

## Estudio tribológico de una aleación para aplicación automotriz

F. G. Mejía Hernández<sup>1\*</sup>, M. Ramírez Cardona<sup>1</sup>, G. Luis Raya<sup>3</sup>, E. E. Vera Cárdenas<sup>2</sup>,  
A. I. Martínez Pérez<sup>2,3</sup>, E. Cardoso Legorreta<sup>1</sup>, M. Reyes Pérez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, Carboneras, Pachuca de Soto, Hidalgo, 42184, México.

fco.german.mejia@gmail.com, mariusr@uaeh.edu.mx, edgarc@uaeh.edu.mx, mreyes@uaeh.edu.mx  
<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/I.T. Pachuca, Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta Pachuca de Soto, Hidalgo, 42080, México. evera@upp.edu.mx

<sup>3</sup>Universidad Politécnica de Pachuca, Carretera Ciudad Sahagún-Pachuca Km. 20, Zempoala, Hidalgo, 43830, México. gilgamesh@upp.edu.mx, aimp@uup.edu.mx

*\*Autor de correspondencia: fco.german.mejia@gmail.com*

### RESUMEN

En este trabajo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la caracterización tribológica por deslizamiento de una aleación utilizada en el revestimiento de los cilindros de un motor de combustión interna, a partir de los cuales se determinan la tasa y los mecanismos de desgaste por medio de perfilometría, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Además, se determinó la composición química de la aleación evaluada por la técnica de espectroscopía de emisión atómica de descarga electrostática. Este estudio nos permitió entender los fenómenos que se presentan en las superficies de los materiales sujetos a desgaste del sistema de combustión interna, considerando a futuro proponer modificaciones en el material para reducir su desgaste e incrementar su vida útil. La composición de la muestra nos confirma que se trata de una fundición gris, esta contiene precipitados de grafito en forma de hojuelas, la dureza del material es 225.7 HV y la tasa de desgaste en las condiciones de prueba es  $2.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ .

**Palabras Clave:** Tribología, Deslizamiento, Desgaste, Aleación, Fundición.

### 1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los revestimientos de los cilindros utilizados en los motores de combustión interna se fabrican a partir de una fundición gris al menos del tipo BS1452, grado 17 [1]. Los cilindros pueden ser de hierro fundido que contiene fósforo, manganeso, cromo, molibdeno, vanadio y titanio como elementos de aleación, algún otro tipo de acero o aluminio. El hierro fundido es el material más comúnmente usado en los revestimientos [2]; el hierro dúctil, también conocido como hierro nodular o hierro fundido con grafito esferoidal, es un hierro fundido donde el grafito está presente como pequeñas esferas (nódulos) distribuidas en la matriz de hierro [3]. En este trabajo se reporta la caracterización tribológica y la composición química de una fundición con matriz ferrítica-perlítica; este material es ampliamente aplicado en la industria automotriz como revestimiento en los cilindros de los motores de combustión interna. Las pruebas tribológicas se realizaron con una máquina reciprocante, a partir de la cual se obtuvo el coeficiente de fricción. Posteriormente se determinó la tasa de desgaste por el análisis de la huella de desgaste por perfilometría. Los mecanismos de desgaste se determinaron

por el análisis de las imágenes obtenidas por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. La composición química de la muestra se obtuvo por la técnica de espectroscopía de emisión atómica de descarga electrostática y por el mapeo elemental a través del microscopio electrónico de barrido. El estudio tribológico nos permite tener presentes las propiedades iniciales de la aleación evaluada para proponer modificaciones en la estructura del material a partir de un de tratamiento térmico, y con esto poder reducir el desgaste generado por la fricción entre los elementos, lo que tendría como consecuencia mejorar la eficiencia de la máquina y ampliar la vida útil de las piezas.

## 2. MARCO TEÓRICO

El transporte fue responsable del 28% del consumo global de energía final en 2016. Más del 90% del consumo de energía en el transporte depende de los productos derivados del petróleo, lo que significa que las mejoras en la eficiencia pueden reducir significativamente las emisiones de contaminantes [4]. La energía del combustible en automóviles se distribuye de la siguiente manera: 38% potencia mecánica, 33% expulsada por escape y 29% en el enfriamiento del motor. Por otro lado, la potencia mecánica se redistribuye entre el 5% de transmisión, 21.5% en energía para mover el automóvil y 11.5% de la fricción en el motor. De tal manera que 33% de la energía del combustible en un automóvil se usa para vencer a la fricción. Según un estudio de K. Holmberg [5], a nivel global el consumo de energía para superar la fricción en el transporte de pasajeros por automóviles representaba en 2009, 208,000 millones de litros de gasolina o diésel. Por lo que resulta necesario enfocarse en problemas donde se requiera disminuir la fricción del motor, resistencia al rodado, engranajes, frenos, entre otros sistemas de fricción. De manera general el aprovechamiento de la energía generada en los cilindros por la combustión del combustible en los motores de combustión interna se encuentra alrededor de 35%, el resto se disipa en pérdidas termodinámicas y mecánicas entre las que se encuentra la fricción, de tal forma que en el conjunto anillo-émbolo se tiene aproximadamente la mitad de esas pérdidas; el uso de mejores materiales en los anillos, cilindros y camisas permite reducir ese porcentaje de pérdidas y aumentar la eficiencia del motor y el uso de combustible.

El hierro fundido gris, cuando se usa para revestimientos de cilindros, es tribológicamente beneficioso, ya que la fase de grafito del material proporciona un efecto de lubricación seca y además actúa como un depósito de aceite que suministra lubricante en arranques secos o condiciones similares de falta de aceite [6]. La fundición gris tiene diferentes propiedades: buena maquinabilidad, ductilidad baja, alta atenuación de vibraciones, alta conductividad térmica y buena resistencia al desgaste; en general buenas propiedades para la aplicación en revestimientos de cilindros.

## 3. PARTE EXPERIMENTAL

### *Materiales*

Se utilizó un revestimiento de cilindro Camisa C-166-X070, SKU: CA-C166X070, marca: SPQ con un diámetro interior de 101.60 mm (4"), instalado en motores a gasolina; largo: 139.7 mm. (5 ½"); diámetro exterior: 105.23 mm (4.143"). Se seccionó el cilindro en cortes transversales para obtener varias piezas de 1 x 1 cm. Las muestras se encapsularon en baquelita para ser preparadas metalográficamente mediante desbaste hasta un grano de

2000, posteriormente se pulieron con alúmina y se atacaron en Nital 4% para revelar la microestructura. Se utilizaron para la prueba tribológica pines de acero 1045.

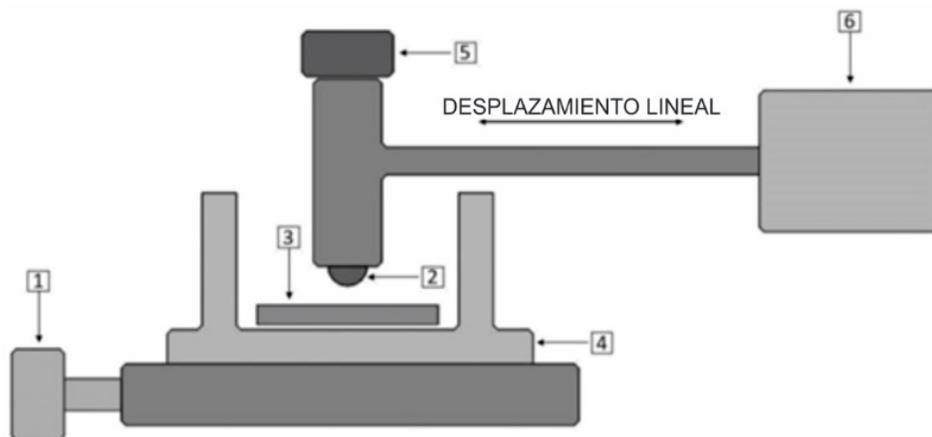
#### *Prueba tribológica*

La prueba tribológica se realizó en seco en una máquina reciprocante de deslizamiento lineal. Se usó un pin de acero 1045 para deslizarse contra la superficie del material bajo prueba. Las condiciones de la prueba se muestran en la Tabla 1.

*Tabla 1. Condiciones de prueba.*

Atmósfera	Presión Hertziana (GPa)	Carga (N)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (mm)	Ciclos
290 - 295 K 40 - 45 % de Humedad relativa	1.12	9.81	10	4	36000

El material bajo prueba y el pin de acero se colocaron como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 1. La carga normal se aplica directamente sobre el portador.



*Figura 1. Diagrama esquemático simplificado de la máquina de fricción de alta frecuencia (1: transductor de fuerza de fricción; 2: pin; 3: muestra; 4: bloque del calentador; 5: carga normal; 6: impulsor del oscilador).*

#### *Caracterización*

La composición química del material se determinó por la técnica de espectroscopía de emisión atómica de descarga electrostática (también conocida como espectroscopía de chispa) y se complementó con el análisis EDS. La dureza Vickers (HV) promedio se obtuvo en un microdurómetro de fuerza Vickers Bowers 412 DAT con una carga de 1 kg con 10 segundos de aplicación, se realizaron 10 mediciones en diferentes regiones de la superficie estudiada. El perfil de la huella de desgaste y el valor de la rugosidad promedio –a partir de 10 mediciones en diferentes regiones– se determinó utilizando un perfilómetro Mitutoyo SurfTest. La superficie del material evaluado se observó por un

microscopio óptico Nikon y por un microscopio electrónico de barrido marca Jeol JSM-6010LA.

#### 4. RESULTADOS

##### *Rugosidad y dureza*

El valor de la rugosidad promedio (Ra) obtenido está dentro del intervalo para considerar un acabado espejo [7], esto nos permite llevar de forma unificada y controlada las pruebas sobre la superficie de la aleación evaluada. La magnitud de la dureza está cercana a las reportadas para una fundición ferrítica-perlítica [8,9]. Los valores promedios de la rugosidad y la dureza se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. *Rugosidad y dureza de muestra evaluada.*

C-166-X070	Rugosidad,	Dureza
	Ra ( $\mu\text{m}$ )	(HV)
	0.051	225.7

##### *Composición química*

Los elementos presentes en la muestra evaluada se obtuvieron a partir de la espectroscopia de chispa y se reportan en la Tabla 3. Los resultados coinciden con trabajos reportados sobre la fundición gris analizada [10].

Tabla 3. *Composición química en % (no se incluye el Fe).*

C-166-X070	C	Si	Mn	P	Cr	S	Mo	Ni
		1.8	3.43	0.331	0.14	0.1647	0.0492	0.0567

La presencia de los elementos obtenidos a partir de la espectroscopia de chispa es confirmada por EDS (Figura 2a) y por mapeo elemental (Figura 2b).

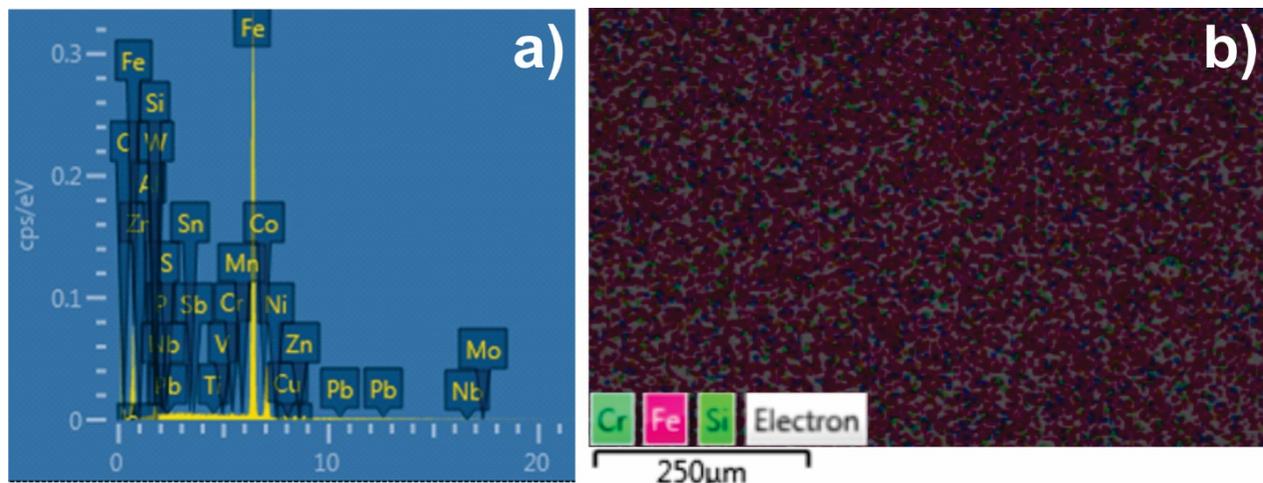


Figura 2. a) Espectro EDS y b) mapeo.

### *Microestructura*

En la Figura 3a se muestra la micrografía a 200X donde se observa la presencia de grafito en forma de hojuelas. Para el revelado de la microestructura se utilizó Nital al 4% como agente de ataque químico. La micrografía a 100X (Figura 3b) muestra el revelado de la matriz ferrítica-perlítica. La micrografía a 500X (Figura 3c) presenta claramente a partir del revelado la forma de huella digital característica de la fase perlita [11,12].

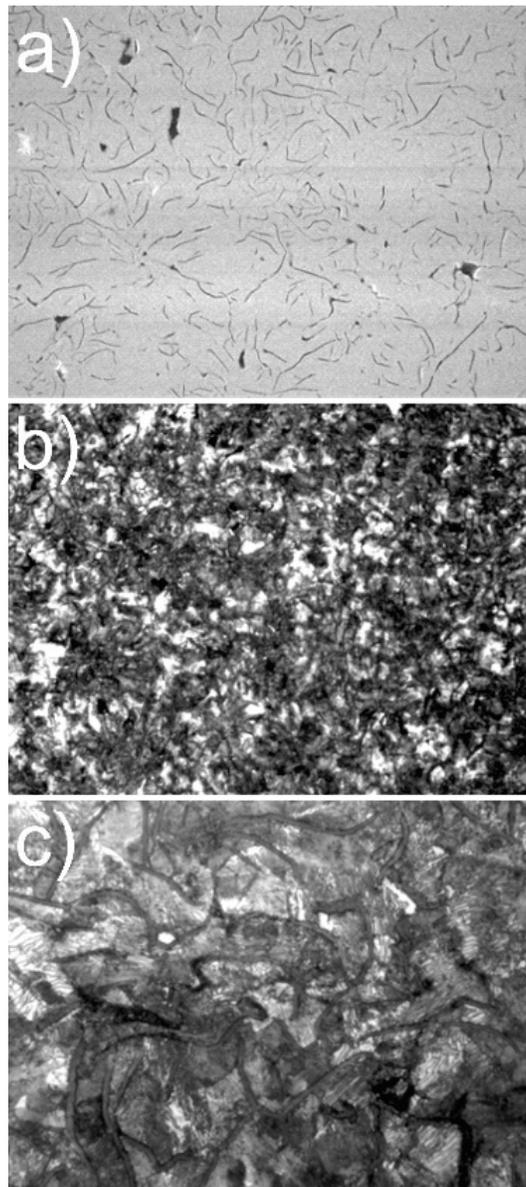


Figura 3. Micrografía a) sin revelado 200X y con revelado a b) 100X y c) 500X.

### *Caracterización tribológica*

Durante la prueba, el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) fue registrado. La Figura 4 muestra el comportamiento del coeficiente de fricción de la muestra C-166-X070 bajo condiciones secas de deslizamiento contra un pin de acero 1045. Se observa de 0 a 1300 segundos fluctuaciones, debido a la carrera del pin en contacto con asperezas de la superficie. El

valor promedio fue  $\mu=0.56$  aproximadamente, el cual es comparable con resultados de trabajos previos obtenidos por la máquina de prueba con configuración de *pin on disk* [13].

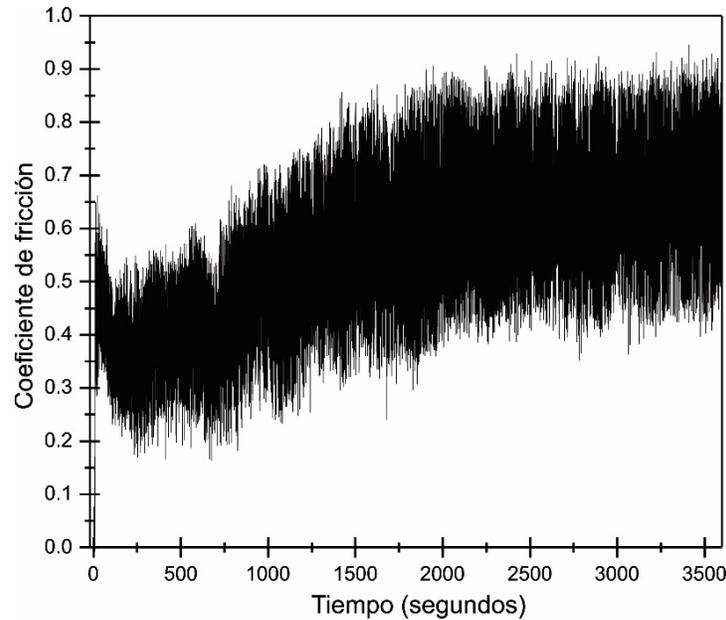


Figura 4. Coeficiente de fricción de C-166-X070.

La prueba tribológica por deslizamiento causa una huella de desgaste sobre la superficie plana. La cual presenta surcos medibles sobre la muestra evaluada (Figura 5a). La profundidad de la huella de desgaste fue medida transversalmente a su longitud por la técnica de perfilometría. En la Figura 5b, se observa la tasa de desgaste que indica de forma cuantitativa la magnitud de desgaste generado durante la prueba de deslizamiento [14], para este caso la magnitud fue de  $2.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ .

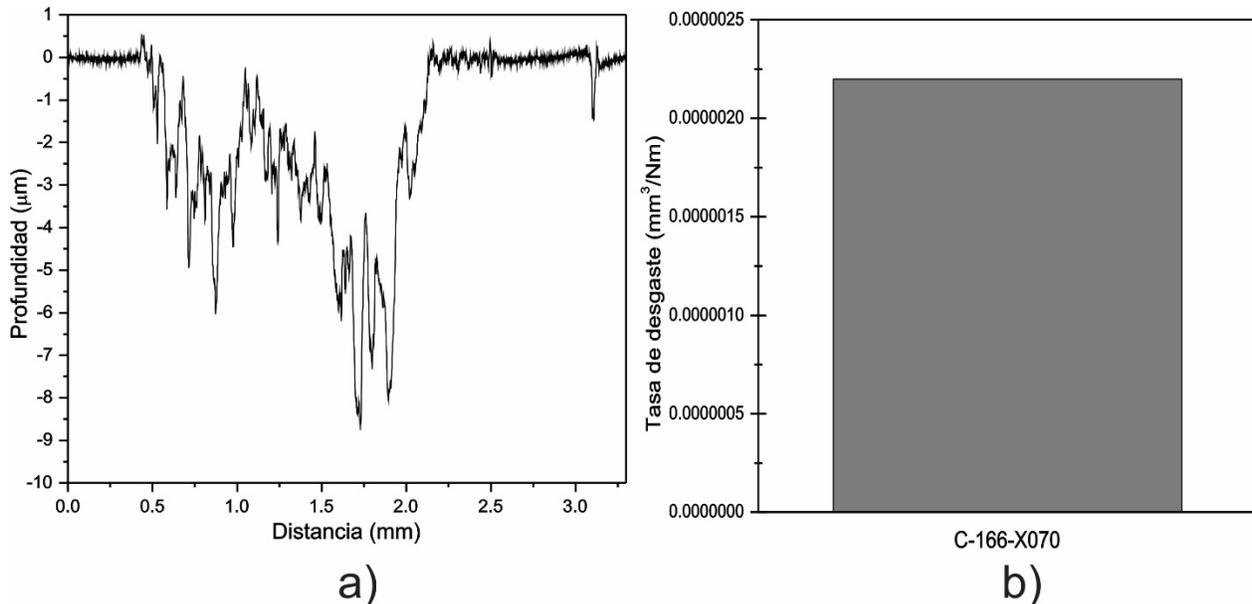


Figura 5. a) Perfil de la huella y b) tasa de desgaste.

La Figura 6 muestra las imágenes en SEM de la huella de desgaste en la superficie del C-166-X070 producida por el contacto de deslizamiento contra el pin de acero 1045. Algunas picaduras y regiones de desgaste adhesivo fueron observadas, así como los mecanismos de desgaste comunes como deformación plástica, rayaduras y microfracturas que se formaron sobre la superficie del C-166-X070.

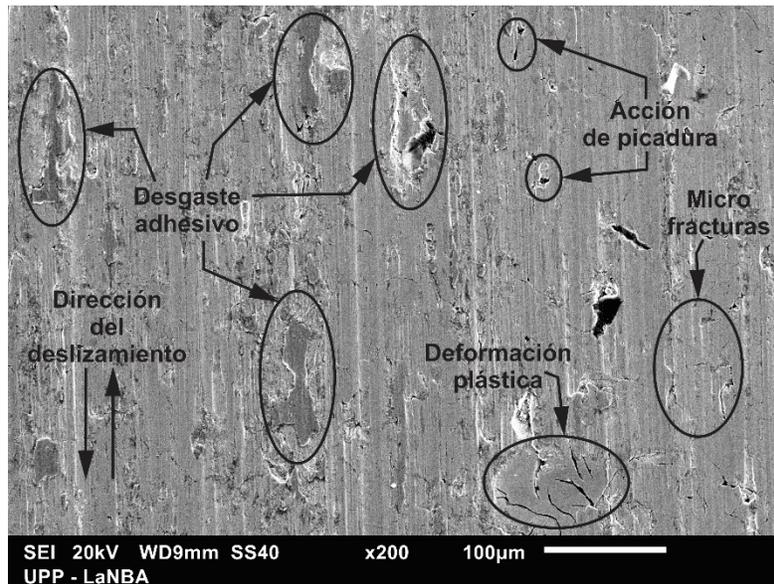


Figura 6. Huella de desgaste sobre la superficie.

#### 4. CONCLUSIONES

Mediante el análisis por espectroscopía de emisión atómica de descarga electrostática se confirma que el material en estudio es una fundición gris de aplicación automotriz. Derivado del análisis se encuentra que los principales elementos que lo componen favorecen la formación de precipitados de carbono en forma de hojuelas de grafito, proporcionando una buena lubricación en seco. El estudio tribológico muestra los principales mecanismos de desgaste encontrados: desgaste adhesivo, deformación plástica, picaduras y microfracturas. Los valores obtenidos de dureza se asocian a la microestructura ferrita-perlita. Con el objetivo de alargar la vida útil de los materiales del cilindro del motor de combustión interna, se recomienda aplicar un tratamiento térmico que aumente la dureza y contribuya a reducir el coeficiente de fricción  $\mu$  que, para la muestra estudiada, fue de 0.56.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] B.J. Taylor, T.S. Eyre. Tribology International. 12 (1979) 79–89.
- [2] P. Andersson, J. Tamminen, C. E. Sandström. Piston ring tribology: A literature survey. 1st ed. Julkaisija – UTGIVARE – Publisher, Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland (2002) 108-112
- [3] E. D. Rejowski, E. Soares, I. Roth, S. Rudolph. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 134 (2012) 072807-1-8.

- [4] F. Birol. Agency IE. Market Report Series energy efficiency. 1 (2017) 82-83.
- [5] K. Holmberg, P. Andersson, A. Erdemir. Tribology International. 47 (2012) 221–34.
- [6] W. A. Glaeser. MATERIALS FOR TRIBOLOGY. 20 (1992) 114-119.
- [7] V. V. Yashchuk, E. M. Gullikson, M. R. Howells, S. C. Irick, A. A. MacDowell, W. R. McKinney. Surface roughness of stainless-steel mirrors for focusing soft x rays. Applied Optics. 45 (2006) 4833-42.
- [8] E. Duka, H. Oettel, T. Dilo. 2nd International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress 1 (2012) 47–51.
- [9] S. O. Omole, A. Oyetunji, K. K. Alaneme, P. A. Olubambi. Journal of King Saud University – Engineering Sciences. (2018) 1018-3639.
- [10] M. C. Rukadikar, G. P. Reddy. Journal of Material Science 21(1986) 4403–10.
- [11] T. Sjogren, P. Vomacka, I. L. Svensson. International Journal of Cast Metals Research. 17 (2004) 65–71.
- [12] ASTM International. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings. American Society Testing and Materials. 67(1998) 3–4.
- [13] C. Camba, Á. Varela, V. Blázquez, A. García, J. L. Mier, F. Barbadillo. Revista de Metalurgia. 46 (2010) 40–6.
- [14] M. Franquès, M. A. Gómez. Caracterización De Las Propiedades Tribológicas De Los Recubrimientos Duros. 1er ed. Barcelona 1 (2005) 29-30.