia y continua del material. Así, la Figura 2 muestra un régimen de desgaste abrasivo principalmente de dos cuerpos, con partículas actuando como un tercer cuerpo cuando el material desprendido queda temporalmente atrapado en la pista.

En la Figura 3, las manchas negras observadas en la huella y alrededor de la huella deben verse principalmente como las capas de acumulación, atrapamiento o compactación de partículas de desgaste, junto con efectos ópticos (ya que son causadas por el relieve del cráter). En una prueba en seco, el material que ha sido removido del policarbonato no tiene que ser lavado por el lubricante o la lechada, por lo que permanece en la interfaz y forma una película de tercer cuerpo discontinua o es compacto en áreas con alta presión local. El color oscuro también puede intensificarse por sombras locales (falta de transparencia del polímero en el área dañada, rugosidad y cambio de reflexión de la luz).

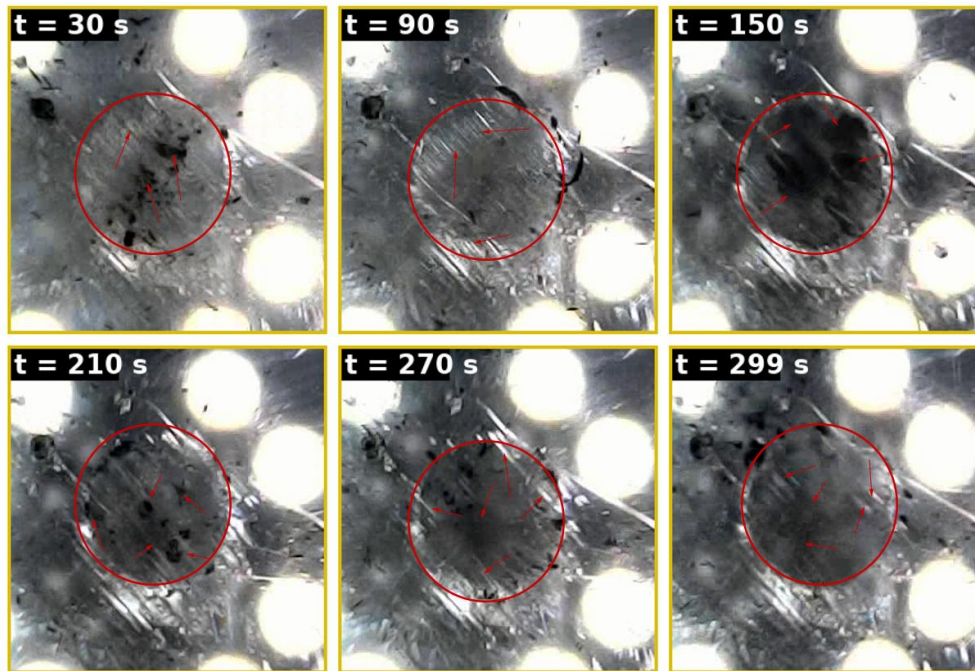


Fig. 3. Secuencia de 30n s a 299 s- La secuencia evidencia la progresión local del cráter, el oscurecimiento central y la definición paulatina del borde de la huella.

7

Vemos que a los 30 segundos el centro de la huella no está bien definido, pero ya hay contacto al final de la huella. A los 90 y 150 segundos hay más contraste que vemos a la izquierda (con trazas más finas) y una distribución más amplia de material oscuro, lo que significa que estamos empezando a ver las partículas involucrarse en el contacto. El borde del cráter está claramente definido entre los 210 y 270 segundos y hay acumulación periférica debido al desplazamiento lateral del polímero y la compactación de partículas finas desprendidas.

A los 299 segundos, las marcas en las líneas direccionales, surcos y áreas de material desplazado hacia los bordes dominan, en lugar de una superficie uniformemente pulida o remoción por corte limpio. El desprendimiento de material y la formación de surcos ocurre cuando la esfera rígida, las asperezas de contacto o las partículas atrapadas aran la superficie del polímero. Sin embargo, en este último caso, el material se mueve lateralmente y forma canales o crestas y una porción de material se elimina y otra se redistribuye. Los residuos en contacto seco pueden quedar atrás o ser arrastrados y fomentar aún más la formación de surcos y la heterogeneidad de la huella.

Por lo anterior, la Figura 3 se interpreta como un caso de desgaste abrasivo mixto. El mecanismo dominante es microabrasión, pero la presencia de manchas oscuras y material acumulado indica intervención de tercer cuerpo. Esta combinación de microabrasión, donde el contacto puede alternar entre la abrasión de dos cuerpos, cuando domina la acción directa de la contraparte rígida, y abrasión de tres cuerpos, cuando las partículas atrapadas participan activamente en el daño superficial.

Como se muestra en la Figura 4, las áreas oscuras corresponden a regiones donde la superficie ha cambiado significativamente durante el contacto (las partículas se mueven, las piezas de material caído se presionan juntas y se dañan) y el color en la superficie se ve afectado por la curvatura local del cráter. Como el policarbonato no es

completamente transparente y la luz del microscopio no es brillante, las áreas más oscuras son más irregulares y delgadas o la superficie parece aparecer con una intensidad de luz más baja. Por lo tanto, el oscurecimiento no debe interpretarse como una nueva fase química sin ningún análisis, sino como un signo óptico de cambio de superficie y material desprendido o redistribuido.

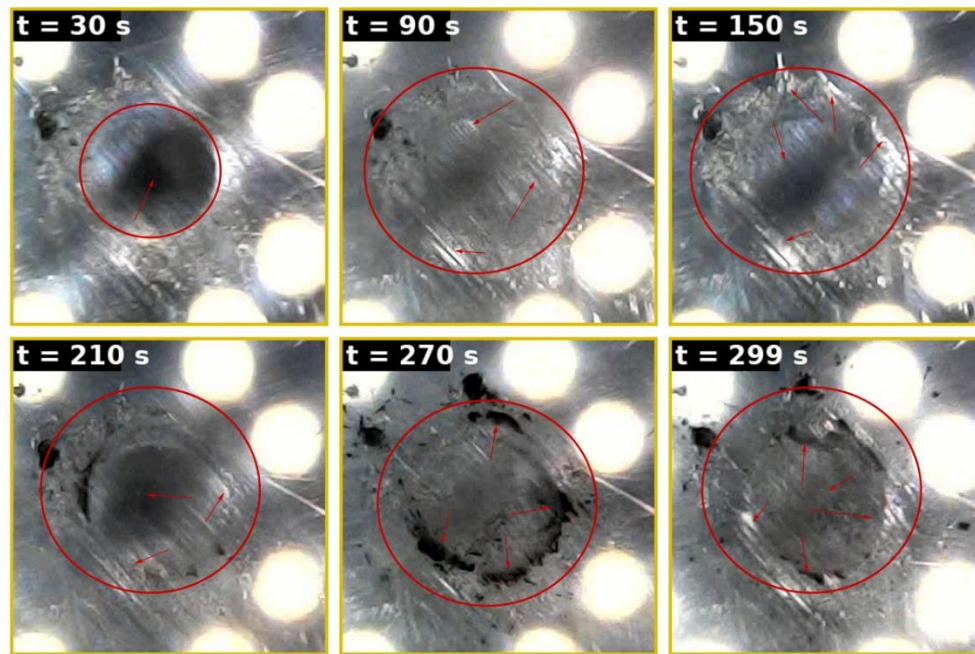


Fig. 4. Secuencia temporal actualizada del Video C. Se observa la evolución del cráter, la acumulación periférica de material y la morfología asociada al desgaste en seco.

Entre 30 y 150 segundos, el material se desplaza en la zona de contacto al cambiar la forma de la región oscura, el color de las líneas y el contraste. El fenómeno es compatible con la deformación plástica superficial del polímero y la acción de arado por la bola o partículas atrapadas. En esos momentos, el contacto sigue evolucionando y la huella se vuelve más prominente y el material desplazado en el borde o en el cráter comienza a organizarse.

Las áreas negras en la Figura 4 pueden asociarse con materiales compactados o material transferido o material polimérico altamente deformado atrapado en la interfaz. En condiciones secas, es probable que estas partículas permanezcan en contacto y también formen una capa de tercer cuerpo. Esta parte puede romperse, compactarse, ser expulsada al borde o de regreso al contacto. Este comportamiento explica por qué la huella muestra regiones oscuras no uniformes, bordes que se acentúan con acumulación y regiones internas con contraste variable.

El tipo de desgaste visto en la Figura 4 es abrasión por surcos donde están presentes materiales desprendidos. Se forma por la bola de acero AISI 52100 actuando como contraparte rígida contra el policarbonato y creando presión de contacto para ellos. A medida que avanza el deslizamiento, las asperezas y partículas deforman el polímero y empujan el material hacia los lados produciendo surcos y acumulación. Cuando el nivel local de desgaste empeora, parte de este material desplazado se desprende y se queda atrapado en la huella. La evolución de 210 a 299 segundos muestra una

huella más estabilizada, con un cráter más claro y áreas oscuras que persisten por partículas compactadas y daño superficial.

La Figura 5 muestra el coeficiente de fricción aparente promedio (COF) obtenido en los tres videos en términos de la relación entre la fuerza dinámica registrada y la carga normal fija aplicada durante la prueba. Los valores provienen de pruebas de microdesgaste en seco, como antes, bajo las mismas condiciones nominales de operación. El COF promedio más alto registrado por el Video 1 fue de 0.0702, mientras que el más bajo fue el Video 2 con 0.0640 y el Video 3 con 0.0624. Aunque las diferencias entre los valores promedio son pequeñas, la barra de error para el Video 1 muestra más variación durante la prueba. Esto podría deberse a la acumulación de residuos y pequeños alineamientos o cambios locales en el área de contacto.

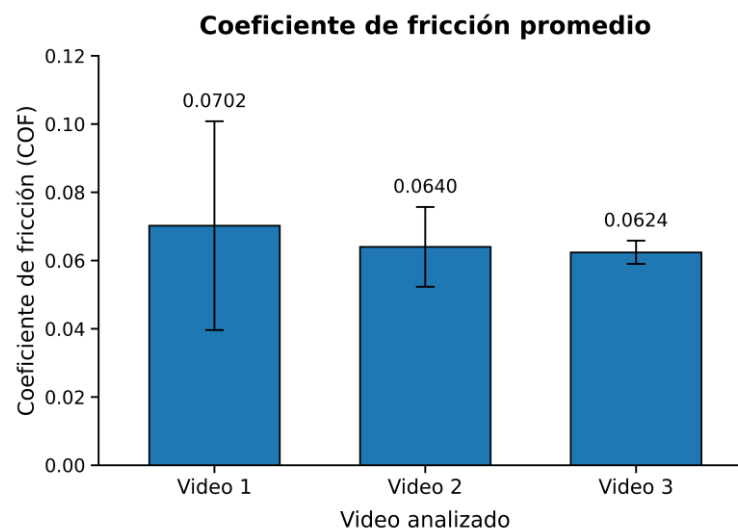


Fig. 5. Gráfica de coeficiente de fricción promedio de los videos analizados durante las pruebas de microdesgaste en seco.

La Tabla 3 resume los resultados cuantitativos de las pruebas de microdesgaste en seco. El número de prueba, el tiempo de adquisición, la distancia de deslizamiento estimada, la fuerza dinámica promedio, la fuerza máxima, el coeficiente de fricción y el coeficiente de desgaste específico preliminar se muestran en la tabla. Los tres videos muestran los valores del COF muy cercanos entre sí en el rango de 0.0624 a 0.0702. El Video 1 muestra la mayor fuerza dinámica promedio y el COF más alto, mientras que el Video 3 presenta la menor dispersión de fuerza y un contacto más estable en la prueba. El coeficiente de desgaste específico estimado está en el orden de 10^{-9} $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$, con valores de 0.499, 0.624 y 0.613×10^{-9} $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ para los Videos 1, 2 y 3, respectivamente.

TABLA 3
RESULTADOS CUANTITATIVOS OBTENIDOS DEL CONJUNTO DE PRUEBAS DE MICRODESgaste EN SECO.

| Prueba | Tiempo (s) | s (mm) | F media \pm DE (N) | F max (N) | COF | K $\times 10^{-9}$ ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$) |
|---------|------------|--------|-----------------------|------------|--------|---|
| Video 1 | 958.19 | 250854 | 0.1377 \pm 0.0600 | 0.22 | 0.0702 | 0.499 |
| Video 2 | 766.16 | 200580 | 0.1255 \pm 0.0229 | 0.16 | 0.064 | 0.624 |
| Video 3 | 780.18 | 204251 | 0.1224 \pm 0.0067 | 0.14 | 0.0624 | 0.613 |

IV. DISCUSIÓN

Las micrografías oportunas indican que la huella de desgaste no se desarrolla instantáneamente, sino más bien a través de una secuencia progresiva de contacto, deformación de la superficie, formación de surcos y acumulación local de partículas. Este comportamiento es consistente con la interpretación clásica de la prueba de microabrasión con bola rotativa, donde la morfología del cráter y su evolución temporal son criterios importantes para identificar el régimen de desgaste, así como el diámetro final de la huella [1].

En la Figura 2, a los 30 segundos ya se ha identificado una marca de desgaste inicial, como una zona de contraste irregular en el área de contacto. Este es el inicio del asentamiento de la bola de acero AISI 52100 y el policarbonato, con deformación localizada y suavizado de asperezas (y en tiempos más largos se observa una tendencia hacia surcos orientados). Las líneas direccionales y el material empujado hacia los bordes indican un proceso abrasivo dominante, ya que la evidencia óptica sugiere empuje y redistribución del polímero antes de que se rompa. Esto es consistente con los mapas de Adachi y Hutchings, donde el surcado se asocia con la dirección y orientación producidas por el contacto abrasivo efectivo [3].

En la Figura 3, vemos manchas negras como áreas de acumulación o compactación de partículas y sombreado óptico como resultado del relieve, rugosidad y pérdida local de transparencia del policarbonato. En condiciones secas, donde no hay lubricante o lodo para eliminar el material de la superficie, las partículas pueden permanecer en la interfaz y a veces actuar como un tercer cuerpo. Como consecuencia, la huella no parece homogénea y hay partes oscuras, bordes con material acumulado y trazas lineales. A los 299 segundos, los surcos y el desplazamiento lateral del material son los procesos dominantes y pueden entenderse como la transición del desgaste de dos cuerpos al desgaste de tres cuerpos discutido por Trezona, Allsopp, Hutchings y Gates [2].

Las regiones oscuras en la Figura 4 también deben entenderse como áreas de mayor modificación superficial: partículas compactadas, material polimérico deformado, material de transferencia y efectos de contraste debido a la curvatura del cráter. De 30 a 150 segundos, el material se desplaza gradualmente de la zona de contacto, lo que es una indicación de deformación superficial por arado. La evolución subsiguiente hacia una huella más definida con manchas oscuras y marcas de dirección muestra un desgaste abrasivo mixto: los surcos son los dominantes y las partículas atrapadas están involucradas en él. Esto último está en línea con Gates, quien dice que una separación muy estrecha entre la abrasión de dos cuerpos y de tres cuerpos no es posible si las partículas están atrapadas y compactadas o vuelven a entrar en contacto [6].

La comparación de las tres secuencias muestra que el mecanismo principal no cambia mucho entre los videos: en todos los casos se observa una formación progresiva del cráter, oscurecimiento localizado, surcos y material redistribuido. La principal diferencia está en la severidad visual y la estabilidad de la huella. La Figura 2 muestra la evolución más larga hasta los 720 segundos cuando los surcos pueden verse más claramente. Las Figuras 3 y 4, donde el video termina a los 299 segundos, muestran más claramente la acumulación de partículas y el contraste oscuro dentro del cráter. Las micrografías sugieren que la abrasión por micro-arado puede explicarse como resultado de la eliminación intermitente de residuos de material, así como por abrasión de corte. Los resultados cuantitativos también están en línea con esto, ya que la Tabla 3 muestra que la Prueba 5 fue la más estable, con una fuerza dinámica de 0.1224 ± 0.0067 N y un índice de fricción claro de 0.0624. En contraste con esto, la Prueba 4 tuvo una fuerza muy alta de 1.0052 ± 0.3337 N y una fricción clara de 0.5125, por lo que debe considerarse como una ejecución inusual que es más severa. Esto se debe a que Cozza Tanaka y Souza mostraron que la fricción y la respuesta dinámica son sensibles al cambio de régimen de desgaste en microabrasión. Por lo tanto, la señal más alta de la Prueba 4 podría ser una condición local menos estable debido a la captura de partículas o solo un pequeño aumento de la resistencia al deslizamiento, pero tampoco debe atribuirse a una sola causa [4].

El volumen para la huella promedio fue de 0.000245 mm^3 calculado en términos de la aproximación geométrica de un pequeño cráter esférico con un valor de $0.000101\text{-}0.000509 \text{ mm}^3$ para un diámetro de $0.4\text{-}0.6 \text{ mm}$. Esto es consistente con el enfoque de cráter de bola dado por Rutherford y Hutchings en el que la geometría del cráter nos permite estimar el volumen removido cuando la huella es pequeña en relación con el radio de la esfera. Sin embargo, no debemos interpretar el desgaste solo en términos de volumen, ya que las micrografías muestran que parte del material puede haber sido desplazado, compactado o redistribuido en el cráter [1].

En general, la prueba en seco indica que la huella tiene una abrasión por microarado dominante y partículas secundarias. Las micrografías ópticas nos permiten identificar la morfología, la dirección de los surcos y la acumulación de material, pero no nos permiten verificar la composición química u oxidación de las zonas negras. Para entender más claramente la naturaleza de estas zonas, se requeriría SEM/EDS, perfilometría o medición de cráter en 3D para completar el análisis.

El bajo COF puede atribuirse a la naturaleza localizada del contacto en el cráter de bola, al hecho de que la fuerza dinámica no es necesariamente puramente tangencial, al pequeño tamaño de la huella y a la posibilidad de que los desechos compactados estén presentes como un tercer cuerpo durante la prueba en seco. Como prueba en seco sobre policarbonato, los desechos pueden acumularse, compactarse o actuar como un tercer cuerpo. Esto puede aumentar la fricción a veces, pero también agregar una capa intermedia de material que reduce significativamente la resistencia al deslizamiento y, por lo tanto, el COF. Gee y Wicks encontraron que el cráter de bola puede ser un proceso no lubricado y que registrar la fricción en la prueba puede ayudar a explicar estos cambios de contacto [7].

11

V. CONCLUSIONES

- La huella de microdesgaste se formó de manera progresiva; a los 30 s ya se observa el inicio de la marca de desgaste y, conforme aumenta el tiempo, se definen el cráter, los bordes y los surcos.
- El mecanismo dominante observado en las Figuras 2, 3 y 4 corresponden a una deformación plástica, evidenciándose con desplazamiento del material y el desprendimiento, debido a la presencia de surcos direccionales y desplazamiento lateral del material.
- Las manchas o regiones negras no deben interpretarse como una fase química específica con la evidencia disponible; se asocian de forma más prudente con partículas compactadas, material deformado, cambios de rugosidad y efectos ópticos del relieve del cráter.
- La condición de ensayo en seco favoreció a que las partículas permanecieran en la interfase y actuaran de forma intermitente como tercer cuerpo, generando una condición de desgaste abrasivo mixto.
- La Prueba 5 presentó la respuesta dinámica más estable, mientras que la Prueba 4 mostró una condición atípica de mayor severidad; esta diferencia apoya la conveniencia de analizar simultáneamente micrografías, fuerza-tiempo y geometría del cráter.
- El volumen estimado de 0.000245 mm^3 es útil como indicador geométrico de desgaste, pero no describe por sí solo el mecanismo, ya que parte del material observado parece estar desplazado o compactado dentro y alrededor de la huella.
- Para fortalecer el artículo, se recomienda presentar esta interpretación como evidencia óptica de mecanismo de desgaste y evitar afirmaciones de composición o reacción química sin SEM/EDS o perfilometría 3D.
- Los tres videos evaluados presentaron valores de coeficiente de fricción aparente cercanos entre sí, con COF promedio de 0.0702, 0.0640 y 0.0624 para los Videos 1, 2 y 3, respectivamente.

- Los coeficientes específicos de desgaste estimados fueron del orden de 10^{-9} mm³/N·mm, lo que indica una remoción de material baja bajo las condiciones de ensayo utilizadas; sin embargo, estos valores deben considerarse preliminares porque se calcularon con una huella promedio de 0.5 ± 0.1 mm.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **TMR** (líder); Metodología: **TMR**; Desarrollo de software y desarrollo tecnológico: **MMM, LMM**; Investigación: **MMM, LMM, MTCB**; Redacción y preparación del borrador original: **MMM, LMM, MTCB, TMR**; Redacción, revisión y edición: **TMR**; Supervisión: **TMR**; Análisis formal: **TMR**; Administración del proyecto: **LMM, MTCB**; Transferencia tecnológica e implementación: **MMM, LMM**; Adquisición de fondos: **TMR**. Todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito.

Financiamiento: Los autores declaran que la presente investigación no recibió financiamiento externo específico de agencias del sector público, comercial o sin fines de lucro.

Declaración de la disponibilidad de datos: Los datos que sustentan los hallazgos de este estudio se encuentran disponibles dentro del artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo al Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán por el respaldo institucional y las facilidades otorgadas para el desarrollo de la presente investigación.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

12

- [1] K. L. Rutherford, I. M. Hutchings, “A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 3, no. 79, pp. 231-239, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02461-1](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02461-1)
- [2] R. I. Trezona, D. N. Allsopp, I. M. Hutchings, “Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test,” *Wear*, vols. 225-229, part 1, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00358-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5)
- [3] K. Adachi, I. M. Hutchings, “Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test,” *Wear*, vol. 255, no. 1-6, pp. 23-29, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00073-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00073-5)
- [4] R. C. Cozza, “Friction coefficient and wear mode transition in micro-scale abrasion tests,” *Tribology International*, vol. 44, no. 12, pp. 1878-1889, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.08.006>
- [5] J. F. Archard, “Contact and rubbing of flat surfaces,” *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 8, pp. 981-988, 1953, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
- [6] Gates, J. D., “Two-body and three-body abrasion: A critical discussion,” *Wear*, vol. 214, no. 1, pp. 139-146, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00188-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00188-9)
- [7] M.G Gee, M.J Wicks, “Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings,” *Surface and Coatings Technology*, vols. 133-134, no. 2000, pp. 376-382, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00966-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00966-X)