



## Estudio de la resistencia al desgaste por deslizamiento de recubrimientos de carburo de tungsteno.

### Study of the wear resistance due to sliding of tungsten carbide coatings.

Enrique Alejandro López Baltazar<sup>1,2\*</sup>, Haideé Ruiz Luna<sup>2</sup>, Alejandro López Ibarra<sup>2</sup>, Francisco Alvarado Hernández<sup>2</sup>, Víctor Hugo Baltazar Hernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CIATEQ, Doctorado en Manufactura Avanzada.

Circuito Aguascalientes Norte # 135. Parque Industrial del Valle de Aguascalientes, San Francisco de los Romo, Aguascalientes. C.P. 20358. México 52 (449) 973 1060 ext. 2208. ealopezb@gmail.com.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Zacatecas, Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

Av. Ramón López Velarde 801, Col. Centro, Zacatecas, Zacatecas, México.

(492) 92 5 66 90 ext. 4261, 4265. ruluhaid@gmail.com, lopezi\_a@yahoo.com.mx,

ingenierofah@gmail.com, victor.baltazar@uaz.edu.mx

#### Resumen

En el presente trabajo se realizaron recubrimientos superficiales de carburo de tungsteno sobre un sustrato de acero del tipo AISI 1018 mediante el proceso de rociado térmico utilizando tres diferentes tipos de flama: carburante, neutra y oxidante. Los resultados indican que los valores de porosidad son menores bajo condición de flama carburante con una microestructura compuesta de partículas semi-fundidas y sin fundir, de estructura no laminar, y con presencia de líneas de óxidos. La dureza medida en el recubrimiento de condición carburante resultó por encima de los 1000Hv debido a la presencia de partículas duras de WC y de W<sub>2</sub>C. Así mismo, los recubrimientos realizados bajo condición de flama carburante resultaron en una resistencia al desgaste bastante aceptable de acuerdo al análisis realizado bajo diferentes condiciones de carga y tiempo de deslizamiento. Finalmente se concluye que las partículas presentes de carburo de tungsteno y la dureza relativamente de éstas influyeron en la resistencia al desgaste de estos recubrimientos a pesar de la porosidad aparente observada.

*Palabras clave:* Carburo de tungsteno, desgaste

por deslizamiento, porosidad, rociado térmico.

#### Abstract

In this work tungsten carbide coatings have been deposited onto AISI/SAE 1018 steels by using a thermal spray process and by setting three types of flames viz. reducing, neutral and oxidizing. Results indicated that percent of porosity is lower in specimens made upon reducing type of flame and the microstructure is composed of semi-molten and un-molten particles, non-lamellar structure, and with presence of oxide stringers. Hardness measurements upon reducing condition resulted above 1000Hv due to presence of hard particles of WC and W<sub>2</sub>C. Moreover, the sliding wear resistance upon reducing condition was acceptable according to the analysis made under different testing conditions of loading and sliding time. Finally, it is concluded that tungsten carbide particles and the relatively high hardness value has strong influence on the sliding wear resistance in spite of the observed porosity.

*Keywords:* Thermal spray, type of flame, tungsten carbide, porosity, sliding wear

**91**

## **1. Introducción**

En los sectores como en la industria aeroespacial, automotriz, química, de petróleos y minera, utilizan los recubrimientos por rociado térmico por flama, donde su principio se basa en depositar polvos o alambre sobre un sustrato por el impacto de partículas fundidas o semi-fundidas, seguido por un enfriamiento y solidificación, con la finalidad de prolongar la vida útil de los componentes para aumentar la resistencia a la corrosión y el desgaste (Jia-Jian Tian et al., 2016; Guan-Jun Yang et al., 2013).

Los parámetros que afectan directamente el proceso de rociado térmico por flama son el tiempo, la temperatura y la masa, una combinación de las variables en cada categoría pueden garantizar un recubrimiento aceptable (Areeya R., y Soranat R., 2015). Con el fin de estabilizar el proceso de rociado térmico, las variables más importantes son: la manipulación de la pistola de rociado, el tiempo de aplicación, la temperatura y la cantidad de masa depositada, las cuales deben mantenerse constantes durante el proceso (ASM TSS, 2004). Las variables con respecto al tiempo: corresponden el diseño de la pistola (geometría del orificio, diámetro de salida), flujo gas (interviene en la temperatura, velocidad y presión), relación de gases de combustión, características del gas para generación del arco y tipo de energía (química o eléctrica) (Jiajing Pan et al., 2016). Otras variables que se tienen que considerar son: diámetro, tamaño, morfología, distribución de la partícula; composición química, punto de fusión, propiedades termo-físicas y el coeficiente de expansión térmica del polvo y finalmente el acabado superficial en el sustrato (Lutz-Michael Berger, 2015).

La elección de los parámetros operativos para la aplicación de los recubrimientos aleados con 86%

CW, 10% Co y 4% Cr tiene un efecto importante sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento en cuestiones de adherencia y porosidad por mencionar algunos. El uso de diferentes tipos de flama tiene un efecto en la temperatura y la velocidad de la partícula al ser proyectada, de esta manera, la microestructura resultante (dureza) depende de esos parámetros. El análisis permite establecer los límites de los parámetros utilizados en función de la eficiencia en cuanto a la resistencia al desgaste.

### **1.1 Problema**

El desgaste por fricción es uno de los problemas más comunes que se presentan y tienden al remplazo de las piezas constantemente debido a sus altas tasas de desgaste y falta de protección a la corrosión. En este estudio de investigación se pretende estudiar el efecto de los parámetros de rociado sobre la microestructura y resistencia al desgaste por fricción, que ayuden a aumentar la vida útil en componentes utilizados en la industria.

### **1.2 Objetivo**

Evaluar el grado de porosidad, espesor, microestructura y el desgaste por deslizamiento de un recubrimiento de carburo de tungsteno depositado por rociado térmico por flama en un acero AISI 1020 mediante tres diferentes tipos de flama: carburante, neutra y oxidante.

## **2. Metodología**

Se emplearon muestras tipo cilindro (pin) con un diámetro de 10 mm y 31 mm de largo con geometría en forma de domo en el extremo, en acero de bajo carbono AISI 1018. Los pines fueron sometidos a un proceso de granallado (sandblasting por su nombre en inglés) para eliminar la contaminación superficial y dejar una rugosidad superficial Ra aproximada de 5  $\mu$ m.

92

Los polvos utilizados para realizar los recubrimientos por rociado térmico por flama, es una aleación comercial de 86% CW, 10% Co, 4% Cr con un tamaño de partícula entre 11 y 45 $\mu$ m. Las partículas se caracterizan por ser porosas, esta porosidad se atribuye al proceso de manufactura, aglomerado y sinterizado (L. Pawlowsky, 2008).

Para depositar el polvo en el sustrato se utilizó una pistola de rociado térmico por flama, modelo CastoDyn DS-8000. Los parámetros utilizados fueron: una boquilla del número 10 (diámetro 4.8 mm), tres tipos de flama: carburante (C), neutra (N) y oxidante (O), la distancia de rociado de 200 mm, velocidad de rociado 14.7 m/mm con una sola pasada de rociado con respecto al sustrato, como se muestra en la Fig. 1.

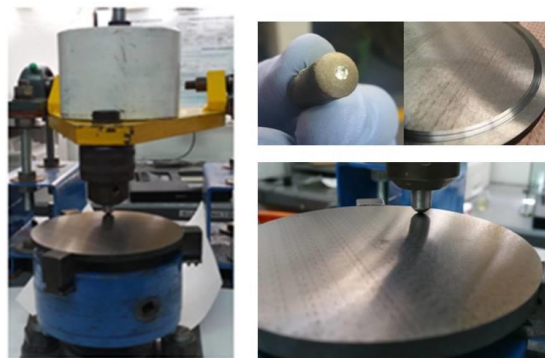
Para identificar las muestras (pines) con rociado térmico por flama se designaron de acuerdo al número de la boquilla y al tipo de flama, así por ejemplo la designación 10/C, corresponde el 10 al número de la boquilla y C a la flama carburante.



**Figura. 1.** Recubrimiento mediante rociado térmico por flama en muestras cilíndricas.

Para la prueba de desgaste por deslizamiento por el método de espiga sobre disco (pin on disk, por su nombre en inglés), se utilizó la norma ASTM G99 (G02.40, 2010), se colocaron las muestras en un sujetador buscando un contacto uniforme entre la superficie del disco de acero AISI D2 con una

dureza de 62 HRC (ver Fig. 2), se variaron la carga de ensayo, y el tiempo de deslizamiento de la siguiente manera: 30N, 50N, 80N y 100N para la carga, y 10 min, 15 min, 30 min, y 45 min para el tiempo, a una velocidad rotacional de 400 rpm.



**Figura. 2.** Máquina de desgaste espiga sobre disco (pin on disk por su nombre en inglés).

Para el análisis metalográfico se prepararon las muestras y se establecieron planos de referencia. Para encapsular las muestras se utilizó polvo termoplástico transparente (lucita), lijas de SiC (60, 100, 500 y 1200  $\mu$ m), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 0.05 $\mu$ m, paño Dip-Floc para 0.05  $\mu$ m y un ataque para revelar la microestructura denominado Murakami's (K3Fe (CN)6, KOH y agua destilada) (R. Boyer, 2004).

Se caracterizó la sección transversal de los recubrimientos rociados por flama usando un microscopio óptico y un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, Scanning Electronic Microscope, Tescan Mira3) equipado con un espectrómetro de Rayos X de energía dispersiva (EDX, energy-dispersive X-ray spectrometer) para cuantificar la composición química.

Los recubrimientos fueron evaluados por Difracción de Rayos X (XRD por sus siglas en inglés) usando una radiación Cu-K $\alpha$  en un difractómetro D8Advance Bruker.

Para la realización de las pruebas de microdureza, se utilizó un microdurómetro SHIMADZU con

una carga aplicada de 2.942N y un tiempo de permanencia de 1 s.

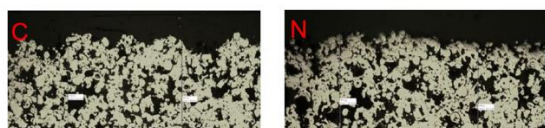
### 3. Resultados

#### 3.1 Porosidad aparente y espesor del recubrimiento.

De acuerdo a los resultados medidos de porosidad en la Tabla 1, se observa que independientemente de la flama utilizada el porcentaje de porosidad es muy consistente para los recubrimientos, siendo ligeramente mayor para la condición 10/C. Por otro lado, el espesor de los recubrimientos (ver Fig. 3), resultó en un rango entre 0.4 y 0.55 mm, siendo el recubrimiento con flama neutra el de mayor tamaño (Tabla 1).

**Tabla 1.** Mediciones de porosidad y espesor del recubrimiento.

	% Porosidad	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
10/C	16.7 $\pm$ 1.6	541.8
10/N	14.7 $\pm$ 1.7	549.8
10/O	15.9 $\pm$ 1.9	412.7

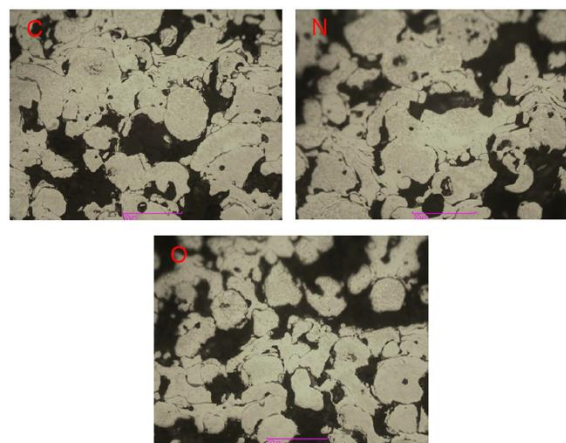


**Figura 3.** Espesor y porosidad del recubrimiento en sus tres variantes carburante(C), neutra (N) y oxidante (O). (100x)

#### 3.2 Microestructura y Dureza

En la Fig. 4, se observa que el recubrimiento está formado en su mayoría por partículas sin fundir y semi-fundidas, además de la presencia de porosidad (zonas oscuras). En la microestructura del recubrimiento se puede observar una zona clara la cual está compuesta al interior de carburo de tungsteno conjuntamente con la presencia del aglutinante formado de Co, Cr y W.

La microdureza medida para la condición 10/C arrojó un valor de 1039  $\pm$  204 HV, para 10/N y 10/O microdureza de 1009  $\pm$  203 HV y 944  $\pm$  235 HV, respectivamente.



**Figura 4.** Microestructura del recubrimiento en sus tres variantes carburante(C), neutra (N) y oxidante (O). (1000x)

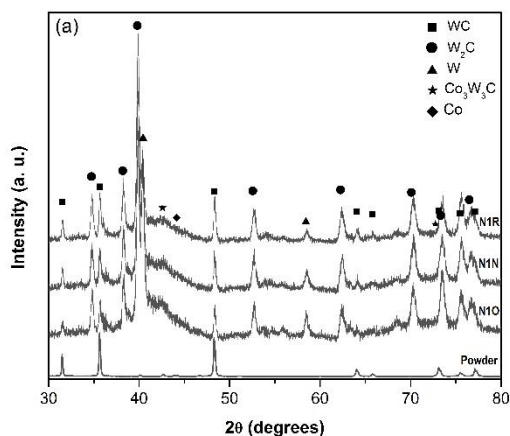
#### 3.3 Evaluación de fases

En el difractograma del polvo original se muestra al WC como la fase con mayor presencia, así como algunos rastros de la fase Co y la fase  $\eta$ - $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  (Fig. 5). Por otro lado, las intensidades correspondientes a las fases de WC,  $\text{W}_2\text{C}$ , W y  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  se observan en todos los recubrimientos, esto indica un proceso de decarburización y disolución del WC durante el proceso de rociado térmico (Karla Ofelia Méndez-Medrano et al, 2018). Sin embargo, al realizar una

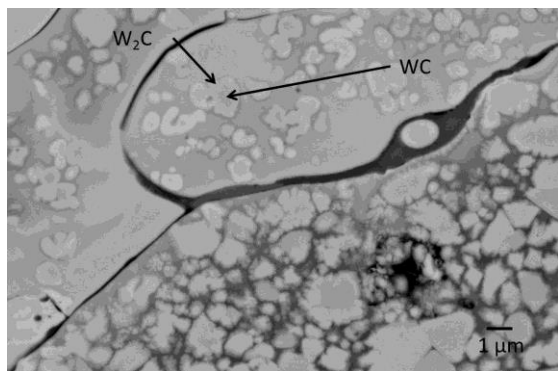
94

semicuantificación en el resultado de difracción, se obtiene que las muestras de tipo 10/C retienen en mayor proporción las fases WC, W<sub>2</sub>C.

Los estudios de microscopia electrónica de barrido (MEB) en la muestra 10/C en sección transversal (ver Fig 6), muestra una microestructura no uniforme, con partículas no fundidas y parcialmente fundidas, óxidos y poros. Asimismo se observa los granos de carburo de tungsteno en forma redonda donde en el interior consiste en de WC rodeado de W<sub>2</sub>C, debido a la disolución de partículas de carburo de tungsteno durante el rociado por flama (Jacobs et al., 1998)



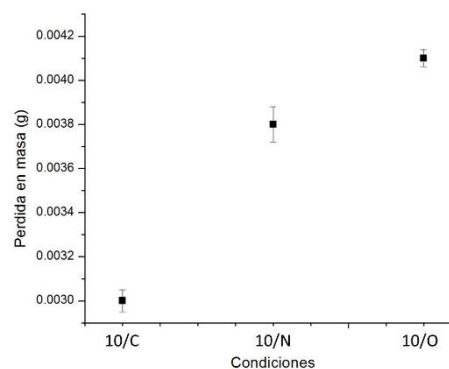
**Figura. 5.** Difracción de rayos X del polvo original y de recubrimientos WC-Co-Cr en sus tres variantes carburante(C), neutra (N) y oxidante (O). (Karla Ofelia Méndez-Medrano et al, 2018).



**Figura. 6.** WC-Co-Cr depositado con boquilla 10 y flama carburante (10/C), imagen mediante MEB (5000 x).

### 3.4 Resistencia al desgaste

En la Fig. 7, se observa el comportamiento de la boquilla número 10 (4.8 mm de diámetro) con diferentes flamas, se seleccionó la condición 10/C con el recubrimiento de flama carburante para la realización de más pruebas de espiga sobre disco para determinar el efecto del tiempo y carga sobre la pérdida de masa, debido a que la condición 10/C presenta menor cantidad de masa perdida con respecto a 10/N y 10/O en pruebas con una carga de 50N y tiempo de prueba de 15 min.



**Figura. 7.** Desgaste por deslizamiento de los recubrimientos WC-Co-Cr en sus tres variantes carburante(C), neutra (N) y oxidante (O) en función de la carga aplicada.

A pesar de que las muestras de condición 10/C presentaron una mayor porosidad aparente; la mejorada resistencia al desgaste por deslizamiento en esta condición puede explicarse debido a dos efectos: primero, los poros actúan como cavidades o depósitos para que las partículas generadas durante el proceso de desgaste sean atrapadas, las cuales pueden servir como lubricante o como barreras anti-desgaste (J. Voyer y B. R. Marple, 1999); segundo, la mayor proporción de las fases duras WC y W<sub>2</sub>C presentes en estas muestras son consistentes con



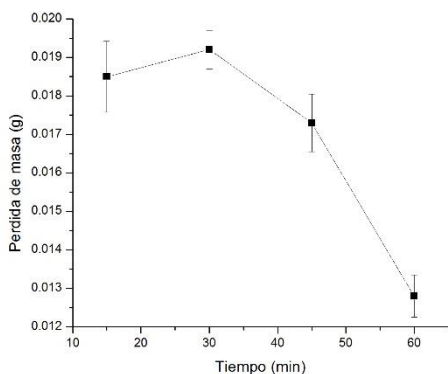
95

los altos valores de dureza obtenidos (1039 HV), lo que indica una buena relación entre microestructura-dureza-resistencia al desgaste.

### 3.5 Influencia de la carga aplicada y el tiempo de deslizamiento sobre el desgaste

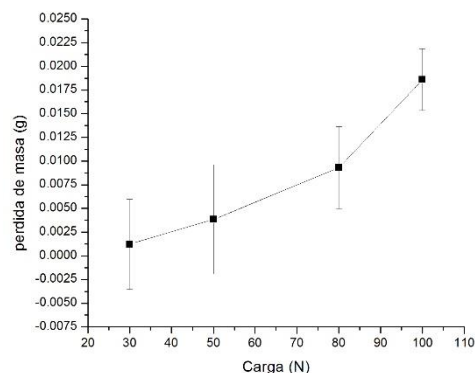
De acuerdo a los resultados de la Figura 7; las muestras bajo condición de flama carburante (10/C) resultó con mejor resistencia al desgaste (menor pérdida en masa) en comparación con las muestras rociadas térmicamente bajo condiciones de flama neutra y oxidante.

El comportamiento al desgaste de las muestras (pines) de condición carburante 10/C sujetas a desgaste por deslizamiento en función del tiempo de exposición a una carga constante de 100N se observa en la Fig. 8. Así mismo, se observa que conforme aumenta el tiempo de exposición de las muestras (por arriba de los 30 minutos) bajo deslizamiento friccionante; la resistencia al desgaste mejora (menor pérdida en masa). Lo anterior se debe a que existe mayor tiempo para que las partículas duras que son desprendidas se alojen en las cavidades o poros, lo ofrece mayor cantidad de partículas alojadas a mayores tiempos de exposición, minimizando la pérdida en masa a mayores tiempos de exposición.



**Figura. 8.** Pérdida en masa con respecto al tiempo de exposición y con carga constante de 100 N para muestras 10/C.

En Fig. 9; se observa que la pérdida de masa incrementa con la carga normal aplicada. Un comportamiento que es bastante consistente para el comportamiento por deslizamiento entre pares.

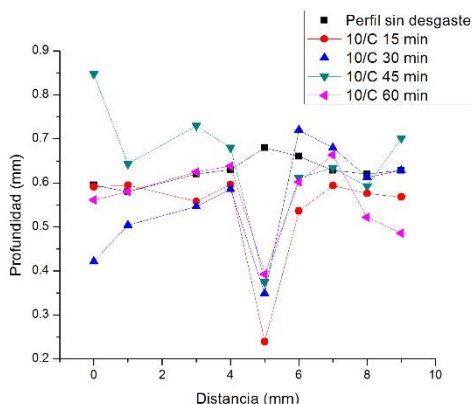


**Figura. 9.** Pérdida de masa con respecto a la variación de la carga de ensayo en configuración “pin on disk” y con un tiempo constante de 15 minutos, para pines de 10/C.

Posterior a las pruebas de desgaste por deslizamiento los pines se seccionaron transversalmente para el análisis de la profundidad de penetración de la huella de desgaste, tomando como referencia una muestra no ensayada por desgaste. En la Fig. 10, la línea negra representa el perfil sin desgaste, mientras que las demás líneas muestran las condiciones de desgaste con respecto al tiempo de 15, 30, 45 y 60 min.

Analizando el conjunto de gráficas que conforman la Fig. 10, podemos observar que con una carga de 100 N, la profundidad de la huella es mayor en la parte central del pin, suponiendo que por el mismo peso ejercido el deslizamiento solo es consistente en dicho punto por lo tanto se logra un desgaste puntual, en tiempos de 15 y 30 min es mayor la profundidad de la huella de desgaste al ser comparado contra su propio perfil. Estos

resultados son consistentes con la mejorada resistencia al desgaste bajo condiciones de tiempos mayores de deslizamiento en el par.



**Figura. 10.** Gráficas de la profundidad de huella de desgaste para pines 10/C con carga de 100N y tiempos de 15, 30, 45 y 60 min.

## Conclusiones

Los recubrimientos depositados bajo diferentes condiciones de flama mostraron presencia de porosidad aparente en un rango entre 147 y 16.7 por ciento, sin embargo la porosidad bajo la condición de flama carburante resultó ligeramente mayor.

La microestructura fue consistente en todas las condiciones evaluadas y está formada de partículas semi-fundidas y/o sin fundir, compuesta de una matriz de Co, W, y con fases del tipo  $\eta$ -Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C, WC, y W<sub>2</sub>C.

La dureza medida en el recubrimiento de condición carburante resultó ser mayor (1039 HV) debido a un mayor porcentaje existente de partículas duras de WC y de W<sub>2</sub>C.

La fracción volumétrica de partículas presentes de carburo de tungsteno (alta dureza), así como la presencia de porosidad (cavidades de alojamiento de partículas duras); influyeron paralelamente en

la mejor resistencia al desgaste de los recubrimientos con condición de flama carburante.

La resistencia al desgaste tiende a mejorar conforme aumenta el tiempo de deslizamiento por arriba de los 30 minutos bajo una carga constante.

Mientras que bajo condiciones de tiempo constante la resistencia al desgaste disminuye conforme aumenta la carga aplicada.

La mayor penetración del desgaste se observa en condiciones de bajos tiempos de deslizamiento en la prueba de desgaste, mientras que a mayores tiempos la penetración se ve disminuida, esto último tiene relación con la formación de cavidades que alojan las partículas duras de carburo de tungsteno.

## Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Zacatecas por su valioso apoyo y patrocinio en los estudios del Doctorado en Manufactura Avanzada en CIATEQ sede Aguascalientes.

## Bibliografía

- Jia-Jia Tian et al., (2016). An effective approach for creating metallurgical self-bonding in plasma-spraying of NiCr-Mo coating by designing shell-corestructured powders. Acta Materialia, Vol 110.
- Chang-Jiu Li et al., (2013). Development of Particle Interface Bonding in Thermal Spray Coatings: A Review. Journal of Thermal Spray Technology, Vol 22.
- Areeya R., y Soranat R., (2015). Spray coating process variable and property analysis of UV-curable polyurethane acrylate coating



- on polycarbonate substrate. Progress in Organic Coatings, Vol 89.
- ASM Thermal Spray Society. (2004). Handbook of Thermal Spray Technology. Handbook of Thermal Spray Technology (#06994G)
- Jiajing Pan et al., (2016). Numerical analysis of flame and particle behavior in an HVOF thermal spray process. Materials and Design, Vol 96.
- Lutz-Michael Berger. (2015). Application of hardmetals as thermal spray coatings. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol 49.
- L. Pawlowsky. (2008). The science and engineering of thermal spray coating, West Sussex: Jonh Wiley and sons Ltd.
- G02.40. (2010). Developed by Subcommittee: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International.
- R. Boyer. (2004). Metallography and Microstructures. (2004). Metals Handbook, ASM. Vol. 9.
- Karla Ofelia Méndez-Medrano et al., (2018). Microestructure and properties characterization of WC-Co-Cr thermal spray coatings. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, Vol 6.
- Jacobs, L. et al., (1998). Comparative Study of WC-Cermet Coatings Sprayed via the HVOF and the HVAF Process. Journal of Thermal Spray Technology, Vol 7, 213-218.
- J. Voyer y B.R. Marple. (1999). Sliding wear behavior of high velocity oxy-fuel and high power plasma spray-processed tungsten carbide-based cermet coatings, Wear 225-229.
- R. Schwetzke y H. Kreye. (1999). Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high velocity oxygen fuel spray systems, Journal of Thermal Spray Technology,

Vol. 8, No. 3.Tao, Y. & Dimitris, P. (2001). *The MV3-Tree: A Spatiotemporal access method for timestamp and interval queries*. New York: McGraw Hill.

\*Para citar este artículo: López Baltazar.E.A; Ruiz Luna H;López Ibarra A; Alvarado Hernández F; Baltazar Hernández V.H. *Study of the wear resistance due to sliding of tungsten carbide coatings*.Revista Bistua. 2019.17(3):90-97.

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: López Baltazar.E.A. CIATEQ,Circuito Aguascalientes Norte # 135.Parque Industrial del Valle de Aguascalientes, San Francisco de los Romo, Aguascalientes. C.P. 20358. México 52 (449) 973 1060 ext. 2208. ealopezb@gmail.com

Recibido: Noviembre 01 de 2018

Aceptado: Enero 30 de 2019