

ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES MECANISMOS DE FALLA EN TRES FRENOS DE DISCO AUTOMOTRICES

ANALYSIS OF THE MAIN FAILURE MECHANISMS IN THREE AUTOMOTIVE DISC BRAKES

MSc. Ricardo Andrés García-León^{*,**}, MSc. Eder Flórez Solano^{*}
MSc. Edwin Espinel Blanco^{*}

***Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña,**
Facultad de Ingenierías y CA, Grupo de Investigación INGAP.
Vía Acolsure, Sede el Algodonal - Ocaña, Norte de Santander, Colombia.
Tel.: +57 5690088 Ext. 212 - 191.

E-mail: (ragarcial, enflorez, wquintero) @ufpso.edu.co.

**** Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME, U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco,**
Ciudad de México 07738, México

Resumen: En el presente estudio se analizaron los principales mecanismos de falla generados en la pista de frenado de 3 frenos de disco de uso comercial, teniendo en cuenta como par tribológico el sistema pastilla-pista. Inicialmente, todas las muestras fueron limpiadas y pulidas para la estimación de propiedades, físicas, mecánicas y químicas, a través de pruebas de dureza Rockwell, Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés), Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS, por sus siglas en inglés) y Difracción de Rayos X (XRD, por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron que los mecanismos de falla predominantes sobre la pista de frenado fueron el arado, aglomeración de materia, agrietamiento y debris. Finalmente, se confirmó por EDS la presencia de óxidos de hierro que funcionan como lubricantes sólidos y por lo tanto ayudan a la reducción del desgaste generado por el contacto mecánico.

Palabras clave: *Frenos de disco, tribología, Microscopía, Mecanismos de falla.*

Abstract: In the present study, the main failure mechanisms generated in the 3-brake disc braking track for commercial use were analyzed, taking into account the pad-track system as a tribological pair. Initially, all samples were cleaned and polished to estimate properties such as physical, mechanical and chemical, through Rockwell hardness tests, Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Energy Scattering Spectrometry (EDS) and X-Ray Diffraction (XRD). The results showed that the predominant failure mechanisms on the braking track were plowing, material agglomeration, cracking and debris. Finally, the presence of iron oxides function as solid lubricants and therefore help to reduce the wear generated by mechanical contact was confirmed by EDS.

Keywords: *Disc brakes, tribology, microscopy, failure mechanisms.*

1. INTRODUCTION

Los frenos de disco tienen una amplia aceptación en la industria automotriz, debido a que en comparación con los frenos de tambor, pueden absorber más energía cinética al accionar el mecanismo de frenado, lo cual se convierte en una reducción de tiempo para la detención del vehículo.

Este fenómeno ocurre porque los dispositivos o elementos que constituyen el mecanismo de freno, en este caso frenos de disco, se encuentran al aire libre; es decir, el aire circulante pasa directamente por los canales de ventilación, permitiendo de esta forma una mayor disipación de calor. Dicho calor o energía térmica, es ocasionado cuando los elementos del freno de disco (pastillas y disco)

entran en contacto para transformar la energía mecánica producida por el motor y transferida mediante los diversos mecanismos que componen el automóvil como son: la caja de cambio, cardan, diferencial y por último transmitido a las ruedas, en energía térmica sobre los componentes de freno el cual gira en conjunto con las llantas (García-León, Flórez-Solano, and Acevedo-Peñaloza 2018).

El freno de los automóviles experimentan deslizamiento seco en contacto con en más o menos 50 % de la velocidad del automóvil. Una típica pastilla de freno delantero es de unos 8 cm de largo y 5 cm de ancho y el disco de freno tiene un diámetro de 28 cm. La almohadilla cubre alrededor 10-15 % de la superficie de fricción correspondiente del disco (Blau et al. 2007). Por otra parte, el disco de freno generalmente está fabricado de hierro fundido, pero en algunos casos están hechos de materiales compuestos como carbono reforzado, materiales compuestos de matriz cerámica y compuestos de matriz metálica.

El elemento más importante del sistema de frenado es el disco, el cual es fabricado generalmente de fundición gris nodular, el cual debe poseer las siguientes propiedades: Un coeficiente de fricción alto, impermeabilidad a las condiciones ambientales, capacidad para soportar altas temperaturas (estabilidad térmica), alta resistencia al desgaste, flexibilidad y adaptabilidad a cualquier superficie (Čanžar, Tonković, and Kodvanj 2012).

Las primeras apariciones de la fundición nodular data desde finales de 1940 en Inglaterra y posteriormente en Estados Unidos, éstas eran obtenidas agregando magnesio a la mezcla presente en el horno y así se lograba la formación de nódulos de grafito en su microestructura, esto ocurre durante el proceso de solidificación. Este hecho fue gran descubrimiento debido a que directamente de la colada se podía obtener un material con alta ductilidad y mayor dureza, evitando el uso de algún tratamiento térmico y por ende una minimización en los costos de producción. Este material pertenece a la familia de las fundiciones grafiticas que poseen mayor ductilidad, propiedad que le confiere excelente resistencia a los golpes, con muy buena aptitud para soportar las deformaciones. Asimismo, es una aleación con la mayor capacidad de alargamiento obtenida directamente por fusión en su grado o calidad “nodular ferrítica”, se puede doblar, torcer y deformarse sin fracturarse, lo que la hace ideal para ser utilizada en la elaboración de partes de vehículos expuestas a impactos (Yevtushenko and

Kuciej 2010). A pesar de estas propiedades favorables, el comportamiento de la corrosión de hierro fundido sigue siendo un problema debido a que regularmente contribuye a una situación indeseable llamado hot-judder del freno (Kikuchi et al. 2010).

El desgaste y las partículas en el aire generado a partir del desgaste en los frenos de disco, se originan del contacto entre la pastilla y el disco. Eriksson presentó un modelo explicativo de la situación de contacto entre un complejo de pastillas de freno orgánico y un disco de hierro fundido, Osterle y Ostermeyer se presentan resultados similares. En la Figura 1, se muestran las fibras metálicas u otros materiales duros en la almohadilla del material formando mesetas primarias estables o parches, que llevan a la parte principal de la carga (Wahlström 2011).(Santiago, EJ, Allende, JS 2017).

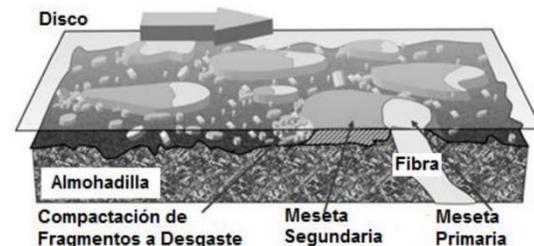


Figura 1. Par de contacto entre la pista de frenado y la pastilla.

Durante el parte de contacto, la fricción y el desgaste bajo los parámetros de contactos deslizantes se determinan en diferentes escalas de prueba, a partir de ensayos con modelos simplificados, donde el contacto de par se sustituyen con modelos simplificados, a las pruebas de campo completo, donde el sistema se prueba bajo condiciones reales.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo, analizó el material de tres tipos diferentes de automóviles con el que se fabrican los frenos de disco actualmente; con la finalidad de identificar los mecanismos de falla en las pistas de los discos usados durante un periodo de tiempo. Para el análisis físico-químico, se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) con el uso del espectrómetro de energía de rayos X (EDS) para identificar los elementos presentes en la pista de frenado. Los resultados mostraron que los 3 frenos de disco contaban con similares características, pero los mecanismos de falla

predominaban en el disco de freno con mayor capacidad de operación.

2. MATERIALES Y METODOS

La fundición gris nodular está compuesta principalmente por: Carbono 3.2 a 3.60%, Silicio 2.2 a 2.8%, Manganeso 0.1 a 0.2%, Magnesio 0.03 a 0.04%, Fósforo 0.005 a 0.04%, Azufre 0.005 a 0.02%, Cobrizo <0.40% y el restante en hierro (García-León, Flórez-Solano, and Suárez-Quiñones 2019).

La Tabla 1, muestra algunas propiedades físico-mecánicas de las fundiciones grises:

Tabla 1. Algunas propiedades físico-mecánicas (García-León 2014).

Propiedad	Valor
Pesos del vehículo (Kg)	D1=1,250 D2=1,950 D3=2,250
Distribución de fuerzas eje delantero/trasero (%)	70 – 30
Superficie promedio de la pastilla (mm ²)	3,546
Esfuerzo de compresión (N/mm ²)	2,205
Fuerza frenante (N)	D1=9,626 D2=15,016 D3=17,326
Esfuerzo de tracción por fricción (N/mm ²)	122
Resistencia a la tracción (N/mm ²)	240
Dureza (HB)	170-250

Con el fin de lograr una visión más amplia del comportamiento de los frenos de disco, se seleccionaron tres (3) tipos de muestras de diferentes vehículos, de los cuales se escogieron modelos de aquellos que se encuentran sometidos a distintas capacidades de carga o de transporte: un automóvil particular de la Renault, una camioneta de la Toyota y un microbus de transporte urbano de la Mitsubishi.

Teniendo en cuenta lo anterior, la siguiente Figura 2, muestra la metodología aplicada para el desarrollo de la investigación:

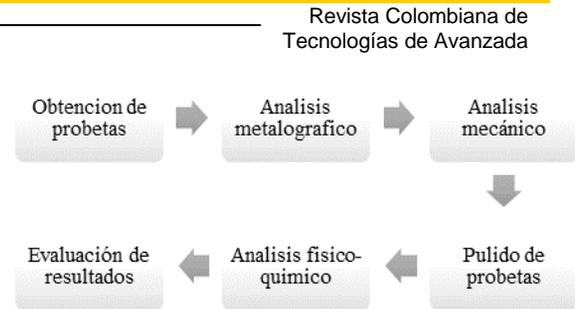


Figura 2. Procesos para el desarrollo de la investigación.

Por otra parte, la siguiente Figura 3 muestra la geometría de cada uno de los discos utilizados con su respectiva sección que fue objeto de los análisis del desarrollo experimental.

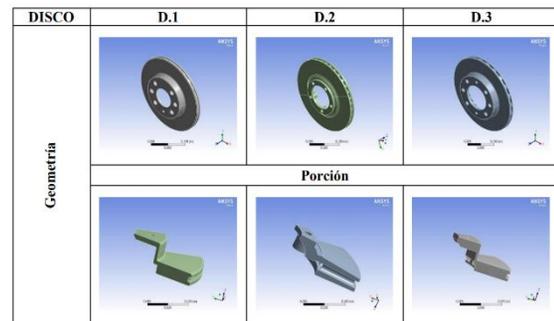


Figura 3. Geometría de los discos de frenos utilizados.

Las áreas de contacto de las pistas de frenado con la pastilla, se resumen en la siguiente Tabla 2:

Tabla 2. Áreas de contacto.

Disco	D1	D2	D3
Área (mm ³)	101	120	134

2.1. Análisis metalográfico

Para la preparación metalográfica de las muestras se tuvo en cuenta el procedimiento estándar ASTM A247-67: Método de prueba estándar para la evaluación de la microestructura del grafito en la fundición de hierro, con el objetivo de lograr un acabado espejo y de esta forma evidenciar la microestructura del material ensayado (García-León, Acevedo-Peñalosa, and Rojas-Suarez 2019).

2.2 Análisis mecánico

Haciendo uso de la norma ASTM E18-08b: Método de ensayo normalizado para dureza Rockwell de los materiales metálicos, se obtuvo un valor promedio de la dureza en 5 zonas de la pista de frenado de los discos para garantizar la validez estadística de los resultados obtenidos, posteriormente se realizó la conversión a dureza Brinell (García-León et al. 2019).

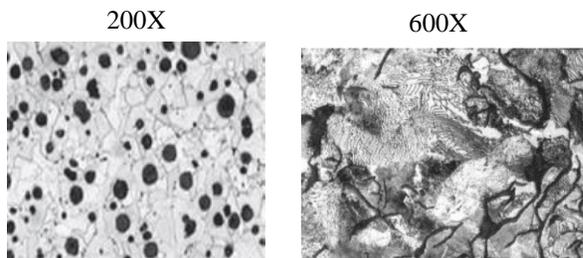
2.2. Análisis físico-químico elemental

Para este propósito, las técnicas de Microscopía electrónica de barrido (SEM) y energía de dispersión de rayos X (EDS), fueron aplicadas haciendo uso del equipo comercial COXEN-INTEK para evaluar los mecanismos de falla y la composición elemental en la pista de frenado.

Asimismo, un Difractómetro marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci fue utilizado bajo las siguientes condiciones: Voltaje: 40 kV, Corriente: 40 mA, con Angulo: 2° a 2θ , Radiación: $\text{CuK}\alpha$, con un tiempo de muestreo de 0,8 segundos por grado; con la finalidad de identificar la fase de los frenos de disco estudiados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras seleccionadas fueron cortadas directamente de la pista de frenado de discos usados, donde posteriormente fueron preparadas metalográficamente de acuerdo a la norma ASTM A247-67. Estos frenos, son fabricados a partir de fundición nodular, con una microestructura que posee nódulos de grafito, la cual es característica de este material. En la Figura 4a y 4b, se observa la comparación de la microestructura a 200X y 600X para validar la presencia de los nódulos y líneas de grafito presentes en las muestras.



a) Fundición nodular

b) Laminas de grafito perlitica.

Figura 4. Microestructura obtenida en los discos. (García-León, Acevedo-Peñaloza, and Quintero-Quintero 2020).

El análisis metalográfico fue realizado con el objetivo de obtener las características principales de las fundiciones grises, en cuanto a la microestructura y morfología del material, ya sea de los grafitos o de las fases presentes (ferrita y perlita), y de los grafitos, ya sea el tamaño, el tipo, las fases o su distribución.

Posteriormente, se realizó el ensayo de dureza para determinar qué características de maquinabilidad tenía el material teniendo en cuenta la norma ASTM E18-08b, y de esta forma comprobar y evaluar las condiciones de compresión a las cuales pudieron haber sido sometidos este tipo de frenos, obteniendo los resultados mostrados en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3. Durezas obtenidas en las superficies de los discos analizados.

Disco	D1	D2	D3
Dureza HB	164±0.09	151±0.11	156±0.08

Los datos obtenidos de dureza para las 3 muestras están acorde con los resultados consultados en la bibliografía, los cuales reportan que la fundición gris para este tipo de frenos posee una dureza de entre 140 y 250 Brinell.

Posteriormente, con la finalidad de identificar las fases presentes en el material, se realizó el análisis haciendo uso del Difractómetro D8 de Bruker, obteniendo la siguiente Figura 5 de resultados:

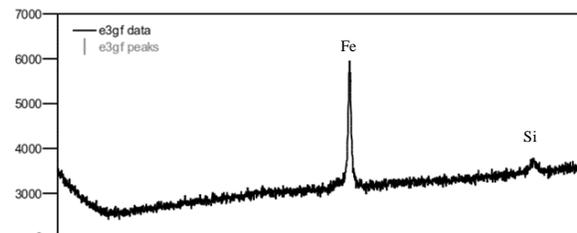


Figura 5: RXD característicos de la fundición gris nodular.

Para las 3 muestras de los 3 discos estudiados, presentaron la misma presencia de fases cristalinas, las cuales fueron identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD), obteniendo la Tabla 4:

Tabla 4. Fases cristalinas características de la fundición gris nodular.

FASE	Caracterización cristalográfica	NOMBRE (PDF)
	Sistema cristalino	
	Cubico	Aleación de
$\text{Fe}_{0,905}$	$A = B = C$	hierro (000-65-
$\text{Si}_{0,095}$	$\alpha = \beta = \varphi = 90^\circ$	6323)
	2.86	

Con lo anterior, se comprueba la presencia de FeSi debido a los elementos de aleación en mayor

proporción analizados por EDS, esta fase es el inicio de las formaciones de los nódulos de grafito, en los cuales se pueden observar los límites de grano (nódulos), correspondiendo a una aleación de hierro con PDF-2=000-65-6323. Por otra parte, la dureza de las muestras está en función de la presencia de mayores nódulos y láminas de grafito, como es el caso del disco 1. (Pardo García A, Castellanos González L. 2017).

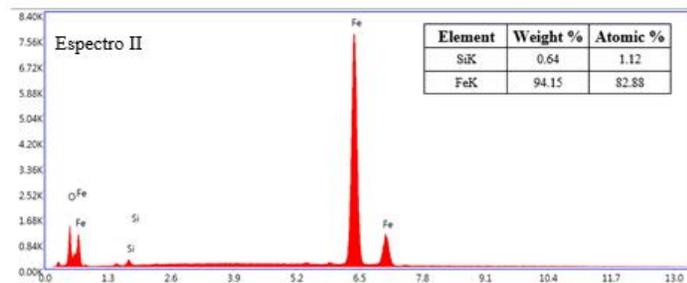
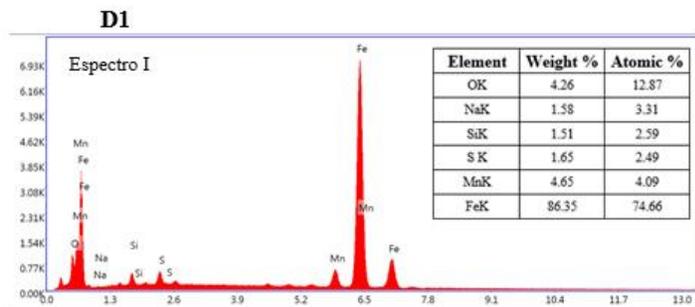
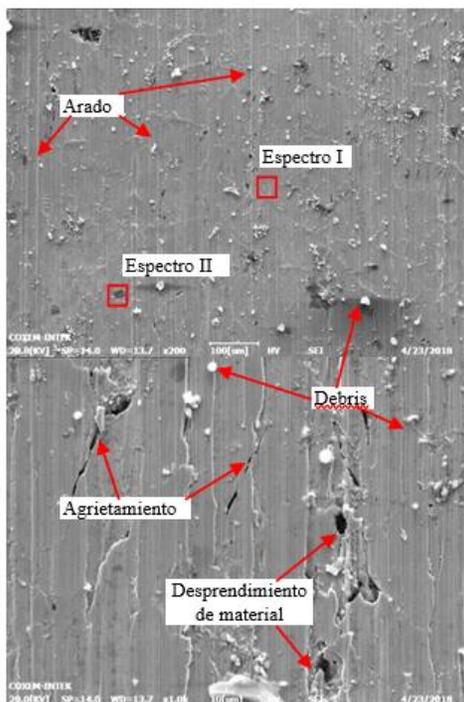
Debido al desgaste que son expuestos los frenos, la mayor proporción del transporte de carga se reduce en generar componentes resistentes al desgaste que disminuyan la influencia en el coeficiente de fricción relacionada con la pérdida de volumen por desgaste. Por lo tanto, a pesar de los componentes menos duros, durante el contacto mecánico está dominada por el par tribológico (metal-metal) con respecto a tanto la fricción y el desgaste (Jacobson 2007). Las mesetas generadas durante el contacto pueden crecer mediante los parámetros de funcionamiento que implican aglomeración y compactación del desgaste de las pastillas con partículas de desgaste o debris, alrededor del lugar de nucleación. La tendencia a que las debris tiendan a aglomerarse a la meseta, depende de la temperatura, la humedad y también en el estado predominante de la cizalladura y presiones normales. Los procesos de deterioro que son

acelerados por los repetidos ciclos de temperatura y fuerzas de frenado generadas durante el proceso de detención del vehículo a diferentes condiciones de prueba. La meseta también puede contraerse debido a la desintegración y la eliminación de las partículas de desgastes compactados causados por los cambios en el par de contacto. La meseta de contacto finalmente se desintegra cuando la fibra o partícula protectora ha sido gastada por la distancia de recorrido en función del tiempo (Kikuchi et al. 2010).

La Figura 6 muestra las imágenes obtenidas por SEM-EDS para analizar los mecanismos de falla generados sobre los frenos de disco.

Para las micrográficas obtenidas para las tres muestras de los disco, se evidencia la presencia de mecanismos predominantes como desprendimiento de material, arado (por las debris) y agrietamiento relacionado con las cargas soportadas por los automóviles.

La presencia de los óxidos de hierro se muestran en los espectros realizados sobre la superficie de la pista de desgaste, como también la presencia de los elementos de aleación que interactúan con la pastilla, formado de esta forma elementos como S, Mn, Na, Si, entre otros



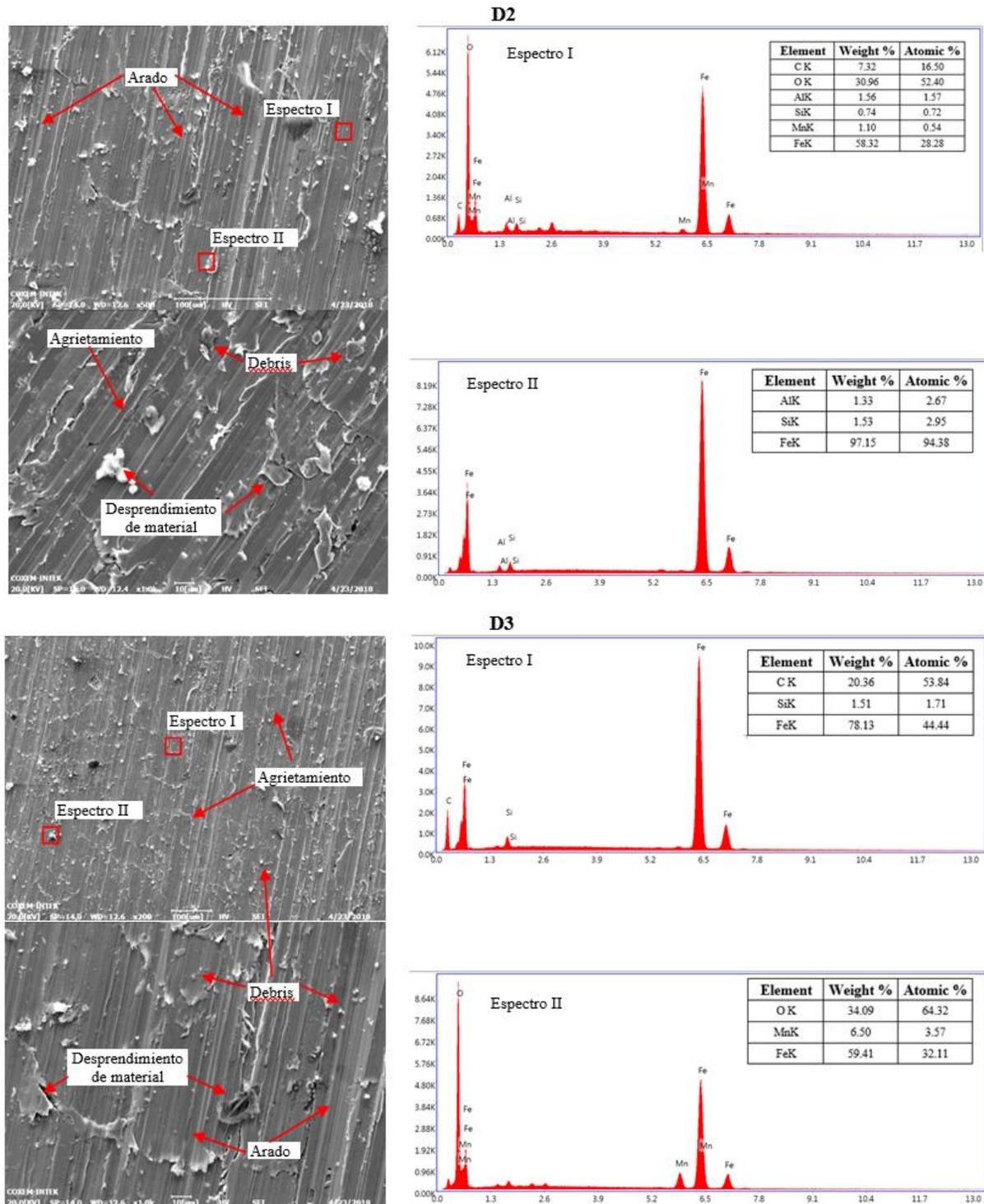


Figura 6. Micrografías obtenidas por SEM-EDS para las tres muestras de los frenos de disco.

En muchas ocasiones los óxidos de hierro funcionan como lubricante sólido, ayudando a la disminución del desgaste entre el par tribológico (Holmberg and Matthews 2009). Por otra parte, la

energía de fricción se disipa en calor en las mesetas, y aumenta la temperatura de la pastilla y el disco, lo que conduce a la más alta temperatura sobre el desprendimiento y aglomeración de

materia efecto del desgaste. Para resumir, la fricción y el desgaste en el comportamiento macroscópico de un freno de disco se pueden explicar por la situación de contacto microscópica crecimiento y la destrucción de mesetas de contacto en la capa límite entre la almohadilla y el disco (Eriksson, Bergman, and Jacobson 2002).

La funcionalidad requerida para compuestos de fricción está estrechamente relacionada con la selección adecuada de los componentes de estos cuatro grupos. El ingrediente metálico aumento de la resistencia al desgaste, la dureza de los materiales y compuestos, mejorar su difusividad térmica, y también juegan un papel importante en la formación de mesetas de contacto principal. Estas mesetas están en contacto directo con la contraparte giratoria (Típicamente expulsar hierro del disco) y transferir la presión (Normalmente de 1.2 MPa durante suave frenado y 10 MPa en situaciones extremas) que se origina durante la el

5. CONCLUSIONES

En la presente investigación, se identificaron los principales mecanismos de falla sobre la pista de frenado de 3 frenos diferentes, siendo el arado, el desprendimiento de material y las debris las que predominan. Por otra parte, se identificó la presencia de agrietamiento debido a los altos esfuerzos generados por las presiones de contacto entre la pastilla y el freno de disco durante los periodos de frenado.

Se corrobora mediante EDS la presencia de óxidos de hierro que ayudan a la disminución del desgaste, debido a que se aglomeran a lo largo de la pista de frenado y por lo tanto no se genera un área de contacto uniforme a lo largo de todo el par de contacto entre la pastilla y el disco de freno.

Por otra parte, se recomienda realizar pruebas de desgaste a nivel laboratorio para analizar de forma profunda el comportamiento del par tribológico (Pastilla-Pista de frenado) y de esta manera evaluar diferentes materiales y recubrimientos que mejoren la resistencia al desgaste y la efectividad del proceso de frenado.

REFERENCIAS

Araque, JA, Rodríguez, JLD, Guerrero A. (2017). Optimización por recocido simulado de un convertidor multinivel monofásico con

frenado. La almohadilla cubre aproximadamente el 10 % de la correspondiente frotando la superficie y mesetas contacto cubren normalmente del 15 al 20% de una superficie de forros de freno. La función de los homólogos de frenado es para desacelerar la velocidad de un vehículo, mientras que la energía cinética de rotor se transfiere en energía térmica lo que se refleja en el aumento de la temperatura en el par de frenado (Matějka et al. 2011).

Por otra parte, en condiciones de operación severas en términos de alta velocidad con cargas fuertes frenadas y los gradientes de temperatura elevada junto con la continua exposición al medio ambiente pueden afectar la operatividad y el funcionamiento de discos de freno forjado y fundido de vehículos automóviles, tales como automóviles de pasajeros, camiones, motocicletas, etc., causando su falla por fatiga térmica (Matějka et al. 2011).

modulación PWM sinusoidal de múltiple portadora. Revista Tecnologías de Avanzada, ISSN: 1692-7257.

Blau, Peter J., Brian C. Jolly, Jun Qu, William H. Peter, and Craig A. Blue. 2007. "Tribological Investigation of Titanium-Based Materials for Brakes." *Wear* 263(7–12):1202–11. Retrieved (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164807002645>).

Bermeo, WL, Jr, AB de Souza, Fernández T, Honorio D, Nogueira dos Reis L, Barreto L. (2017). Control modo deslizante aplicado en la malla de corriente para una aplicación de una base-DSP para el control de posición de un motor de inducción de jaula de ardilla. Revista Tecnologías de Avanzada, ISSN: 1692-7257

Čanžar, P., Z. Tonković, and J. Kodvanj. 2012. "Microstructure Influence on Fatigue Behaviour of Nodular Cast Iron." *Materials Science and Engineering A* 556:88–99.

Eriksson, Mikael, Filip Bergman, and Staffan Jacobson. 2002. "On the Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes." *Wear* 252(1–2):26–36. Retrieved (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164801008493>).

García-León, R. A. 2014. "Evaluación Del Comportamiento de Los Frenos de Disco de Los Vehículos a Partir Del Análisis de La Aceleración Del Proceso de Corrosión." Tesis de pregrado en ingeniería Mecánica, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Retrieved

- (<http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/251/1/25724.pdf>).
- García-León, R. A., Eder Flórez-Solano, and Carlos Acevedo-Peñaloza. 2018. *Análisis Termodinámico En Frenos de Disco*. Bogota, Colombia: ECOE Ediciones.
- García-León, Ricardo Andrés, Carlos Humberto Acevedo-Peñaloza, and Jhan Rojas-Suarez. 2019. *Análisis Metalográfico Y Materiales de Los Frenos de Disco*. ECOE. edited by ECOE. Bogota, Colombia.
- García-León, R. A., C. Acevedo-Peñaloza, and W. Quintero-Quintero. 2020. “Mechanical Evaluation of the Nodular Gray Cast Iron with the Application of Thermal Treatments.” *Journal of Xi’an University of Architecture & Technology* XII(VI):1868–1876.
- García-León, Ricardo, Eder Flórez-Solano, and Álvaro Suárez-Quiñones. 2019. “Brake Discs: A Technological Review From Its Analysis and Assessment.” *Informador Técnico* 83(2):217–34.
- Holmberg, Kenneth and Allan Matthews. 2009. *Coatings Tribology, Second Edition: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. Elsevier. United Kingdom.
- Jacobson, R. 2007. “Applications of a New Model for the Abrasive Wear Resistance of Multiphase Materials.” *Composites and Coated Materials* 174(1):1459–63.
- Kikuchi, T. et al. 2010. “Corrosion of Al-Sn-Bi Alloys in Alcohol at High Temperatures. Part I: Effects of the Metallurgical Structure of the Alloys and the Metal Salt Additions to Alcohol.” *Corrosion Science* 52(4):1482–1491.
- Matějka, V. et al. 2011. “Possible Stibnite Transformation at the Friction Surface of the Semi-Metallic Friction Composites Designed for Car Brake Linings.” *Applied Surface Science* 258(5):1862–68. Retrieved (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433211016321>).
- Pardo García A, Castellanos González L. (2017). Automatización de Ambientes en Invernaderos Simulando Escenarios Futuros, *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257. Volumen1–Número 29-2017.
- Santiago, EJ, Allende, JS (2017). Diseño de un sistema multiagentes híbrido basado en aprendizaje profundo para la detección y contención de ciberataques. *Revista Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257
- Wahlström, Jens. 2011. *A Study of Airborne Wear Particles from Automotive Disc Brakes*. KTH. Royal Institute of Technology.
- Yevtushenko, Aleksander and Michal Kuciej. 2010. “Temperature and Thermal Stresses in a Pad/disc during Braking.” *Applied Thermal Engineering* 30(4):354–59. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.015>).