Caracterización de materiales alternativos para frenos de fricción

Characterization of alternative materials for friction brakes

Oscar Javier Araque de los Rios[1]
Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia
oscar.araque@unibague.edu.co, ojaraque@yahoo.com.mx

***Resumen*— Existen diversos mecanismos utilizados como frenos de fricción magnéticos, eléctricos y mecánicos, entre otros. El dispositivo de zapata doble exterior contráctil es uno de ellos y su uso experimental se fundamenta en la facilidad de operación y comportamiento físico ampliamente conocido. En el desarrollo de este documento se han utilizado algunos materiales conocidos, económicos y de fácil adquisición; estos se han utilizado como zapatas en el dispositivo antes mencionado y son: caucho, madera de Nogal, asbesto, cuero, fundición de hierro y corcho. Estos materiales fueron sometidos a una serie de pruebas a velocidades de 800 rpm, 1200 rpm y 1800 rpm y variaciones en la magnitud de carga entre 100 g y 1000 g con el fin de determinar las características asociadas al coeficiente de fricción dinámico, la máxima presión de trabajo, evolución de la curva de temperatura y desgaste superficial, los cuales fueron desarrollados utilizando un modelo estadístico de fracciones factoriales parciales, y analizando las curvas obtenidas a partir de la desviación estándar, coeficiente de variación y promedio del coeficiente de fricción. La evaluación del desgaste superficial se valoró utilizando un microscopio óptico a 200 aumentos y se realizan comparaciones de los diversos materiales antes y después de su uso. Finalmente las conclusiones recogen cuadros significativos del comportamiento de estos materiales en los regímenes de carga y velocidad de aplicación ensayados.**

***Palabras clave*— Frenos, fricción, materiales, caracterización de propiedades**

***Abstract*— There are several mechanisms used as friction brakes: magnetic, electrical, and mechanical among others. Double contractile external brake shoes is one of them and its experimental use is based on ease of operation and physical behavior widely known. In developing this paper some materials known, economical and readily available have been used. The ones that have been used as brake shoe on the device mentioned above are: rubber. walnut wood, asbestos, leather, cast iron and cork. These materials were subjected to a series of tests at speeds of 800 rpm, 1200 rpm, and 1800 rpm and variations in the magnitude of load of 100 g to 1000 g in order to determine the characteristics associated with the dynamic friction coefficient of maximum working pressure , evolution of the temperature curve, and surface wear, which were developed using a statistical model of partial factorial fractions, and analyzing the curves obtained from the standard deviation, coefficient of variation, and average friction coefficient. The evaluation of surface wear was evaluated using an optical microscope at 200x magnification, and comparisons are made of various materials before and after use. Finally, the conclusions reflect significant pictures of the behavior of these materials in the load and speed regimes tested.**

***Key Word* — Brakes, friction, materials, characterization, properties**

I. INTRODUCCIÓN

Existen diversos elementos de máquina que afectan el comportamiento de un sistema mecánico, entre ellos se encuentran los encargados de transmitir potencia, sujeción, unión o contacto y los elementos que absorben o eliminan esa energía transmitida, comúnmente conocidos como frenos. En 1869 aparece el freno de aire, inventado por George Westinghouse [1-2]; en este freno el aire mantiene apartados la zapata y el tambor mientras el vehículo está en movimiento. Posteriormente el francés Luís Renault inventó el freno de expansión interna [2], que daba un mayor poder de frenado a altas velocidades dando un gran salto tecnológico en el poder de frenado y además es utilizado en la actualidad. En 1890 se empezaron a hacer los ensayos para el diseño de lo que ahora son los frenos de disco. Los primeros indicios de los frenos para aplicaciones industriales se dan con el freno Prony, inventado por el ingeniero y matemático Gaspard Clair François Marie Riche de Prony. Con este freno se buscaba conocer la potencia mecánica real de un motor. Del freno de Prony se derivan otros tipos de dispositivos de frenado como el freno de Foucault [3]. Además existen otros diversos tipos de frenos como son: frenos de cinta, frenos de tambor, frenos de embriague axial y muchas otras configuraciones.

El trabajo desarrollado a continuación centra su atención en un dispositivo tradicional como es el freno de tambor accionado con zapata doble exterior contráctil similar al mostrado en la figura 1.

Fecha de Recepción: 12 de Abril de 2012
Fecha de Aceptación: 13 de Diciembre de 2012

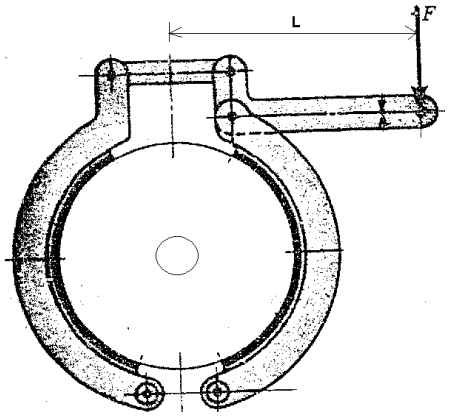


Figura 1. Esquema de dispositivo de freno utilizado

Diversos investigadores han tratado esta temática [4-5], generando cada vez soluciones más ingeniosas, conforme al uso e incremento de las potencias de trabajo de los sistemas mecánicos actuales. Sin embargo, el interés de este trabajo radica en el hecho que los materiales de los componentes mecánicos utilizados como frenos son limitados [6], puesto que no se ha realizado una exploración suficientemente minuciosa en materiales alternativos como lo son corcho, cuero, madera y caucho, comparando su funcionamiento con los ampliamente difundidos y utilizados como lo son el hierro fundido y el asbesto, teniendo en cuenta la observación de la afectación superficial debida al contacto, la variación del coeficiente de fricción y el cambio de temperatura para un rango de velocidades y tiempos de afectación variable. El uso de estos materiales no convencionales en la aplicación de frenos de fricción no fue realizada con el propósito de descartarlos sino para determinar los probables campos de aplicación, conforme a los resultados obtenidos para cada caso particular en el estudio realizado.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para obtener una caracterización de materiales utilizados en el desarrollo experimental se utilizó el dispositivo mostrado en la figura 2. Este sistema está montado sobre una cimentación adaptada para absorber las vibraciones producidas debido a la rotación de un motor de 4 hp. El equipo permite, por medio de la utilización de un variador de frecuencia Tek-Drive serie TDS-V8, cambiar la velocidad de rotación y variarla en el tiempo; por medio de la utilización de un sistema de soportes es posible colocar los pesos que accionan el mecanismo de frenado colgándolos en su extremo libre. Por un lado, el par del motor tiende a hacer girar el sistema en su sentido de giro, pero por otro lado, el par que introducen los pesos aplicados por la palanca tienden a frenar el sistema. Esta fuerza de accionamiento es medida en el extremo del motor utilizando un dinamómetro.

Las mediciones experimentales se realizaron para cada uno de los materiales objeto del estudio: caucho, madera de Nogal, asbesto, cuero, fundición y corcho; con una variación de la velocidad angular de entrada al eje del motor de 1800, 1200 y 800 rpm. Además, para cada uno de estos rangos de velocidad se incrementó gradualmente el peso en el extremo de accionamiento del dispositivo de frenado en 100, 200, 300,…, 1000 g con una permanencia de tiempo en exposición de carga de 10, 20 y 30 segundos. Adicionalmente, se midió el incremento de temperatura presentado durante cada prueba realizada, utilizando un pirómetro de radiación.

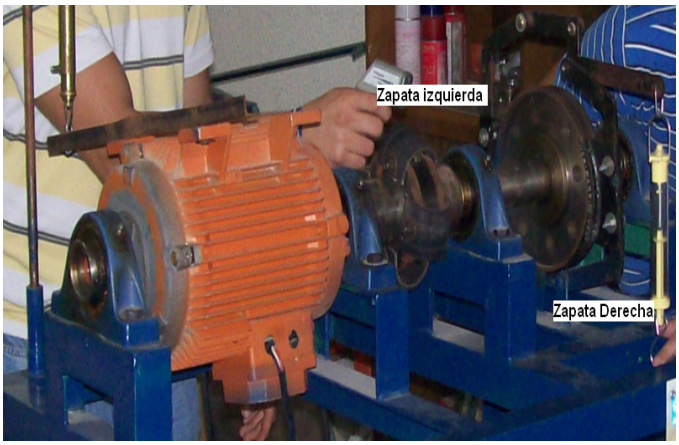


Figura 2. Dispositivo de freno utilizado

III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Medición del torque de reacción suministrado por el motor

Se determina el torque de reacción correspondiente al par suministrado por el rotor del motor una vez este es puesto en marcha a determinada velocidad de rotación (rpm). En este caso, la magnitud del par de reacción será proporcional a la del torque de rozamiento o fricción T_f producido luego de realizar una operación de frenado una vez se suministre alguna fuerza de accionamiento F.

Se conoce como par o torque de reacción en vacío (T_0), al suministrado por el rotor del motor [7,8], cuando este trabaja libremente sin ninguna carga de trabajo; es decir, cuando no se realiza operación de frenado alguna. Para medir el par de reacción, como se indica en la figura 2, deben seguirse los siguientes pasos:
Una vez se opere el freno, observar y anotar el valor de la carga (F´) indicada por el dinamómetro antes de que se dé fin a tal operación.

El cálculo del valor del torque de reacción (T_f´) es

$$T_f' = L \times F' \quad T_f': (N.m) \;;\; L=0{,}3\ m \;;\; F': (N) \qquad (1)$$

Donde L corresponde a la longitud media del brazo que conecta el motor al dinamómetro; (F´) es la fuerza registrada por el dinamómetro a la vez que se realiza la operación de frenado.
El torque de reacción en vacío T_0 se calcula una vez se han terminado las mediciones con el freno, a determinadas rpm. Para ello, se debe dejar trabajar el motor libremente sin que exista contacto entre el material fricativo y el tambor de frenado. Se observa y se anota la carga F_0 indicado por el dinamómetro mientras el motor trabaja en vacío. El torque en vacío se calcula:

$T_0 = LXF0$ T_0:(N.m) ; L=0,3m ; F_0: (N) (2)

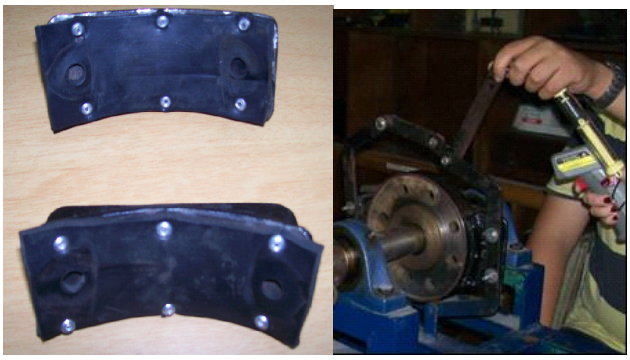
Finalmente, el torque de rozamiento de fricción T_f generado por cada una de las cargas o fuerzas de accionamiento F empleadas para realizar las operaciones de frenado, se calcula como se indica a continuación

T_{fi}=Lx(fi´-F0) T_f: (N.m) ; L=0,3 m ; F_0: (N) ; F´: (N) (3)

Donde el subindice `i´ tanto para T_f como para (F´) indica que el valor de estos dos parámetros varía con cada una de las fuerzas de accionamiento empleadas (100 g, 200 g,…, 1000 g), a diversas velocidades de rotación.

3.2 Medición del coeficiente de fricción

Se define como fuerza de rozamiento o fuerza de fricción entre dos superficies en contacto a la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra [9] (fuerza de fricción dinámica) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática). Se genera debido a las imperfecciones, especialmente microscópicas, entre las superficies en contacto del material de las zapatas utilizado, figura 3 a., con el tambor de freno, lámina HR 1 1/4 de acero estructural.



a. b.

Figura 3. a). Zapatas de freno con el material remachado b) Medición de temperatura en la superficie de las zapatas

Estas imperfecciones hacen que la fuerza entre ambas superficies no sea perfectamente perpendicular a estas [10,11], sino que forma un ángulo φ con la normal (el ángulo de rozamiento). Por tanto, esta fuerza resultante se compone de la fuerza normal (perpendicular a las superficies en contacto) y de la fuerza de rozamiento, paralela a las superficies en contacto.

Para las condiciones geométricas del dispositivo de freno utilizado, se deduce la siguiente expresión en función de la fuerza de rozamiento en la zapata derecha Fr1 .

$$\mu = \frac{F - Fr1}{8Fo + 0.552F - 0.552Fr1} = \frac{150Fr1}{1104Fo - 64.3Fr1} \quad (4)$$

La cual genera la ecuación cuadrática mostrada siendo el término variable Fr1, y Fo variable 100, 200, 300…, 1000 g.

$$Fr1^2(147.1) - (Fr1 * F_F)147.1 - (F_{r1} * F0)2304 + (F_F * F0)1104 = 0$$
(5)

3.3 Temperatura de operación

Los materiales para zapata de freno deben ser lo suficientemente resistentes a la temperatura, que durante el frenado se presentan exigencias de origen térmico que se manifiestan como deformaciones en los elementos metálicos del sistema y riesgos de cristalización y falla en las zapatas, debido a las altas temperaturas que se pueden generar.

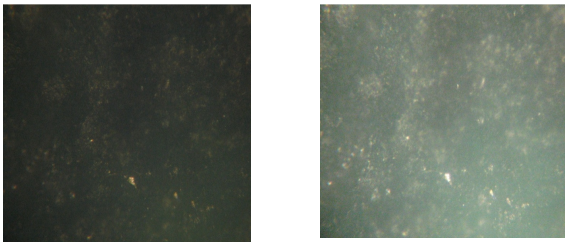
El proceso de transferencia de calor que ocurre en una zapata durante la operación de frenado tiene la particularidad de ser inestable o transitorio, es decir, los fenómenos térmicos varían con el tiempo y la posición en el elemento en cuestión. La difusividad térmica es una propiedad de los materiales que caracteriza los procesos de transferencia de calor de estado inestable.

Durante el frenado, el perfil de temperatura a través de la zapata es transitorio, y por consiguiente, el flujo de calor está asociado a la difusividad térmica [12].

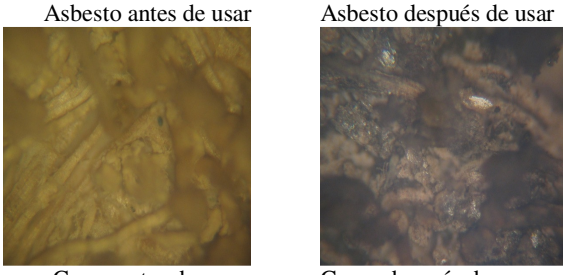
El estudio desarrollado centra la atención en la determinación del rango de variación de temperatura en la superficie de las zapatas de freno de cada uno de los materiales utilizados, para esto se utilizó un pirómetro de radiación de la forma como se ilustra en la figura 3 b.

3.4 Estimación de la superficie

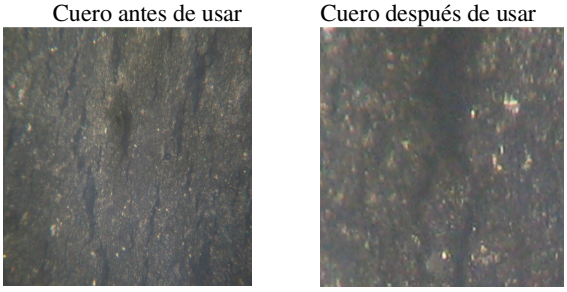
Durante el desarrollo de la experiencia investigativa se observa que algunos materiales sufren un nivel de desgaste mayor que otros. Para realizar un análisis más detallado de esta situación se utiliza un microscopio óptico por medio del cual se realizan las microscopias para cada uno de los materiales utilizados, antes de someterlos al ensayo y una vez concluido el mismo; las imágenes se muestran en la figura 4.



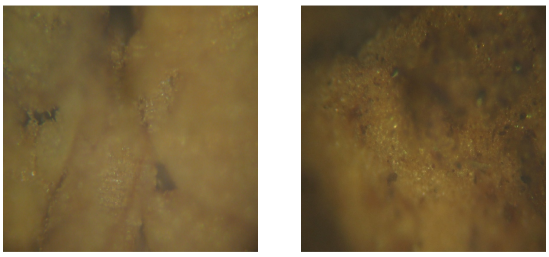
Asbesto antes de usar Asbesto después de usar



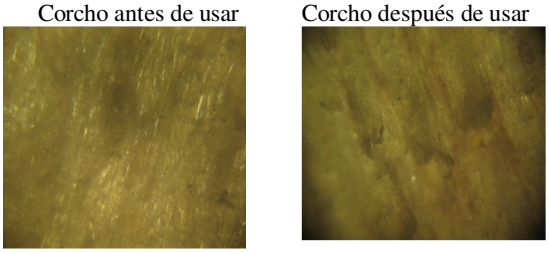
Cuero antes de usar Cuero después de usar



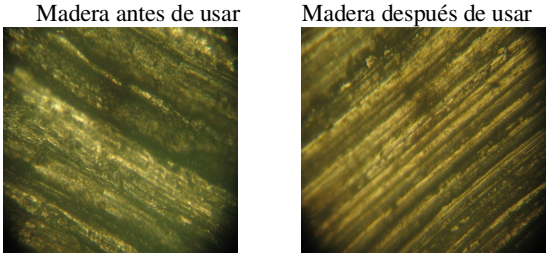
Caucho antes de usar Caucho después de usar



Corcho antes de usar Corcho después de usar



Madera antes de usar Madera después de usar



Hierro fundido antes de usar Hierro fundido después de usar

Figura 4. Microscopia óptica de los materiales utilizados tomadas a 200 aumentos

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Torque de Fricción promedio Tfi=Lx(fi´-F0) (N.m)			
Material	Velocidad 1800 rpm	Velocidad 1200 rpm	Velocidad 800 rpm
Asbesto	5,182	4,012	3,591
Corcho	13,841	11,821	10,844
Cuero	6,298	6,916	8,220
Madera Nogal	10,035	9,447	8,698
Caucho	9,937	8,534	3,556
Fundición	4,772	4,321	3,772

Tabla 1. Torque de fricción promedio

En la tabla 1 se indica utilizando la ecuación (3) para cada uno de los materiales y relaciones de velocidad objeto de estudio la magnitud promedio de variación de par de fricción presentada.
Se observa como el corcho presenta un comportamiento bastante adecuado en cuanto a la capacidad del torque friccionante, seguido de la madera y el cuero, sin embargo su alta tasa de desgaste lo hace ineficiente si es sometido durante intervalos de tiempo elevados.

En la tabla 2 se indica para cada uno de los materiales y relaciones de velocidad objeto de estudio el rango de valores en los que se encuentra el coeficiente de fricción en seco.

Coeficiente de Fricción en Seco μ			
Material	Velocidad 1800 rpm	Velocidad 1200 rpm	Velocidad 800 rpm
Asbesto	0,22 – 0,42	0,10 – 0,24	0,22 – 0,52
Corcho	0,46 – 0,73	0,42 – 0,65	0,44 – 0,73
Cuero	0,33 – 0,36	0,30 – 0,36	0,24 – 0,55
Madera Nogal	0,38 – 0,52	0,32 – 0,42	0,37 – 0,63
Caucho	0,34 – 0,52	0,29 – 0,47	0,15 – 0,30
Fundición	0,14 – 0,44	0,14 – 0,42	0,10 – 0,30

Tabla 2. Rango coeficiente de fricción en seco

El análisis estadístico muestra el siguiente comportamiento para las diversas variaciones de velocidad, respecto al coeficiente de fricción en seco.

Para 1800 rpm	Asbesto	Corcho	Cuero	Madera	Caucho	Fundición
Prom μ	0,223	0,532	0,253	0,394	0,416	0,231
Desviación Estándar	0,072	0,084	0,054	0,054	0,099	0,105
Coeficiente Variación	32,47%	15,90%	21,40 %	13,71%	23,77%	45,44 %

a)

Para 1200 rpm	Asbesto	Corcho	Cuero	Madera	Caucho	Fundición
Prom μ	0,193	0,499	0,266	0,373	0,353	0,193
Desviación Estándar	0,048	0,147	0,040	0,047	0,062	0,063
Coeficiente Variación	24,88%	29,49%	15,09 %	12,69%	17,67%	33,07 %

b)

Para 800 rpm	Asbesto	Corcho	Cuero	Madera	Caucho	Fundición
Prom μ	0,248	0,449	0,354	0,371	0,157	0,164
Desviación Estándar	0,073	0,136	0,145	0,202	0,096	0,118
Coeficiente de Variación	29,48%	30,33%	40,91 %	54,41%	61,41%	71,67 %

c)

Tabla 3. Análisis estadístico del Coeficiente de Fricción en Seco a) velocidad 1800 rpm, b) velocidad 1200 rpm, c) velocidad 800.

En la tabla 4, se muestra el rango de variación de temperatura, obtenido experimentalmente debido al incremento en la carga de accionamiento del mecanismo de frenado.

Variación de la temperatura en la superficie de contacto de las zapatas con el tambor de frenado ΔT (ºC)			
Material	Velocidad 1800 rpm	Velocidad 1200 rpm	Velocidad 800 rpm
Asbesto	50,6	58,5	63,2
Corcho	88,03	57,05	64,36
Cuero	59,55	85,68	86,11
Madera Nogal	65,01	98,66	118,5
Caucho	82,7	99,3	98,25
Fundición	56,55	69,31	64,13

Tabla 4. Variación de temperatura en la superficie de contacto

Del análisis de la microscopía óptica realizada a los materiales utilizados en el ensayo es posible realizar algunas observaciones. El asbesto no presenta cambios superficiales apreciables durante la exposición y tiempo de prueba puesto que por ser un material compuesto de fibras largas y resistentes que se pueden separar y ser suficientemente flexibles como para ser entrelazadas y además soportar altas temperaturas responde muy bien en condiciones de fricción. Una situación similar sucede para el hierro fundido o fundición gris por ser una aleación hipoeutéctica que contiene entre 2,5 y 4% de carbono, además de pequeños porcentajes de fosforo y silicio, funde alrededor de los 1400 ºC. Se observa que el desgaste superficial fue mínimo, y es una alternativa igualmente comercial para ser utilizado como material de zapata para freno. Para el caso de la madera al ser un material natural anisotrópico sus propiedades no son las mismas en todas las direcciones que pasan por un punto determinado y depende de la orientación y aglomeración de las células tubulares que la conforman. Para el caso de la madera de nogal utilizada su densidad es de 0.72 kg/dm^3, y se clasifica como una madera semidura, además es posible afirmar que su composición de celulosa y lignina afectan directamente su comportamiento. La primera es la encargada de darle las propiedades de plasticidad, por ello en las imágenes se observa que la parte más quemada de las fibras en la madera es la que contiene celulosa; esto debido a que la exposición del material en ese costado se encuentra más seco que en la parte de la lignina que se ve menos afectada. En cuanto al corcho utilizado para el ensayo se conformó por aglomeración, por lo tanto es necesario tener en cuenta la compactación, la porosidad y demás propiedades asociadas, para el caso particular del material utilizado, este se empieza a quemar y se genera un desprendimiento severo de su superficie en un lapso de tiempo muy corto en el comienzo de la operación, por lo tanto se concluye que no es un material óptimo para solicitudes importantes de frenado. El cuero por ser un material natural, tiene como limitante el no poder soportar altas temperaturas; sin embargo, con un procedimiento de cocido consistente en introducir este en grasa hirviendo se logra que las fibras de colágeno se acorten, se encojan y se hagan mucho más duras y resistentes. De la observación microscópica se deduce que este material se quema partiendo de una superficie totalmente clara y finalizando con una estructura negra, haciéndolo útil solo para intervalos intermitentes o muy cortos de tiempo. Durante el tiempo de duración del ensayo la imagen observada muestra que el caucho presenta unos surcos, los cuales van creciendo y acelerando el desgaste superficial, generados por sobrecalentamiento localizado durante el contacto con el tambor.

V. CONCLUSIONES

- Se observa que el mayor torque de fricción promedio es obtenido por el corcho seguido de la madera, el caucho y el cuero, sin embargo a pesar de comportarse tan bien en este aspecto estos materiales se degradan a una tasa mayor de uso que el asbesto y el hierro fundido, por lo tanto solo serán recomendados para regímenes de uso corto o intermitente.
- En concordancia con los torques de fricción los mayores coeficientes de fricción en orden descendente son los del corcho, madera, caucho y cuero y los coeficientes de fricción más bajos los poseen el asbesto y el hierro fundido, sin embargo su alta resistencia al desgaste superficial los hacen elecciones óptimas como material utilizado para zapata para freno.
- Durante el desarrollo de la práctica se observó que el caucho y la madera llegaron a parar el banco de frenado con cargas menores a la máxima aplicada de 1000 g luego de haber alcanzado una alta temperatura. El hierro fundido llegó a parar el sistema cuando este operaba a 800 rpm, sin embargo no presentó desgaste superficial apreciable.
- La menor variación de la temperatura en la superficie de contacto de las zapatas con el tambor de frenado sucede en el asbesto y el hierro fundido, mientras que materiales como el cuero, la madera y el corcho elevan su temperatura a punto de llegar a quemarse..

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dirección de Investigaciones de la Universidad de Ibagué por el apoyo suministrado para el desarrollo de esta investigación y en especial a los estudiantes del programa de Ingeniería Mecánica que colaboraron en la etapa experimental.

REFERENCIAS

[1] J. Juvinall, *Fundamental of machines*, 3., ed. New York, USA, Mc-Graw Hill, 1998, pp 356-360.

[2] J. Shigley, *Diseño en ingeniería mecánica*, 6., ed. Michigan, USA, Mc-Graw Hill, 2002, pp 1036-1042.

[3] C. Alvarez, J. Marín and J. Gonzales, "*Mechanical characterization of an AC motor using a Foucault electromagnetic brake*". Scientia et Technica. 22, pp. 93-98 2003.

[4] R. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, chap. 22, Dayton, Prentice Hall, 2004, pp. 830-862.

[5] L.M. Pyzhevich, *Cálculo de frenos de fricción*. Moscú. Mashinostroenye. 1964.

[6] R. Norton, *Diseño de máquinas*, 1., ed, Worcester, USA. Prentice Hall, 1999. pp 973-980.

[7] O. Duran, *Diseño, construcción y puesta en funcionamiento de un banco de pruebas para frenos de fricción*, pp. 27-36. Thesis, University of Ibagué, Colombia. 1999.

[8] W. Jesser, "*The role of frictional stress on the generation of misfit dislocations*". S. Afr. J. Sci. 104, pp. 379-382. 2008.

[9] G. Calle, A. Díaz and C. Romero, "*Sobre la distribución de la presión a lo largo de la banda de un freno de tambor y zapata*". Scientia et Technica. 22, pp. 93-98. 2003.

[10] Y. Carranza and R. Beltran, "*Transferencia de calor de estado inestable en forros para frenos*". J Scientia et Technica. 21, pp. 77-82. 2003.

[11] F.R.N. Nabarro, "*Influence of elastic strain on the shape of particles segregating in an alloy*". Proc. Phys. Soc. (Lond.) 52, pp. 90–104. 1940.

[12] H.S. Carslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, ed. Oxford University Press. Oxford, 1959, pp.102-104, 297-311.

[13] V. Faires, *Diseño de elementos de máquinas*, 4., ed Mexico. Noriega Editores. 1996.

.