



# REVISTA TÉCNICA

## DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada  
que está indizada en las publicaciones  
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA

**Dr. Humberto Fernández Morán**  
"Mis luchas son las del Quijote,  
batallas que uno pierde, pero  
gana la causa".



# Procedimiento de Ensayo de Desgaste Microabrasivo para la Caracterización de Materiales Ferrosos de Alta Dureza

Tamara María Ortiz-Méndez\* , Dayán Montero-Madán , Amado Cruz-Crespo , Jorge Víctor Miguel-Oria 

Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. CP 50100. Santa Clara, Cuba.

\*Autor de correspondencia: [tortiz@uclv.cu](mailto:tortiz@uclv.cu)

<https://doi.org/10.22209/rt.v47a03>

Recepción: 17 julio 2023 | Aceptación: 03 mayo 2024 | Publicación: 31 mayo 2024

## Resumen

El ensayo de desgaste microabrasivo con esfera rotativa es un método cuya factibilidad en la caracterización de la resistencia al desgaste de materiales metálicos ha quedado demostrada en numerosas investigaciones; sin embargo, no se cuenta con una norma que establezca el procedimiento para su aplicación. Lo anterior conlleva a la necesidad de establecer un procedimiento de ensayo adecuado para aplicaciones específicas. En el presente trabajo se propone un procedimiento de ensayo microabrasivo dirigido a la caracterización de materiales ferrosos de alta aleación y dureza, validado por la calidad de las huellas de desgaste, el comportamiento del diámetro con respecto al tiempo de ensayo y la dispersión de los resultados de las mediciones. Se demostró que, mediante el empleo de alúmina como abrasivo, con concentración de 10 g por cada 100 ml de agua, frecuencia de goteo de 1 gota/5 seg, fuerza de ensayo de 0,27 N, velocidad de rotación del eje de 80 rpm y tiempo de ensayo de 10 min, se obtienen mediciones fiables en régimen de desgaste permanente. Se comprobó además que existe una correspondencia entre la dureza y la microestructura del material con la dispersión de los resultados y el tamaño medio de la huella de desgaste.

**Palabras clave:** desgaste abrasivo; ensayo de desgaste microabrasivo con esfera rotativa; resistencia al desgaste.

## Microabrasive Wear Test Procedure for Characterization of High Hardness Ferrous Materials

### Abstract

The ball cratering microabrasive wear test is a method whose feasibility in wear resistance characterization of metallic materials has been demonstrated in numerous investigations; however, there is still no standard that establishes the procedure for its application. This leads to the need to establish a test procedure suitable for specific applications. In the present work a microabrasive test procedure was obtained aimed at the characterization of high alloy and hardness ferrous materials, validated by the quality of wear mark, the behavior of the crater diameter with respect to the test time and the dispersion of the measurement results. It was demonstrated that, by using alumina as abrasive, with concentration of 10 g per 100 ml of water, dripping frequency of 1 drops/5 sec, test force of 0.27 N, shaft rotation speed of 80 rpm and test time of 10 min, reliable measurements are obtained in a permanent wear regime. It was also found that there is a correspondence between the hardness and the microstructure of the material with the dispersion of the results and the average size of the wear track.

**Keywords:** abrasive wear; ball cratering microabrasive wear test; wear resistance.

# Procedimiento de Teste de Desgaste Microabrasivo para Caracterização de Materiais Ferrosos de Alta Dureza

## Resumo

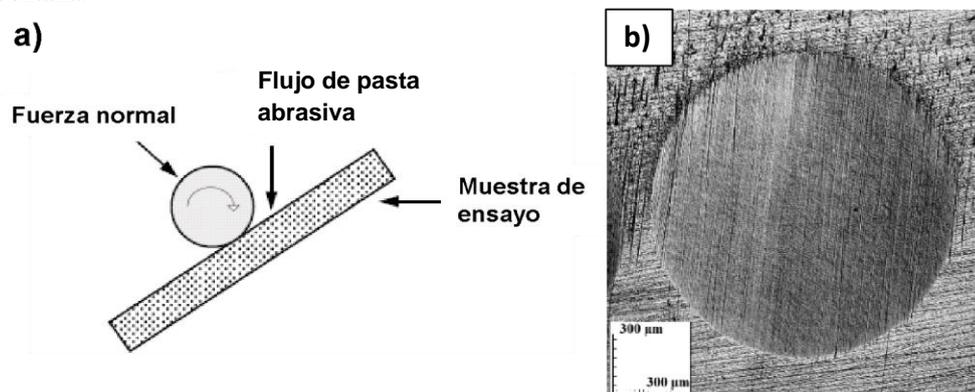
O ensaio de desgaste microabrasivo com esfera rotativa, é um método cuja viabilidade em caracterizar a resistência ao desgaste de materiais metálicos foi demonstrada em inúmeras investigações; Porém, não existe uma norma que estabeleça o procedimento para sua aplicação. O acima exposto leva à necessidade de estabelecer um procedimento de teste apropriado para aplicações específicas. No presente trabalho é proposto um procedimento de ensaio microabrasivo voltado à caracterização de materiais ferrosos altamente ligados e duros, validado pela qualidade das marcas de desgaste, pelo comportamento do diâmetro em relação ao tempo de ensaio e pela dispersão dos resultados. das medições. Foi demonstrado que, utilizando alumina como abrasivo, com concentração de 10 g por 100 ml de água, frequência de gotejamento de 1 gota/5 seg, força de teste de 0,27 N, velocidade de rotação do eixo de 80 rpm e tempo de teste de 10 min, medições confiáveis são obtidas em regime de desgaste permanente. Foi comprobado também que existe uma correspondência entre a dureza e microestrutura do material com a dispersão dos resultados e o tamanho médio da marca de desgaste.

**Palavras-chave:** desgaste abrasivo; ensaio de desgaste microabrasivo com esfera rotativa; resistência ao desgaste

## Introducción

El desgaste abrasivo es definido por la norma ASTM G40 (2002) como el tipo de daño debido a partículas o protuberancias duras que se mueven forzosamente a lo largo de una superficie sólida. León Sevilla *et al.* (2004) y Turenne *et al.* (1989) coinciden en que la naturaleza y extensión del desgaste abrasivo es dependiente de un número de factores, entre los que se incluyen la microestructura del material afectado, el tipo de abrasivo y sus características (tamaño, forma, dureza), la magnitud de las tensiones en los componentes del sistema, la frecuencia de contacto de la partícula abrasiva con la superficie, el movimiento relativo, la temperatura y el efecto de sustancias químicas. Dichos factores interactúan para producir un complejo sistema tribológico, alterando la intensidad del proceso, y con ello, la tasa (Q), el coeficiente (k) y el volumen de desgaste (V). De ahí que pueda plantearse que la resistencia al desgaste no es una propiedad intrínseca de los materiales, sino que depende del conjunto de condiciones que definen el sistema, por tanto, del método y el procedimiento empleado para su estudio.

En las últimas décadas se ha venido empleando para la caracterización del comportamiento de los materiales frente a condiciones de desgaste abrasivo, una nueva configuración de equipos denominada “máquina de desgaste microabrasivo con esfera rotativa”, inicialmente aplicada en la medición de espesores de revestimientos, pero con reconocidos resultados en la caracterización de materiales ferrosos (Ortiz Méndez *et al.*, 2019; Cozza *et al.*, 2013a; Gant y Gee, 2011; De Mello y Polycarpou, 2010; Stachowiak *et al.*, 2005 y 2006). En este caso, debido al contacto entre una esfera en rotación y la superficie de una muestra de ensayo, bajo la acción en la interfase de una pasta abrasiva, se genera un cráter semiesférico como huella de desgaste, cuyas dimensiones permiten predecir o estimar el comportamiento relativo del material. Existen diferentes configuraciones de este tipo de ensayo, destacándose por su sencillez la que aplica el principio “con esfera rotativa libre” (Figura 1) (Gee *et al.*, 2003). En este caso, el giro de la esfera se produce debido a la rotación de un eje, el cual la impulsa por la acción del rozamiento con los bordes de una entalla.



**Figura 1.** Ensayo de desgaste microabrasivo con esfera rotativa libre. a) Principio de funcionamiento, b) Imagen típica de la huella de desgaste (Ortiz Méndez *et al.*, 2019).

Cozza *et al.* (2007 y 2013a) han demostrado que mediante el ensayo microabrasivo con esfera rotativa, es posible obtener modos de desgaste abrasivo de "dos cuerpos", "tres cuerpos" y una combinación de ambos, para diferentes condiciones de carga/concentración de la pasta abrasiva, además de evidenciarse en algunas aplicaciones el desgaste abrasivo a alta tensión. Por su parte, el pequeño tamaño de las partículas abrasivas provoca que las huellas de desgaste presenten bordes definidos, con lo que se logra una alta precisión en las mediciones (Ortiz Méndez *et al.*, 2019). Dicho ensayo se encuentra estandarizado para el estudio de recubrimientos cerámicos bajo las normas BS EN 1071-6 (2007) e ISO 26424 (2008), pero no se cuenta con una norma para su aplicación como método de caracterización de la resistencia al desgaste de materiales metálicos. Esto provoca que en los diferentes estudios donde se reporta la aplicación de este método, no se aprecia sistematicidad de criterios que sustenten la selección de las variables de ensayo, lo que evidencia la necesidad de respaldar la selección de los parámetros del régimen de ensayo por investigaciones previas en los materiales objeto de estudio.

Adachi y Hutchings (2003) obtuvieron un mapa de los modos de desgaste abrasivo que se manifiestan en dependencia de la carga y la concentración del material abrasivo, para lo cual emplearon partículas de carburo de silicio con granulometría en el orden de los 4  $\mu\text{m}$ . Este resultado es aplicable a los materiales estudiados, mientras se mantengan las características de la pasta abrasiva y los parámetros de ensayo dentro de los rangos utilizados en estos experimentos. De igual manera ocurre con otras investigaciones, donde se emplea una gran diversidad de materiales y un amplio rango de parámetros, según se evidencia en la revisión realizada por Rodríguez Torres (2019). Además del carburo de silicio, se usan otros materiales como abrasivo, tales como el cuarzo la alúmina, el polvo de diamante y el óxido de zirconio, en diferentes granulometría y concentración (Silva *et al.*, 2011).

Por otra parte, para caracterizar de manera fiable el comportamiento de un material en determinado sistema tribológico, el proceso de desgaste debe ocurrir bajo un régimen permanente, que se alcanza cuando se asienta la superficie y desaparece el efecto de las irregularidades. Esto garantiza que se mantengan constantes la intensidad, la tasa y el coeficiente de desgaste (Trezona y Hutchings, 1999). De ahí que el momento en el que comienza el desgaste en régimen permanente está determinado por el acabado superficial de la muestra, el material abrasivo, su granulometría y concentración, así como los parámetros de ensayo (Trezona y Hutchings, 1999), lo cual implica la necesidad de establecer técnicas operatorias en dependencia del material a estudiar, del set de parámetros de ensayo y de las características del abrasivo.

El presente estudio tuvo como objetivo proponer un procedimiento de ensayo de desgaste microabrasivo con esfera rotativa libre para la caracterización de materiales ferrosos de alta aleación y dureza, empleados en aplicaciones donde predominan las condiciones de desgaste abrasivo, basado en la determinación de parámetros del ensayo que garanticen la calidad de las mediciones en un régimen de desgaste permanente.

## **Materiales y Métodos**

### **Selección de los materiales de estudio**

Méndez *et al.* (2014) plantean que entre los materiales más empleados para enfrentar condiciones de trabajo donde predomina el desgaste abrasivo se encuentran las aleaciones base carburos, fundamentalmente las fundiciones blancas aleadas al cromo. Otros materiales que brindan alta resistencia a la abrasión son los aceros con microestructura martensítica, los aceros de alto manganeso (Hadfield) luego de endurecidos por impacto, así como varios tipos de aleaciones base Ni, Cu o Co con elementos formadores de carburos dentro de su composición. Basado en lo anterior, los materiales seleccionados para este estudio fueron la fundición blanca ASTM A532 clase I tipo A y un acero para herramienta clasificado por GOST 5950 como 9XBG, tratado térmicamente. Se incluyó además en el estudio una muestra de acero AISI 1015 con el objetivo de contrastar los resultados en cuanto a la correlación de las características del material con su comportamiento frente al desgaste microabrasivo, y con ellos analizar la sensibilidad del método. La composición química de estos materiales, establecida en las normas de clasificación, se muestran en la Tabla 1.

Estas muestras fueron caracterizadas desde el punto de vista metalográfico, para lo cual fue necesaria la preparación de la superficie mediante desbaste y pulido, según el procedimiento establecido en la norma ASTM E3 (2001). El ataque químico se realizó por inmersión con el empleo de Nital al 1 % para las muestras de acero AISI 1015 y de acero GOST 9XBG, y se usó el reactivo Vilella para la fundición blanca, considerando lo establecido en ASTM E407 (2007). La observación de la microestructura se hizo mediante el empleo de un microscopio óptico metalográfico Neophot 32 y en las mediciones de dureza se utilizó un durómetro marca Heeckert, con una carga de 1 kgf durante un tiempo de 10 s, sobre la base de lo establecido en ASTM E384 (2017).

**Tabla 1.** Composición química de los aceros empleados para los ensayos (ASTM A532, 2019; GOST 5950, 2000; Vander Voort, 2004).

Clasificación	Composición química (% en peso)							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	Otros
ASTM A532	3,0-3,6	1,3	0,8	1,4-4	1,0	-	3,3-5,0	-
GOST 9XBG	0,85-0,95	0,9-1,2	0,1-0,4	0,5-0,8	≤ 0,2	≤ 0,15	≤ 0,4	W: 0,5-0,8 Ti ≤ 0,03 Cu ≤ 0,3
AISI 1015	0,13-0,18	0,3-0,6	0,35 máx.	-	-	-	-	-

-: no se incluye. Los contenidos de P y S no exceden el 0,040 y 0,050 % para todos los materiales, respectivamente.

### Selección de los parámetros de ensayo de desgaste microabrasivo con esfera rotativa libre

El equipo de ensayo de desgaste microabrasivo con esfera rotativa libre empleado, así como la técnica operatoria, fueron desarrollados y validados por López Escobar *et al.* (2022). Como material abrasivo se seleccionó la alúmina calcinada de marca AnalaR® y procedencia inglesa, con granulometría menor o igual a 1 µm. El empleo de este abrasivo para el estudio de materiales de alta dureza y resistencia a la abrasión se debe a su elevada dureza (2100 HV0,2), reportada por Badisch y Mitterer (2003). Además, Stachowiak *et al.* (2006) plantean que las partículas de alúmina poseen alta angulosidad, mayor que la arena sílice y el cuarzo, lo que favorece la severidad del ensayo de desgaste. Esta se empleó en una concentración de 10 g de alúmina por cada 100 ml de agua destilada, probada con excelentes resultados en el trabajo de López Escobar *et al.* (2022). Para la determinación de las demás variables de ensayo, se partió de experiencias previas en aplicaciones del ensayo microabrasivo con esfera rotativa libre sobre materiales metálicos, reportadas en la literatura y compendiadas en el trabajo de Rodríguez Torres (2019). Basado en esto, se usó una frecuencia de goteo de la pasta abrasiva de 1 gota cada 5 seg, lo que permitió acelerar el proceso de desgaste, considerando la elevada dureza de los materiales a estudiar y la importancia de disminuir el tiempo de experimentación para aumentar la eficiencia del procedimiento de ensayo.

En el caso de la fuerza normal, para el ensayo con esfera rotativa libre el valor de este parámetro está determinado por el peso de la bola y el ángulo máximo de inclinación respecto al plano vertical. Según Rodríguez Torres (2019), generalmente este parámetro no supera los 1,1 N para estos ensayos. Por su parte, Cozza (2013b) comenta que se deben emplear ángulos elevados de inclinación de la muestra, para evitar el resbalamiento de la bola en su interferencia con el eje. Considerando lo anterior, se seleccionó un ángulo de 70°. El equipo utilizado emplea bolas de 25,4 mm de diámetro de acero AISI 52100, con una masa de 0,067 kg, la cual ejerce una fuerza normal sobre la superficie de ensayo de 0,27 N. Con respecto a la velocidad de rotación del eje, Rodríguez Torres (2019) señala que esta variable varía en un rango entre 37,5 y 150 rpm para el equipo con esfera rotativa libre, estando en la mayoría de los casos por debajo de 80 rpm. Cozza *et al.* (2009) justifican la selección de velocidades de rotación bajas (37,5 rpm) debido a que de esta forma se elimina el efecto hidrodinámico en el ensayo. También, Bethke y Schiffmann (2001) destacan que, para el equipo de bolas libres, la tendencia de la bola a deslizarse sobre el eje aumenta a medida que la velocidad se incrementa. Ambos factores pueden conducir a una aparente disminución del desgaste a medida que aumenta la velocidad de la bola, lo cual afecta la fiabilidad de los resultados del ensayo. Dado lo anterior, se empleó una velocidad de rotación del eje de 80 rpm.

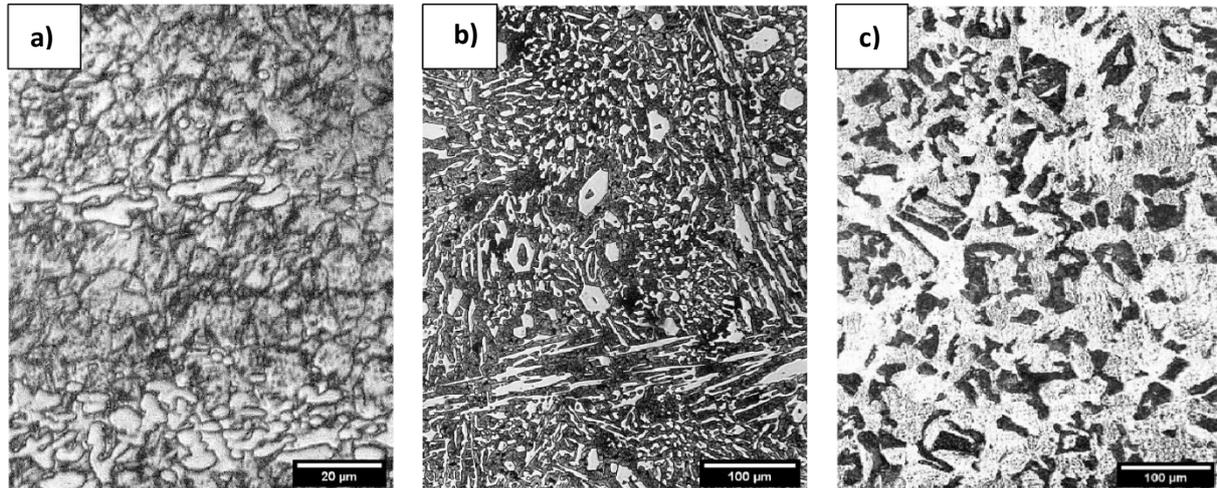
En cuanto a la distancia de deslizamiento y el tiempo de ensayo, estos parámetros se vinculan directamente, y sus valores se incrementan para los materiales de alta resistencia al desgaste abrasivo, con vistas a ensayar en régimen de desgaste permanente y obtener huellas con contornos nítidos que permitan su medición con calidad. Basado en lo anterior, los tiempos de ensayo seleccionados para el estudio fueron 5, 10 y 15 min, correspondiente a distancias de 63,8; 127,6 y 191,4 m; respectivamente. La medición de la huella de desgaste se realizó por medio de un microscopio portátil (*read-out*), de bajo aumento (24x). Se realizaron tres réplicas de cada punto experimental de tiempo de ensayo.

Para la evaluación estadística de estos resultados, así como de los modelos de regresión de comportamiento de desgaste en función del tiempo para los materiales estudiados, se empleó el análisis de varianza (ANOVA), el cual distribuye la varianza de la respuesta en dos componentes, uno para la estimación del modelo y otro para el error experimental. Este análisis utiliza la prueba de Fisher para evaluar la significación del modelo obtenido. Se consideraron estadígrafos como el coeficiente de correlación para evaluar el nivel de relación entre las variables; la R<sup>2</sup> ajustada que describe la cantidad proporcional de variación en la variable respuesta respecto a la variable de entrada; el error estándar del estimado que representa la desviación estándar para los residuos; el error absoluto medio como criterio para evaluar el ajuste del modelo, lo cual se realizó con el empleo del programa Statgraphic Centurión V18.

## Resultados y Discusión

### Caracterización metalográfica de los materiales estudiados

En la Figura 2 se muestran las microestructuras de los materiales seleccionados para el estudio. En el caso del acero con clasificación GOST 9XBG, con el aumento utilizado para visualizar la microestructura (Figura 2a), no se observaron fases con forma acicular típicas del tratamiento térmico de temple. Sin embargo, el estudio de dureza arrojó un valor medio de  $554,7 \pm 0,9$  HV, lo que permite afirmar que el material ha sido endurecido por tratamiento térmico. Esto le aporta propiedades favorables frente al desgaste abrasivo, dada la alta dureza de las fases que lo componen (León Sevilla *et al.*, 2004).



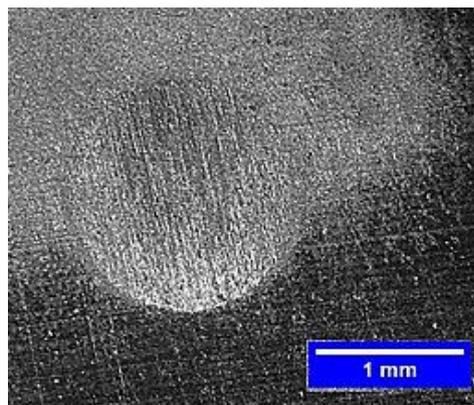
**Figura 2.** Microestructura de los materiales estudiados. a) Acero GOST 9XBG, b) Fundición blanca ASTM A532, c) AISI 1015.

En la Figura 2b se observa la microestructura de la fundición blanca con morfología hipereutética, la cual se compone de carburos primarios del tipo  $M_7C_3$  (barras de sección transversal hexagonal), rodeados de una zona de apariencia eutética formada por carburos secundarios y matriz metálica, típica de este tipo de material (Singla *et al.*, 2016; Vander Voort, 2004). La resistencia al desgaste de las fundiciones blancas hipereutéticas está determinada por el efecto de los carburos primarios y eutéticos, dado por su tamaño, forma y composición química, así como por la microestructura de la matriz, según demostraron Cardoso *et al.* (2014) en sus investigaciones. El valor medio obtenido en el ensayo de dureza a esta muestra fue de  $555,7 \pm 0,7$  HV, semejante al reportado por Dieter (1997) para este tipo de material. En la Figura 2c se destaca la microestructura del acero con clasificación AISI 1015; como era de esperar, este material presentó una estructura ferrito-perlítica, semejante a la indicada por Vander Voort (2004) para este material. La dureza obtenida,  $110,7 \pm 4,6$  HV, se enmarca dentro del rango reportado por Kuhn y Medlin (2000) para este acero en estado recocido, lo cual se corrobora dada la morfología equiaxial de los granos en la microestructura.

### Análisis de los resultados de los ensayos de desgaste

En la Figura 3 se muestra la apariencia típica de las huellas de desgaste obtenidas en la fundición blanca ASTM A532, ensayada con un tiempo de 15 min, donde se aprecian las marcas de desgaste con forma de surcos paralelos, lo que demuestra que el mecanismo de desgaste abrasivo ocurrió por el modo de dos cuerpos. Semejante apariencia se manifestó en los demás experimentos, para los tres materiales. En todos los casos se obtuvo una adecuada nitidez de contorno, lo que evidencia que durante el ensayo se alcanzó el régimen de desgaste permanente (Cozza *et al.*, 2005). Por su parte, los resultados de desgaste obtenidos en el ensayo microabrasivo para los tiempos de ensayo de 5, 10 y 15 min se presentan en la Tabla 2.

Se utilizó como parámetro de evaluación la magnitud del diámetro medio de la huella ( $d_m$ ), dado que este permite una valoración de la propiedad de resistencia al desgaste abrasivo del material bajo estudio más precisa que el volumen de desgaste, como resultado de una menor propagación del error de la magnitud “diámetro medio” en relación con la magnitud indirecta “volumen medio de desgaste”, ya que el error del volumen es proporcional a la tercera potencia del error del diámetro medio, debido a que se calcula como la primera derivada del primero respecto al segundo (Ortiz Méndez *et al.*, 2019).



**Figura 3.** Apariencia de la superficie desgastada de la muestra de fundición blanca ASTM A 532, posterior a los 15 min de ensayo.

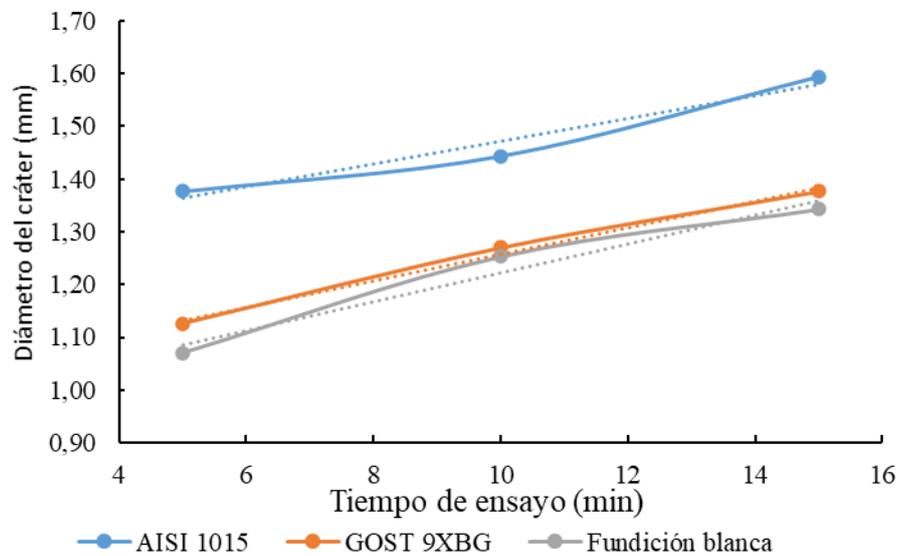
**Tabla 2.** Resultados del diámetro de la huella de desgaste en los materiales estudiados y coeficientes de variación de las mediciones.

Parámetro	Tiempo de ensayo, t (min)		
	5 min	10 min	15 min
<b>Acero GOST 9XBG</b>			
Diámetro medio (dm) (mm)	1,13	1,27	1,38
Coefficiente de variación (%)	2,22	1,14	1,82
<b>Fundición blanca ASTM A532</b>			
Diámetro medio (dm) (mm)	1,07	1,25	1,34
Coefficiente de variación (%)	3,58	2,00	1,08
<b>Acero AISI 1015</b>			
Diámetro medio (dm) (mm)	1,37	1,44	1,59
Coefficiente de variación (%)	1,82	1,00	0,91

Para asegurar que los resultados fueron significativamente diferentes entre los diferentes materiales de experimentación, se realizó un análisis de comparación de datos con los diámetros de las huellas, tomados en los tres tiempos de ensayo para cada material estudiado, por medio de un ANOVA, el cual arrojó en todos los casos que existe una diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) entre las medias de los diámetros de las huellas para los tres tiempos de ensayo (5, 10 y 15 min), demostrándose así que los rangos de variación de la variable tiempo seleccionados para la experimentación son adecuados. Otro aspecto a destacar es el comportamiento del coeficiente de variación del diámetro de la huella en los diferentes tiempos de ensayo para los materiales estudiados. Tomando como referencia lo establecido en la norma ASTM G65 (2021), este estadígrafo en valores menores que 7 es un reflejo de la repetibilidad del ensayo de desgaste; y por tanto, de la calidad de las mediciones. Como puede apreciarse (Tabla 2), en todos los casos se cumplió esta condición. No obstante, hay que destacar que a medida que aumentaba la dureza y la resistencia al desgaste del material, se incrementaba la dispersión de los resultados, sobre todo para el tiempo de ensayo más bajo (5 min), lo que indica que el ensayo debe realizarse con tiempos mayores a este, en función de optimizar la fiabilidad del método.

Cozza (2006) plantea que cuando el desgaste presenta una variación lineal respecto al tiempo de ensayo (o a la distancia de deslizamiento), se considera que ya fue alcanzado el régimen permanente de desgaste. En función de verificar si esto ocurrió en los ensayos, se obtuvieron las curvas de comportamiento de diámetro de la huella en función del tiempo (t) para los tres materiales estudiados, según la Figura 4. Aquí se visualiza el comportamiento superior en cuanto a resistencia al desgaste de la fundición blanca ASTM A532, a pesar de poseer una dureza similar al acero GOST 9XBG tratado térmicamente. Esto se corresponde con lo planteado por Wang *et al.* (2010) y Coronado *et al.* (2009), quienes consideran que la dureza no describe la resistencia al desgaste abrasivo en materiales de sistemas de aleación diferentes. Dicho comportamiento de la resistencia al desgaste en la muestra de fundición blanca hipereutéctica, se justifica por lo descrito por Chatterjee y Pal (2003), quienes lo explican debido a la presencia de carburos aleados de elevada dureza ( $M_7C_3$ : 1600-1800 HV) dentro de la microestructura, los cuales actúan como barreras efectivas frente al efecto de las partículas abrasivas. En el caso del acero para herramienta GOST 9XBG, su comportamiento favorable se debe a la elevada dureza, como resultado del tratamiento térmico que presenta este material (Kuhn y Medlin, 2000), según se comprobó en el estudio de dureza.

En la Figura 4 se aprecia que el mayor desgaste ocurrió en el acero AISI 1015. Este es un resultado esperado dado el comportamiento desfavorable de los aceros al carbono frente a condiciones de desgaste abrasivo, lo cual se debe a que la dureza de las fases que lo constituyen es varias veces inferior a la de las partículas abrasivas (León Sevilla *et al.*, 2004).



**Figura 4.** Comportamiento del diámetro medio del cráter de desgaste respecto al tiempo de ensayo para los materiales estudiados.

Las ecuaciones de las curvas del diámetro de la huella de desgaste ( $dm$ ) en función del tiempo de ensayo ( $t$ ), se exponen a continuación (Ecuaciones 1, 2 y 3), para los tres materiales estudiados:

$$dm_{(GOST\ 9XBG)} = 1,008 + 0,025 \cdot t \quad (1)$$

$$dm_{(Fundición\ blanca)} = 0,949 + 0,027 \cdot t \quad (2)$$

$$dm_{(AISI\ 1015)} = 1,254 + 0,022 \cdot t \quad (3)$$

En todos los casos la calidad de los modelos lineales fue avalada por los resultados de la prueba ANOVA, demostrándose una relación estadísticamente significativa entre diámetro de la huella y el tiempo de ensayo, con un nivel de confianza del 95,0 %, para ajustes del modelo superiores al 90,0 % y coeficientes de correlación superiores al 0,96; lo que indica una correlación positiva entre las variables. En todos los casos el error estándar del estimado no superó el 3 % y el error absoluto medio fue inferior al 2 %, indicando una dispersión mínima de las mediciones. A partir de lo anterior, se evidencia la linealidad del comportamiento del diámetro de la huella de desgaste respecto al tiempo (5, 10 y 15 min) en los tres materiales estudiados, lo que indica que el fenómeno de desgaste ocurre en régimen estacionario o permanente, período en el cual deben realizarse las mediciones para la caracterización de los materiales; y por tanto, avala la adecuada selección de los tiempos de ensayo (Cozza *et al.*, 2005). No obstante, considerando la dispersión relativa del conjunto de datos, dada por el coeficiente de variación (Tabla 2), se puede comprobar que esta se torna inferior al 2 % para tiempos mayores de 10 min, lo que refleja la calidad de las mediciones del método de estudio. Considerando además como criterio la eficiencia en la experimentación, puede plantearse que el empleo de 10 min de tiempo de ensayo, junto a los parámetros del régimen seleccionado y la técnica operatoria empleada, son las condiciones adecuadas para el estudio de materiales ferrosos de alta aleación y dureza.

Finalmente, otro aspecto que se destaca al analizar las Ecuaciones 1, 2 y 3 es la similitud de las pendientes de las curvas hasta la segunda cifra decimal (0,02), hecho esperado ya que la razón de desgaste depende de los parámetros del ensayo y no del material de prueba (Adachi y Hutchings, 2005). Este resultado avala también la fiabilidad de las mediciones de desgaste obtenidas mediante la técnica de ensayo microabrasivo con esfera rotativa libre, aplicado a materiales ferrosos de alta dureza y resistencia al desgaste abrasivo y la adecuada selección de los parámetros de ensayo empleados con este fin.

## Conclusiones

El ensayo microabrasivo con esfera rotativa libre sobre materiales de alta aleación y dureza, donde se emplea alúmina como abrasivo en una concentración de 10 g por cada 100 ml de agua, con una frecuencia de goteo de 1 gota/5 seg, una fuerza de ensayo de 0,27 N; una velocidad de rotación del eje de 80 rpm y un tiempo de ensayo de 10 min, permite la obtención de mediciones fiables en un régimen de desgaste permanente. En los ensayos realizados, a medida que aumenta la dureza y la resistencia al desgaste del material, aumenta la dispersión de los resultados. A partir del tiempo de ensayo de 10 min el coeficiente de variación de las mediciones no superó el 2 % para ninguno de los materiales ensayados, lo que evidencia la importancia de adecuar este parámetro de ensayo al tipo de material bajo estudio. Los resultados de pérdida de volumen de material desgastado sobre las muestras de fundición blanca ASTM A532 clase I tipo A, de acero para herramientas GOST 9XBG y de acero al carbono AISI 1015, se corresponden de manera proporcional con la dureza relativa de esos materiales y la composición de su microestructura, lo que evidencia la superioridad de las fundiciones blancas aleadas frente al mecanismo de desgaste abrasivo.

## Referencias Bibliográficas

- Adachi, K., Hutchings, I. M. (2003). Wear-mode mapping for micro-scale abrasion test. *Wear*, 2555, 23-29.
- Adachi, K., Hutchings, I. M. (2005). Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness. *Wear*, 258, 318-321.
- ASTM E384. (2017). *Standard test method for microindentation hardness of materials*. West Conshohocken: American Society of Testing Materials (ASTM).
- ASTM E3. (2001). *Standard guide for preparation of metallographic specimens*. West Conshohocken: American Society of Testing Materials (ASTM).
- ASTM-E407. (2007). *Standard practice for microetching metals and alloys*. West Conshohocken: American Society of Testing Materials (ASTM).
- ASTM A532. (2019). *Standard specification for abrasion-resistant cast irons*. West Conshohocken: American Society of Testing Materials (ASTM).
- ASTM G40. (2002). *Standard terminology relating to wear and erosion*. West Conshohocken: American Society of Testing Materials (ASTM).
- ASTM G65. (2021). *Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus*. West Conshohocken: American Society of Testing Materials (ASTM).
- Badisch, E., Mitterer, C. (2003). Abrasive wear of high-speed steels: influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance. *Tribology International*, 36, 765-770.
- Bethke, R., Schiffmann, K. (2001). *Ball cratering wear test: review of the state of the art*. Braunschweig: Fraunhofer Institut für Schicht und Oberflächentechnik.
- BS EN 1071-6. (2007). *Advanced technical ceramics. Methods of test for ceramic coatings. Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-abrasion wear test*. London: British Standards Institution (BSI).
- Cardoso, P. H. S., Israel, C. L., Strohaecker, T. R. (2014). Abrasive wear in austempered ductile irons: a comparison with white cast irons. *Wear*, 313, 29-33.
- Chatterjee, S., Pal, T. K. (2003). Wear behavior of hardfacing deposits on cast iron. *Wear*, 255, 417-425.
- Coronado, J. J., Caicedo, H. F., Gómez, A. L. (2009). The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International*, 42, 745-749.
- Cozza, R. C. (2006). *Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo*. Tesis de maestría. São Paulo: Universidade de São Paulo.

- Cozza, R. C. (2013a). A study on friction coefficient and wear coefficient of coated systems submitted to micro-scale abrasion tests. *Surface & Coatings Technology*, 215, 224-233.
- Cozza, R. C. (2013b). Análise sobre a reprodutibilidade de resultados e fragmentação de partículas abrasivas em ensaios ball-cratering. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 10(2), 103-111.
- Cozza, R. C., de Mello, J. D. B., Tanaka, D. K., Souza, R. M. (2007). Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests. *Wear*, 263, 111-116.
- Cozza, R. C., Tanaka, D. K., Souza, R. M. (2009). Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure -Preliminary results. *Wear*, 267, 61-70.
- Cozza, R. C., Martins Souza, R., Katsuki Tanaka, D. (2005). *Wear mode transition during the micro-scale abrasion of WC-Co P20 and M2 tool steel*. 18<sup>th</sup> International Congress of Mechanical. Ouro Preto: COBEM Ed. ABCM, 6-11.
- De Mello, J. D., Polycarpou, A. (2010). Abrasive wear mechanisms of multi-components ferrous alloys abraded by soft, fine abrasive particles. *Wear*, 269, 911-920.
- Dieter, G. E. (Ed.). (1997) *Materials, selection and design*. ASM Handbook. Vol. 20. Ohio: ASM International.
- Gant, A. J., Gee, M. G. (2011). A review of micro-scale abrasion testing. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(7), 7-30.
- Gee, M. G., Gant, A., Hutchings, I., Bethke, R., Schiffman, K., Van Acker, K., Poulat, S., Gachon, Y., Von, S. J. (2003). Progress towards standardisation of ball cratering. *Wear*, 255, 1-13.
- GOST 5950. (2000). *Tool alloy steel bars, strips and coils. General specifications*. Moscow: Gosudarstvenny Standart (GOST).
- ISO 26424. (2008). *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-scale abrasion test*. 1<sup>st</sup> edition. Geneva: International Standard Organization (ISO).
- Kuhn, H., Medlin, D. (Eds.). (2000). *Mechanical testing and evaluation*. ASM Handbook. Vol. 08. Ohio: ASM International.
- León Sevilla, L. M., Gutiérrez Pineda, J. C., Toro, A. (2004). Relación microestructura resistencia al desgaste de recubrimientos duros ricos en cromo y tungsteno aplicados por soldadura eléctrica (SMAW). *Dyna*, 71(144), 165-171.
- López Escobar, I. P., Ortiz Méndez, T. M., Cruz Crespo, A. (2022). Desarrollo de un equipo de ensayo microabrasivo con esfera rotativa libre para la evaluación de depósitos de recargue. *Revista Centro Azúcar*, 49(4), 80-90.
- Mendez, P. F., Barnes, N., Bell, K., Borle, S. D., Gajapathi, S. S., Guest, S. D., Izadi, H., Gol, A. K, Wood, G. (2014). Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, 16, 4-25.
- Ortiz Méndez, T., Cruz Crespo, A., Rodríguez, M. (2019). Efecto del número de pasadas sobre el desempeño al desgaste micro-abrasivo de depósitos de recargue obtenidos con un electrodo tubular revestido experimental. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 42(1), 19-26.
- Rodríguez Torres, Y. (2019) *Fabricación de un equipo de ensayo de desgaste microabrasivo con esfera rotativa*. Tesis de grado. Santa Clara: Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.
- Silva, F. J. G., Casais, R. B., Martinho, R. P., Baptista, A. P. M. (2011). Role of abrasive material on micro-abrasion wear tests. *Wear*, 271, 2632-2639.
- Singla, Y. K., Chhibber, R., Arora, N. (2017). On the microstructure and wear behavior of Fe-xCr-4Mn-3C hardfacing alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(6), 1555-1561.

Stachowiak, G. B., Stachowiak, G. W., Brandt, J. M. (2006). Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles. *Tribology International*, 39, 1-11.

Stachowiak, G. B., Stachowiak, G. W., Celliers, O. (2005). Ball-cratering abrasion tests of high-Cr white cast irons. *Tribology International*, 38, 1076-1087.

Trezona, R. I., Hutchings, I. M. (1999). Three-body abrasive wear testing of soft materials. *Wear*, 233-235, 209-221.

Turenne, S., Lavallée, F., Masounave, J. (1989). Matrix microstructure effect on the abrasion wear resistance of high-chromium white cast iron. *Journal of Materials Science*, 24, 3021-3028.

Vander Voort, G. F. (Ed.). (2004). *Metallography and microstructures*. ASM Handbook. Vol. 9. 10<sup>th</sup> Edition. Ohio: ASM International.

Wang, Q., Li, X. (2010). Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys. *Welding Journal*, 89, 133s-139s.

**Editor Asociado:** *Carlos Francisco Torres Monzón*   
Departamento de Ciencias Térmicas, Universidad de Los Andes (ULA)  
Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería  
Mérida, 5001, Venezuela



UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

## REVISTA TECNICA

DE LA  
FACULTAD DE  
INGENIERIA  
UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

Volumen 47. Año 2024, Edición continua\_\_\_\_\_

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en mayo 2024, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia.** Maracaibo-Venezuela*

[www.luz.edu.ve](http://www.luz.edu.ve)  
[www.serbi.luz.edu.ve](http://www.serbi.luz.edu.ve)  
[www.produccioncientificaluz.org](http://www.produccioncientificaluz.org)