



## INVESTIGACIÓN

<https://doi.org/10.22463/issn.0122-820X>

# Comportamiento de la Resistencia al desgaste erosivo de recubrimientos de alúmina.

Alfonso Santos Jaimes<sup>a\*</sup>, Zulma Yainell Ramírez Jaimes<sup>b</sup>, Carlos Gerardo Cárdenas Arias<sup>c</sup>, Emil Hernández Arroyo<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Msc. Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, Colombia

<sup>b</sup>Estudiante ingeniería, Joven investigador, Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia

<sup>c</sup>Msc. Educación, Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia

<sup>d</sup>Msc. Controles Industriales, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, Colombia

Recibido el 23 de Julio de 2017; Aprobado el 02 de Diciembre de 2017.

### PALABRAS CLAVE

Alúmina, Desgaste, Erosión, Recubrimientos

### Comportamiento de la Resistencia al desgaste erosivo de recubrimientos de alúmina

En este artículo se presentan los resultados de la investigación relacionada con el comportamiento experimental de recubrimientos de alúmina, obtenidos a partir de partículas de tamaño micrométrico y depositadas a través de un proceso de rociado térmico por llama, sobre un sustrato de acero inoxidable AISI 304, cuando están sometidos a desgaste erosivo originado por cavitación a través de un aparato vibratorio. La metodología utilizada para alcanzar el objetivo propuesto consistió de cinco fases, en la primera se realizó una caracterización morfológica y química de los materiales utilizados; la segunda fue la adaptación del equipo de ultrasonido UIP1000hd a los requerimientos exigidos por la norma ASTM G32-16 (Método de pruebas estándar para erosión por cavitación usando aparatos vibratorios); posteriormente se ensayaron probetas de acero inoxidable AISI 304 para comprobar el funcionamiento del equipo utilizado, la validación del fenómeno de desgaste presente en las probetas se realizó a través de ensayos de microscopía electrónica de barrido con el fin de observar la evolución de la huella dejada sobre el espécimen; como cuarta fase se realizó la deposición de los recubrimientos de alúmina a través de un equipo de combustión oxiacetilénica convencional y una pistola Eutalloy 85 BX; por último se realizaron ensayos de microdureza y resistencia al desgaste erosivo a probetas de acero inoxidable AISI 304 sin y con recubrimientos de alúmina. Los resultados obtenidos permitieron validar el funcionamiento del equipo adaptado para la realización de los ensayos ya que el porcentaje de error promedio entre los datos experimentales y teóricos fue del 4,5% para el acero inoxidable AISI 304; respecto al comportamiento de los recubrimientos de alúmina se obtuvo una reducción del 26,23% de pérdida de material con respecto al acero inoxidable AISI 304, lo que representa una mejora significativa e incentiva su utilización cuando se tienen elementos mecánicos sometidos a desgaste erosivo originado por cavitación.

### KEYWORDS

Alumina, Wearing away, Erosion, Coatings.

### Resistance behavior to erosive wearing away of alumina coatings

This article presents the results of the research related to the experimental behavior of alumina coatings obtained from micrometric size particles and deposited through a thermal spraying by flame process on an AISI 304 stainless steel substrate when it is subjected to erosive wear caused by cavitation through a vibratory apparatus. The methodology used to reach the proposed objective consisted of five phases in the first a morphological and chemical characterization of the materials used, was carried out; the second was the adaptation of UIP1000hd ultrasound equipment to the requirements demanded by the ASTM G32-16 standard (standard test method for erosion by cavitation using vibrating apparatus); afterwards, test pieces of AISI 304 stainless steel were tested to verify the performance of the equipment used, the validation of the wear phenomenon present in the specimens was carried out through scanning electron microscopy tests in order to observe the evolution of the footprint left over the specimen; as a fourth phase, the deposition of the alumina coatings was carried out through a conventional oxyacetylene combustion equipment and an Eutalloy 85 BX gun; finally micro-hardness and erosive wear resistance tests were carried out on AISI 304 stainless steel specimens without and with alumina coatings. The results obtained allowed to validate the operation of the adapted equipment for the performance of the tests since the percentage of average error between the experimental and theoretical data was of 4,5% for AISI 304 stainless steel; regarding the behavior of alumina coatings a 26,23% reduction of material loss was obtained with respect to the AISI 304 stainless steel which represents a significant improvement and encourages its use when mechanical elements are subjected to erosive wear caused by cavitation.

### PALABRAS - CHAVE

Alumina, Desgastando, Erosão, Revestimentos.

### Comportamento da resistência ao desgaste erosivo de revestimentos de alumina

Este artigo apresenta os resultados da pesquisa relacionada ao comportamento experimental de revestimentos de alumina, obtidos a partir de partículas micrométricas e depositados através de um processo de chama térmica, sobre um substrato de aço inoxidável AISI 304, quando submetido a erosão erosiva causada por cavitação através de um aparelho vibratório. A metodologia utilizada para atingir o objetivo proposto consistiu de cinco fases, sendo que na primeira foi realizada uma caracterização morfológica e química dos materiais utilizados; o segundo foi a adaptação do equipamento de ultra-som UIP1000hd aos requisitos exigidos pela norma ASTM G32-16 (método de teste padrão para erosão por cavitação utilizando aparelhos vibratórios); subseqüentemente, eles espécimes aço inoxidável AISI 304 foram testadas para a operação do equipamento utilizado, a validação de fenômeno de desgaste presente nas amostras foi realizada por meio de testes de microscopia eletrônica de varrimento a fim de observar a evolução da marca deixada sobre o espécime; como uma quarta fase, a deposição dos revestimentos de alumina foi realizada através de equipamento de combustão de oxiacetileno convencional e uma pistola Eutalloy 85 BX; Finalmente, testes de microdureza e resistência à erosão foram realizados em amostras de aço inoxidável AISI 304 sem e com revestimentos de alumina. Os resultados obtidos permitiram validar a operação do equipamento adaptado para a realização dos ensaios, uma vez que a porcentagem de erro médio entre os dados experimentais e teóricos foi de 4,5% para o aço inoxidável AISI 304; sobre o comportamento dos revestimentos de alumina redução de 26,23% de perda de material em comparação com o aço inoxidável AISI 304 foi obtido, o que representa uma melhoria significativa e encoraja a utilização quando os elementos mecânicos são submetidos a erosiva desgaste causado pela cavitação

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [alfonso.santos@upb.edu.co](mailto:alfonso.santos@upb.edu.co) (Alfonso Santos Jaimes).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## Introducción

Se denomina desgaste a la pérdida de material que tiene lugar en la interacción de dos superficies cuando existe un movimiento relativo entre ellas bajo el efecto de una fuerza. En condiciones extremas de tensión mecánica, o incluso ambientales, el desgaste puede llevar a un fallo por fatiga de la pieza: esta es la principal causa de la pérdida de las propiedades mecánicas del material.

La forma en que tiene lugar el desgaste, deterioro de la superficie y pérdida de material, se puede explicar mediante dos mecanismos alternativos o simultáneos. El primero es el desgaste provocado por deformación plástica, que se presenta mayoritariamente en los materiales dúctiles y el segundo es el desgaste por generación de grietas, que provocan descascarillado, y se origina principalmente en materiales frágiles como los cerámicos.

El desgaste por erosión se origina debido a la exposición de una superficie a impactos repetidos producidos por partículas sólidas o agentes externos como gases o líquidos; un fenómeno que origina este tipo de desgaste es la cavitación, la cual puede ser definida como la formación y posterior colapso dentro de un líquido de cavidades o burbujas que contienen vapor o mezcla de vapor y gas [1].

La cavitación generalmente se origina como resultado de elevadas variaciones de presión producidas por el movimiento de un líquido, a medida que está presión disminuye repentinamente por debajo de la presión de vapor, el esfuerzo impuesto al líquido produce cavidades debido a los pequeños núcleos de cavitación presentes en un líquido real [2-4].

Posteriormente estas cavidades o burbujas se colapsan violentamente cuando son sometidas a una presión más alta, lo cual origina ondas de choque con velocidades entre 500 – 600 m/s y una elevada presión que puede llegar hasta varios GPa y que causan fatiga, fractura y pérdida de material en una superficie sólida [5-7]. Este fenómeno es uno de los tipos de daños más drásticos que afecta la eficiencia y el buen funcionamiento de casi todos los sistemas y máquinas hidráulicas, tales como tuberías, válvulas, bombas de agua, hélices de barcos, aspas de turbinas hidráulicas, motores diesel, inyectores de combustibles y muchos otros dispositivos hidráulicos utilizados en aplicaciones industriales.

Con el fin de reducir el impacto del fenómeno de cavitación en los diferentes elementos mecánicos se pueden adoptar dos alternativas; la primera consiste en realizar un diseño óptimo que permita maximizar la resistencia al desgaste erosivo de los componentes expuestos a través de la implementación de materiales con mejores propiedades mecánicas, entre los que sobresale el acero inoxidable AISI 304 por su resistencia a la corrosión y su buen comportamiento ante este fenómeno; como segunda opción es el desarrollo o implementación de recubrimientos que posean una mejor resistencia a la cavitación y erosión [8, 9]. La alternativa más utilizada es el uso de recubrimientos ya que usualmente son más económicas y originan buenos resultados.

La protección de sustratos metálicos frente al desgaste se puede conseguir mediante el uso de recubrimientos abrasivos y abrasibles (tribológicos), compuestos principalmente por materiales cerámicos [10, 11]; los recubrimientos con alúmina ( $Al_2O_3$ ) están incrementando su uso en muchas aplicaciones industriales debido a sus excelentes propiedades como lo son su alta resistencia al desgaste, elevada dureza, buenas propiedades tribológicas, excelente resistencia a la corrosión, alta resistencia térmica y costo relativamente bajo de fabricación [12-15].

Realizar adecuadamente el recubrimiento cerámico es extremadamente importante, ya que su alta adherencia al sustrato es crucial para la obtención de una buena resistencia al desgaste. Los recubrimientos cerámicos pueden realizarse mediante varios métodos, como el rociado térmico [16], complejo polimerizable [17], la deposición química de vapor [18] y la proyección por plasma [19]. Estos procesos introducen algunos materiales externos sobre la superficie de la matriz. Uno de los procesos más utilizados para la aplicación de revestimientos sobre superficies metálicas es el de rociado térmico, debido a su versatilidad y a la gran variedad de materiales que pueden ser aplicados [20,21]; estos procedimientos utilizan una boquilla de rociado que maneja una llama de oxcombustible, arco eléctrico o arco de plasma [22,23], y permite la deposición de materiales tanto metálicos como no metálicos. Los progresos del rociado térmico tienen una gran aceptación en la industria, tanto en la fabricación de piezas como en el mantenimiento, en donde el campo de aplicación se extiende y amplía cada vez más debido al desarrollo de nuevas aleaciones y procesos [24].

Existen varios procesos de rociado térmico entre los que se destacan: rociado térmico con alambre, rociado térmico de polvo metálico, plasma, cañón detonante, rociado de alta velocidad con oxcombustible, y arco de alambre; los revestimientos obtenidos tienen una estructura estratificada de material depositado, y puede tener porosidades entre el 10 y el 20% causada por aire y partículas de óxido, atrapados por las altas temperaturas que se manejan [22]. En el procesamiento convencional los recubrimientos de cerámicos se producen a partir de polvos de partículas de tamaño micrométrico y sus propiedades han sido estudiadas en profundidad, demostrando que la resistencia al desgaste se relaciona con la dureza y la tenacidad del revestimiento [25-26]. Un principio físico bastante utilizado para determinar la resistencia al desgaste erosivo originado por el fenómeno de cavitación es el ultrasonido [27-30], el cual consiste en el uso de ondas mecánicas cuya frecuencia está por encima de la capacidad de audición del oído humano, aproximadamente 20000 Hz, las cuales se propagan en el medio originando alternancia de ciclos de alta y baja presión, con intervalos que dependen de la frecuencia de aplicación y que originan el fenómeno de cavitación en el fluido donde estén siendo aplicadas. Este trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento de recubrimientos de alúmina, obtenidos a partir de partículas de tamaño micrométrico depositadas a través de un proceso de rociado térmico por llama, cuando están sometidos a desgaste erosivo originado por cavitación a través de un equipo de ultrasonido.

## Materiales y Métodos

### Caracterización Morfológica y química de materiales

La caracterización morfológica y química de la alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a depositar se realizó a través de la técnica de Scanning Electron Microscope (SEM); para lo cual se utilizó un equipo de microscopía marca FEI modelo QUANTA FEG 650. Las imágenes obtenidas del microscopio permiten identificar la forma y calcular el tamaño de las partículas que componen el material. Adicionalmente el microscopio tiene integrado un sistema de microanálisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X, EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), el cual entrega un reporte que contiene el espectro y los elementos identificados con sus porcentajes en peso atómico. La composición química del acero inoxidable AISI 304 utilizado como sustrato se relaciona en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero Inoxidable AISI 304

ELEMENTOS	N	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	N	Fe
PORCENTAJES	0,06	1,8	0,02	0,04	0,6	19,5	9,5	0,1	68,38

Fuente: Autores del trabajo

**Adaptación de equipo de Ultrasonido para la realización de ensayos de desgaste erosivo** El equipo UIP 1000 hd genera una potencia ultrasónica de 1000 W a una frecuencia de 20 kHz, posee un ajuste de frecuencia automático, una amplitud de 25 micras ajustable entre el 50 y el 100% de este valor y cuenta con un sonotrodo fabricado de titanio; sus principales aplicaciones industriales son la dispersión, homogenización y desaglomeración de partículas, molienda de materiales, emulsificación y desintegración celular.

Para utilizar este equipo en la realización de ensayos de desgaste erosivo fue necesario adaptarlo a los requerimientos que exige la norma ASTM G32-16 "Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus", para lo cual se modificó el sonotrodo a través de la realización de un agujero roscado en la parte inferior que permita el ensamble de la probeta que se va a ensayar, adicionalmente se desconectó el sistema de recirculación de flujo con que cuenta el equipo, ya que se requiere un recipiente que permita tener un control de la temperatura y evite los efectos de la reflexión de las ondas sonoras al chocar con los límites del recipiente y la interacción con los desechos originados por el desgaste erosivo.

**Realización de ensayos de desgaste erosivo por cavitación sobre probetas de acero AISI 304** Los ensayos de desgaste erosivo por cavitación se realizaron en agua destilada con el equipo de ultrasonido UIP 1000 hd adaptado a los requerimientos de la norma ASTM G32-16, con el cual se inducen fluctuaciones de presión a través de vibraciones para generar el fenómeno de erosión por cavitación [1]. En la figura 1 se muestra una descripción esquemática del montaje utilizado para la realización de los ensayos.

La profundidad de agua destilada utilizada en el recipiente fue de  $100 \pm 10$  mm, la superficie de ensayo del espécimen fue sumergida a una profundidad de inmersión de 12 mm.

Las pruebas de erosión por cavitación se realizaron a una frecuencia de 20 kHz, con una potencia de 1000 W, la temperatura dentro del líquido fue de 25°C, el ensayo se realizó a presión atmosférica de 95 hPa y la amplitud de desplazamiento pico a pico de la superficie de ensayo de la muestra fue de 25  $\mu$ m; el diámetro de las probetas utilizadas fue de 20 mm, con un espesor de 8 mm.

En total se realizaron 35 ensayos, 5 para cada uno de los siguientes tiempos: 30, 60, 120, 240, 480, 960 y 1140 minutos. La variable medida fue la pérdida de masa del espécimen después de cada tiempo de exposición a la cavitación y se realizó a través de una balanza digital modelo BP 211 D que posee una resolución de 0.1 mg.

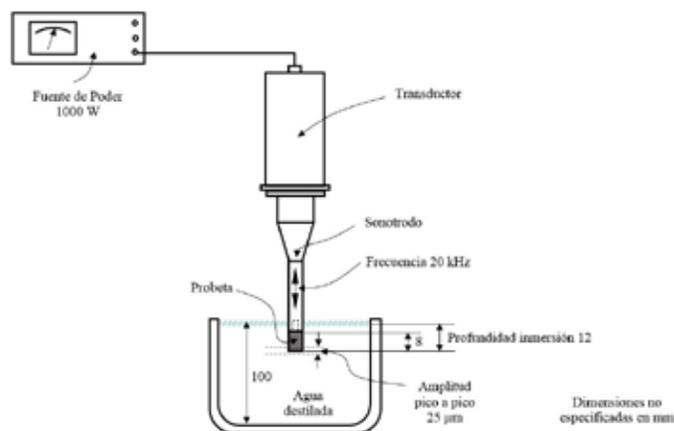


Figura 1. Montaje utilizado para la realización de ensayos de desgaste erosivo por cavitación  
Fuente: Autores del trabajo

Para probar el correcto funcionamiento de las adaptaciones realizadas al equipo de ultrasonido se ensayaron probetas de acero inoxidable AISI 304 para comparar los resultados con datos reportados en la literatura y determinar el porcentaje de error arrojado en las pruebas, como el valor obtenido fue inferior al 5% se consideró válido el resultado y se procedió a realizar los ensayos sobre probetas recubiertas con alúmina.

**Realización de Recubrimientos** Los recubrimientos de alúmina se realizaron a través del proceso de rociado térmico por llama, utilizando un pistola Eutalloy 85 BX, la cual se adapta a un equipo de combustión oxiacetilénica convencional. La distancia utilizada entre la antorcha y el material base fue de aproximadamente 30 cm, con una inclinación respecto a la horizontal de 60°. La presión de oxígeno usada fue 25 psi y la del acetileno fue 5 psi, lo que define una relación de presiones de 1:5. La caracterización morfológica y química de los depósitos se realiza con los mismos equipos y técnicas con las cuales se llevó a cabo la caracterización de la alúmina utilizados para los recubrimientos.

**Realización de ensayos en probetas con y sin recubrimientos de alúmina** Se realizaron ensayos de microdureza y resistencia al desgaste erosivo sobre probetas de acero AISI 304 con y sin recubrimientos de alúmina.

Los ensayos de microdureza se realizaron en un microdurómetro Wilson-Wolpert Tukon 2100B, de la empresa INSTRON, El tipo de microdureza medido fue la Knoop, debido a que la profundidad de la penetración es menor que las obtenidas a través de ensayos de microdureza Vickers; Los ensayos se realizaron siguiendo la norma ASTM E384 – 11 Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials; El indentador utilizado es fabricado con punta de diamante y su forma geométrica es piramidal de base, cuadrada, el cual se presiona sobre la superficie de la probeta con una fuerza controlada con alta precisión a través de la máquina de ensayo, la cual deja como resultado una huella sobre la superficie de la probeta; En total se realizaron 30 ensayos para cada clase de probeta, 10 por cada carga utilizada (50, 100 y 200 gramos-fuerza), el tiempo de aplicación fue de 12 segundos y el sostenimiento de la misma de 15 segundos.

Los ensayos de resistencia del desgaste erosivo tanto para probetas de acero inoxidable AISI 304 con y sin recubrimientos de alúmina se realizaron acorde al procedimiento descrito en el ítem 2.3 de este documento.

**Resultados y Análisis** La caracterización morfológica de la alúmina utilizada para la realización de los recubrimientos se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido; las imágenes obtenidas del procedimiento permiten cuantificar las dimensiones de las partículas presentes en la muestra, como se observa en la figura 2 y a partir de la medición de 50 de ellas se obtuvo un valor promedio de 11,27  $\mu\text{m}$  y una distribución de tamaños como se observa en la figura 3.

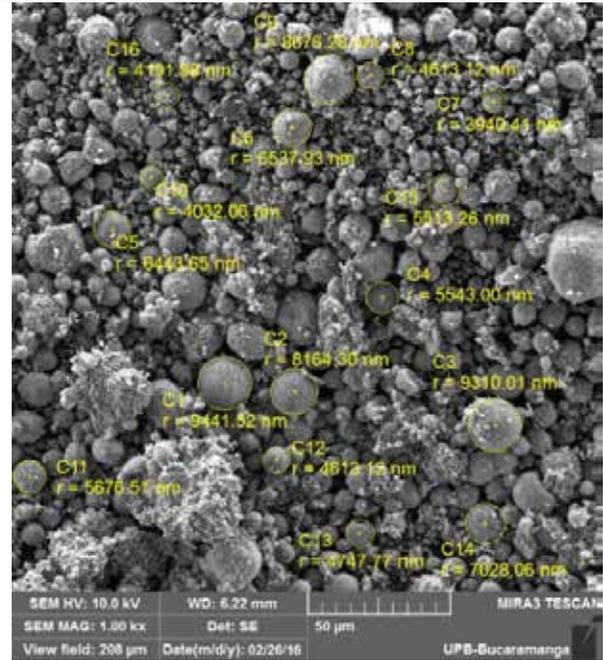


Figura 2. Imágenes de Microscopía electrónica de barrido de las partículas de alúmina utilizadas para la realización de los recubrimientos Fuente: Autores del trabajo

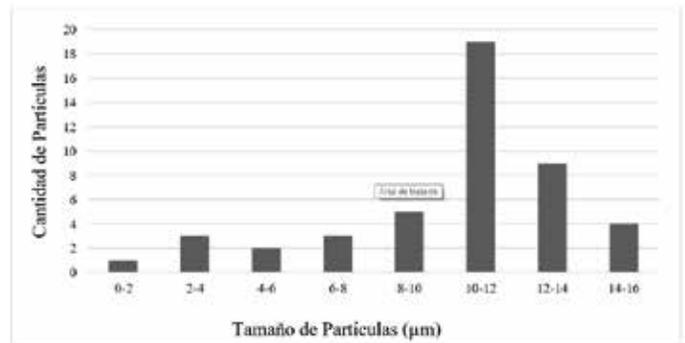
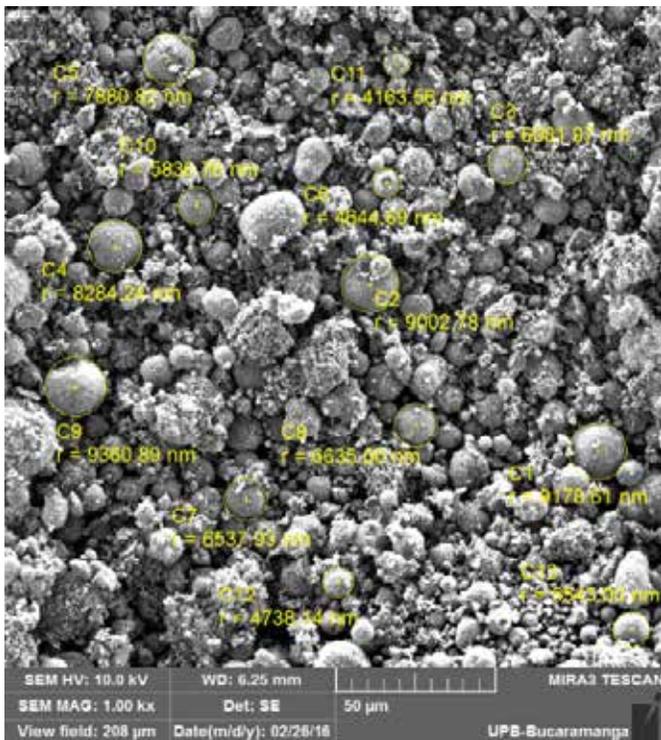


Figura 3. Distribución del tamaño de partículas presentes en la muestra de alúmina analizada para la realización de los recubrimientos Fuente: Autores del trabajo



La caracterización química de la alúmina utilizada para los recubrimientos se realizó a través de un análisis de Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS); los resultados obtenidos se relacionan en la figura 4 y arroja unos porcentajes atómicos de oxígeno y aluminio de 51,2 y 48,8% respectivamente, lo cual permite garantizar que el material analizado es alúmina con un 99,5% de pureza.

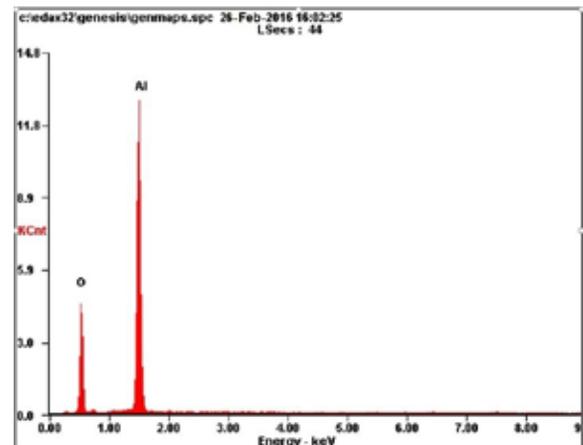


Figura 4. Resultado de la espectrometría de dispersión de energía de rayos X realizada al material utilizado para hacer los recubrimientos Fuente: Autores del trabajo.

## Comportamiento de la Resistencia al desgaste erosivo de recubrimientos de alúmina.

El análisis morfológico del recubrimiento realizado a través del proceso de rociado térmico por llama, ver figura 5, también se realizó a través de análisis por SEM; los resultados se relacionan en la figura 6. Se puede observar la discontinuidad del recubrimiento, un incremento en el tamaño de las partículas alcanzado valores máximos de alrededor de 50 micras y una gran cantidad de poros que se presentan debido a la técnica utilizada, esto concuerda con la información reportada por varios investigadores [21-24].



Figura 5. Depósito de recubrimientos de alúmina a través del proceso de rociado térmico por llama  
Fuente: Autores del trabajo

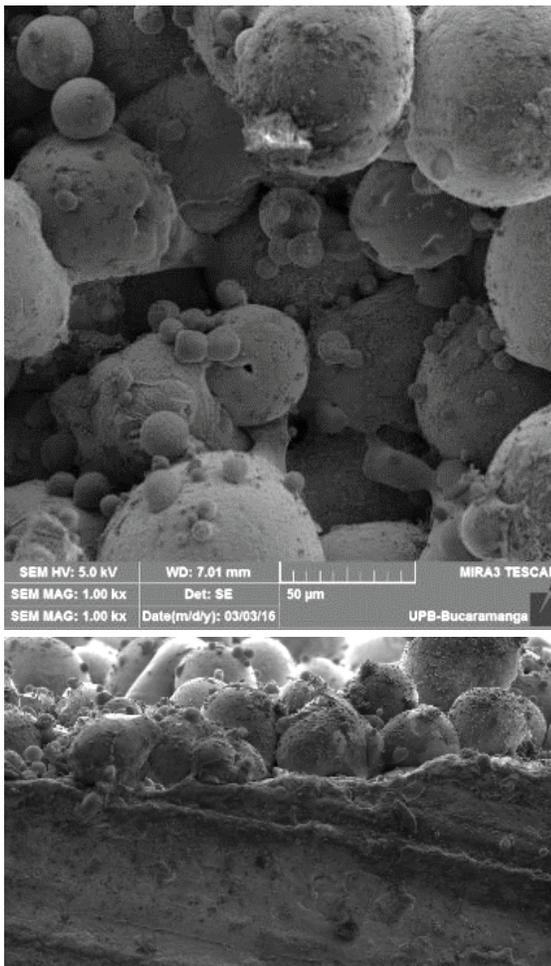


Figura 6. Vista superior y lateral de los recubrimientos de alúmina realizados a través del proceso de rociado térmico por llama Fuente: Autores del trabajo

Los ensayos de microdureza Knoop realizados a los recubrimientos de alúmina muestran un incremento del 220,3 % de su magnitud cuando se compara con los valores obtenidos de un acero inoxidable AISI 304, como se observa en la figura 7, el cual fue el material utilizado como matriz para la deposición del recubrimiento; esta información coincide con la encontrada en la literatura [10-15] que afirma que la protección de sustratos metálicos frente al desgaste se puede conseguir mediante el uso de recubrimientos compuestos principalmente por materiales cerámicos los cuales presentan una mejora significativa en la dureza del material y por consiguiente una mayor resistencia al desgaste.

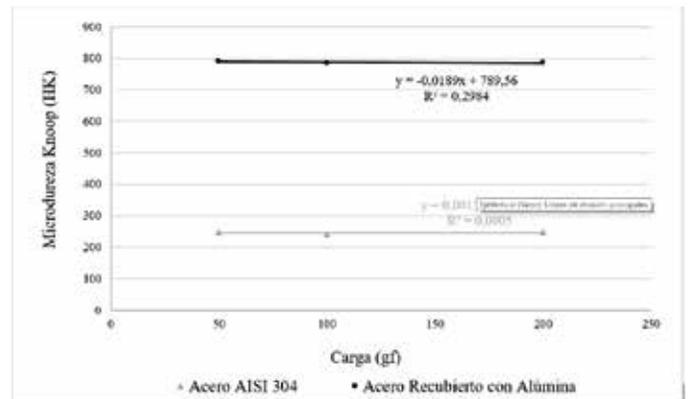


Figura 7. Resultados de microdureza Knoop realizada a un acero inoxidable AISI 304 y a recubrimientos de alúmina depositados a través de un proceso de rociado térmico por llama.  
Fuente: Autores del trabajo

La validación del uso del equipo de ultrasonido UIP 1000 hd en la realización de ensayos de desgaste erosivo por cavitación se llevó a cabo mediante el uso de imágenes de microscopía electrónica de barrido, a través de las cuales se cuantificó la variación de las dimensiones de las huellas dejadas sobre probetas de acero inoxidable AISI 304 en determinados tiempos de exposición al fenómeno; en la figura 8 se observan estas imágenes para tiempos de ensayo de 240, 960 y 1440 minutos y se aprecia una relación directamente proporcional entre estas dos variables, es decir, en la medida que el tiempo de ensayo se incrementa las dimensiones de las huellas también aumenta, comportamiento esperado ya que la probeta está perdiendo masa debido al desgaste originado por la cavitación; también se observa la aparición de nuevas huellas que confirman en mayor grado la fenómeno de desgaste presentado en el espécimen de prueba.



Figura 8. Dimensiones de las huellas presentes en el espécimen de acero AISI 304 sometido a desgaste erosivo por cavitación para tiempos de a) 240 min, b) 960 min y c) 1440 min  
Fuente: Autores del trabajo

Los valores experimentales y teóricos de pérdida de masa obtenidos en probetas de acero AISI 304 para diferentes tiempos de exposición al fenómeno de desgaste erosivo por cavitación y su tendencia en función del tiempo, se relacionan en la figura 9.

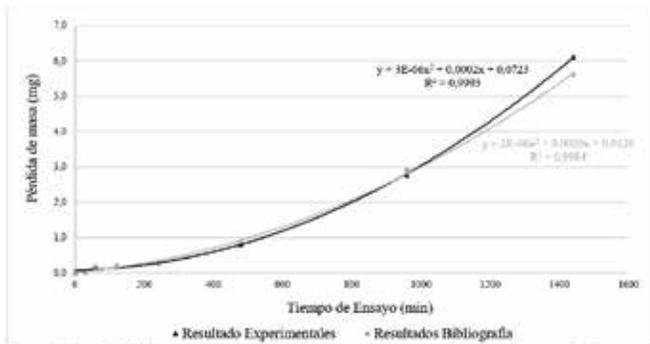


Figura 9. Pérdida de masa de probetas de acero AISI 304 expuestas al fenómeno de desgaste erosivo por cavitación Fuente: Autores del trabajo

Se observa que la tendencia de los valores obtenidos del ensayo es similar a los resultados encontrados en la literatura [31] y es polinomial de segundo orden; adicionalmente se identifican diferencias de pérdida de masa en determinados tiempo de ensayo, siendo la más significativa la que se presenta a los 1440 minutos de exposición, donde se alcanza un porcentaje de error del 4,5 % entre estos valores. A pesar de esta variación los resultados obtenidos experimentalmente se consideran aceptables y por consiguiente las modificaciones realizadas al equipo de ultrasonido utilizado para las pruebas de desgaste erosivo por cavitación se validan y el equipo se utilizan para la obtención del comportamiento de recubrimientos de alúmina depositados a través de un proceso de rociado térmico por llama frente a esta clase de desgaste.

La figura 10 muestra el comportamiento de la pérdida de masa de los recubrimientos de alúmina cuando son expuestos al fenómeno de cavitación; se puede observar un comportamiento polinomial de tercer orden, presentando un gran desprendimiento durante los primeros 240 minutos de ensayo, esto debido probablemente a la gran cantidad de irregularidades y porosidades que se presentan en recubrimientos realizados a través de proceso de rociado térmico por llama [22], posteriormente se identifica una zona de poca perdida de material en tiempos comprendidos entre 240 y 800 minutos y al final el comportamiento es similar al de un una acero inoxidable AISI 304 aunque con un porcentaje de reducción de pérdida de masa de 26,2 % lo que permite comprobar la mejora en la resistencia al desgaste erosivo por cavitación que se alcanza mediante el uso de recubrimientos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, concordando con la información reportada en la literatura [12-14].

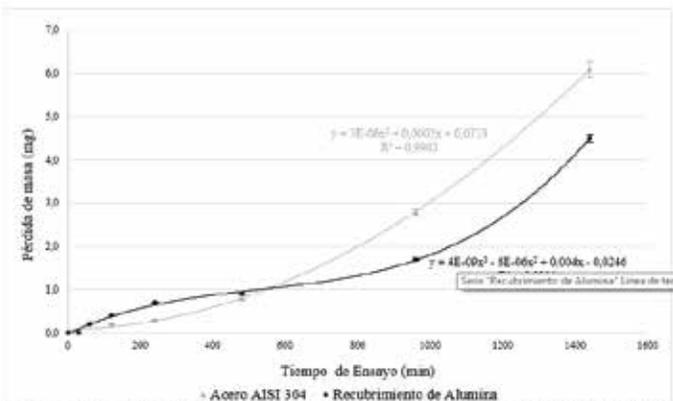


Figura 10. Comportamiento de la pérdida de masa originada por el fenómeno de cavitación en probetas de acero inoxidable AISI 304 y probetas con recubrimiento de alúmina Fuente: Autores del trabajo

## Conclusiones

- Se pudo adaptar un equipo de ultrasonido convencional para la realización de ensayos de resistencia al desgaste erosivo que cumplan con la norma ASTM G32-16.
- Los ensayos realizados al acero Inoxidable AISI 304 demostraron que el error máximo obtenido durante los ensayos de resistencia al desgaste erosivo, con respecto a los datos encontrados en la literatura, es del 4,5% aproximadamente.
- Los recubrimientos realizados a partir de alúmina de tamaño micrométrico mediante rociado térmico por llama arrojaron una reducción de material perdido durante el ensayo de resistencia al desgaste erosivo del 26,23% con respecto a las probetas de acero inoxidable AISI 304 sin recubrimiento.
- Durante bajos periodo de tiempo de ensayos el recubrimiento de alúmina presento una mayor pérdida de materia, esto es debido a la irregularidad superficial y a la gran cantidad de poros que se obtienen cuando se utiliza un proceso de rociado térmico por llama.

## Referencias

- [1] American Society for Testing and Materials. (2017). Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus: ASTM G32-16. W. Conshohocken, United States: ASTM International.
- [2] K.H. Lo, F.T. Cheng, C.T. Kwok, et al., "Improvement of cavitation erosion resistance of AISI 316 stainless steel by laser surface alloying using fine WC powder", Surface and Coating Technology, vol. 165, no. 3, pp. 258-267, February 2003.
- [3] B. Saleh, A. Abouel-Kasem, A. Ezz El-Deen, et al., "Investigation of temperature effects on cavitation erosion behavior based on analysis of erosion particles", Journal of Tribology, vol. 132, no. 4, (041601-1–041601-6), September 2010.
- [4] A. Krella, "An experimental parameter of cavitation erosion resistance for TiN coatings", Wear, vol. 270, no. 3-4, pp. 252-257, January 2011.
- [5] A. Krella and A. Czyniecki, "Cavitation erosion resistance of nanocrystalline TiN coating deposited on stainless steel", Wear, vol. 265, no. 7-8, pp. 963-970, September 2008.
- [6] M.C. Park, K.N. Kim, G.S. Shin, et al., "Effects of strain induced martensitic transformation on the cavitation erosion resistance and incubation time of Fe-Cr-Ni-C alloys", Wear, vol. 274-275, pp. 28-33, January 2012.
- [7] A.K. Krella, "Cavitation erosion resistance parameter of hard CVD coatings", Progress in Organics Coatings, vol. 70, no. 4, pp. 318-325, April 2011

- [8] Y.G. Zheng, S.Z. Luo and W. Ke, "Cavitation erosion–corrosion behavior of CrMnB stainless overlay and 0Cr13Ni5Mo stainless steel in 0.5 M NaCl and 0.5 M HCl solutions", *Tribology International*, vol. 41, no. 12, pp. 1181-1189, December 2008.
- [9] D.M. García-García, J. García-Antón, A. Igual-Muñoz, et al., "Effect of cavitation on the corrosion behavior of welded and non-welded duplex stainless steel in aqueous LiBr solutions", *Corrosion Science*, vol. 48, no. 9, pp. 2380-2405, September 2006.
- [10] W.M. Rainforth, "The wear behaviour of oxide ceramics-A Review", *Journal of Materials Science*, vol. 39, no. 22, pp.6705-6721, November 2004.
- [11] L. Lara-Ortiz, F.F. Parada-Becerra, E.D. Valbuena-Niño, P.A. Tsygankov, V. Dugar-Zhabon and A. Plata-Gómez. "Temperature behaviour on deposition of the titanium nitride thin films on H13 steel by the electric arc discharge in vacuum", *Respuestas*, vol. 22, no. 2, pp. 14-22, 2017.
- [12] F.G. Ferré, E. Bertarelli, A. Chiodoni, et al., "The mechanical properties of a nanocrystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating measured by nanoindentation and Brillouin spectroscopy", *Acta Materialia*, vol. 61, no. 7, pp. 2662-2670, April 2013.
- [13] S. Hackemann, F. Flucht and W. Braue, "Creep investigations of alumina -based all- oxide ceramic matrix composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 12, pp. 1768-1776, December 2010.
- [14] G. Di Girolamo, A. Brentari, C. Blasi, et al., "Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed alumina-based coatings", *Ceramics International*, vol. 40, no. 8, pp. 12861-12867, September 2014.
- [15] O. Tazegul, F. Muhaffel, O. Meydanoglu, et al., "Wear and corrosion characteristics of novel alumina coatings produced by micro arc oxidation on AZ91D magnesium alloy", *Surface and Coatings Technology*, vol. 258, pp. 168-173, November 2014.
- [16] M.A. Zavareh, A.A.D.M. Sarhan, B.B.A. Razak, et al., "Plasma thermal spray of ceramic oxide coating on carbon steel with enhanced wear and corrosion resistance for oil and gas applications", *Ceramics International*, vol. 40, no. 9A, pp. 14267-14277, November 2014.
- [17] Y.M. Franco, C. Ortiz, J.E. Rodríguez-Paéz y J.H. Bautista-Ruiz, "Obtención y Caracterización de recubrimientos de TiO<sub>2</sub> por el método de complejo polimerizable (PECHINI)", *Respuestas*, vol. 15, no. 1, pp. 25-32, 2010.
- [18] S. Canovic, B. Ljungberg and M. Halvarsson, "CVD TiC/alumina multilayer coatings grown on sapphire single crystals", *Micron*, vol. 42, no. 8, pp. 808-818, December 2011.
- [19] E.E. Ashkihazi, V.S. Sedov, D.N. Sovyk, et al., "Plateholder design for deposition of uniform diamond coatings on WC-Co substrates by microwave plasma CVD for efficient turning application", *Diamond & Related Materials*, vol. 75, pp. 169-175, April 2017.
- [20] J.R. Davis. *Handbook of Thermal Spray Technology - Introduction to thermal spray processing*. United States of America: ASM International and Thermal Spray Society, 2004.
- [21] T.J. Steeper, W.L. Riggs II, A.J. Rotolico, et al. "Thermal Spray Coatings: Properties, Processes and Applications" in *Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference*, (Pittsburgh, Pennsylvania), pp. 13-14, ASM International, 1992.
- [22] L. Pawlowski. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [23] S. Grainger and J. Blunt. *Engineering Coatings - Design and Application*. Cambridge: Abington Publishing, Second Edition, 1998.
- [24] J.L. Marulanda, A. Zapata y E. Isaza, "Protección contra la corrosión por medio del rociado térmico", *Scientia et Technica*, vol. 34, pp. 237-242, Mayo 2007.
- [25] M. Gell, E.H. Jordan, Y.H. Sohn, et al., "Development and implementation of plasma sprayed nanostructured ceramic coatings", *Surface & Coatings Technology*, vol. 146–147, pp. 48-54, October 2001.
- [26] E.H. Jordan, M. Gell, Y.H. Sohn, et al., "Fabrication and evaluation of plasma sprayed nanostructured alumina–tania coatings with superior properties", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 301, no. 1, pp. 80-89, March 2001.
- [27] Y. Lei, H. Chang, X. Guo, at al., "Ultrasonic cavitation erosion of 316L steel weld joint in liquid Pb-Bi eutectic alloy at 550 °C", *Ultrasonics – Sonochemistry*, vol. 39, pp. 77-86, March 2017.
- [28] D.G. Li. J.D. Wang, D.R. Chen, et al., "The role of passive potential in ultrasonic cavitation erosion of titanium in 1 M HCl solution", *Ultrasonics – Sonochemistry*, vol. 29, pp. 279-287, October 2015.
- [29] I. Mitelea, E. Dimian, I. Bordeasu, et al., "Ultrasonic cavitation erosion of gas nitrated Ti-6Al-4V alloys", *Ultrasonics – Sonochemistry*, vol. 21, pp. 1544-1548, January 2014.
- [30] S. Zhang, S. Wang, C.L. Wu, et al., "Cavitation erosion and erosion-corrosion resistance of austenitic stainless steel by plasma transferred arc welding", *Engineering Failure Analysis*, vol. 76, pp. 115-124, February 2017.
- [31] S. Jiang, H. Ding and J. Xu, "Cavitation erosion resistance of Sputter-Deposited Cr<sub>3</sub>Si film on Stainless Steel", *Journal of Tribology*, vol. 139, no. 1, pp. 1-5, June 2016.