

ANÁLISIS SOBRE EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE DISCOS DE FRENO

ANALYSIS ON THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF BRAKE DISCS

J. Gramajo¹, A. Gualco¹⁻², R. Ame¹

anahuel_jona@yahoo.com.ar, agustingualco@yahoo.com.ar

¹ Secretaria de Investigación – i4- Facultad de Ingeniería UNLZ, Argentina.

² CONICET, Godoy Cruz 2290, C.A.B.A., Argentina

Recibido 20/09/2021; Aceptado: 08/10/2021

Resumen: La industria dedicada a la fabricación de materiales para aplicaciones de freno ha producido una nueva serie de materiales que presentan una gran extensión de la vida útil sin perder su forma y propiedades. En este sentido para evaluar estas ventajas se estudió el efecto de la presión de contacto sobre la resistencia al desgaste, fricción y temperatura de un nuevo material diseñado para aplicaciones de frenado. El sistema tribológico constó de un pin de fundición gris y un disco del material en estudio. La carga aplicada en el pin fue de 10 N y la velocidad de rotación del disco de 480 rpm. La forma del pin fue plana para el caso de menor presión de contacto y semiesférico para la mayor. La adquisición del coeficiente de fricción se efectuó por medio de la medición de la fuerza tangencial con una celda de carga tipo S. La temperatura se midió con una termocupla K a 1 mm de la superficie de contacto. Se midió la pérdida de peso y se calculó la tasa de desgaste y se caracterizó la superficie dañada. Se observó que el coeficiente de fricción en el periodo inicial fue menor para las muestras ensayadas con pin plano y no se observaron grandes diferencias en el periodo estable en ambas condiciones. La temperatura medida fue de 70 a 90 °C. Las muestras ensayadas con pin plano presentaron una superficie de desgaste homogénea de 6 mm de ancho mientras que las probetas con pin semiesférico mostraron un incremento de la pista de desgaste a 2 mm.

Palabras-clave: Desgaste, freno, geometría, temperatura, fricción

Abstract: The industry dedicated to the manufacture of materials for brake applications has produced a new series of materials that have a great extension of the useful life without losing their shape and properties. In this sense, to evaluate these advantages, the effect of contact pressure on wear resistance, friction and temperature of a new material designed for braking applications was studied. The tribological system consisted of a pin of gray cast iron and a disk of the material under study. The load applied was 10 N and the rotational speed of the disk was 480 rpm. The pin with flat surface

presented the lowest contact pressure. The friction coefficient was calculated by means of the measurement of the tangential force with a type S load cell. The temperature was obtained with a K thermocouple at 1 mm from the contact surface. Weight loss was measured and the damaged surface was characterized. It was observed that in the initial period the friction coefficient was lower for the samples tested with flat pin and no great differences were observed in the stable period in both conditions. The temperature was 70 to 90 ° C. The samples tested with a flat pin showed a homogeneous wear surface of wide 6 mm, while the specimens with a hemispherical pin showed an increase in the wear track to 2 mm.

Keywords: Wear, brake, geometry, temperature, friction.

1. Introducción

Los materiales de fricción, manufacturados con diversidad de componentes químicos y en distintas proporciones, según el fabricante, presentan coeficientes de fricción variables compatibles con dicha multiplicidad de composición y relacionada de algún modo con la presión específica y la velocidad de deslizamiento [J. Bijwe - P.J. Blau - D. Chan]. Las pastillas de freno y los aditivos para freno cumplen una variedad de funciones. Incluso una diferencia de uno o dos por ciento de la concentración de aditivos puede afectar el rendimiento, por lo que el control de la composición es importante. Es convención enumerar las composiciones de aditivos para frenos en porcentaje en volumen, pero no todos los autores lo hacen. Se pueden agrupar materiales y aditivos para frenos en función de sus funciones esperadas de la siguiente manera: Abrasivos, Modificadores de fricción, Rellenos y refuerzos y Materiales aglutinantes [Y. Lu].

Hay una pequeña ambigüedad en esta categorización. Algunos de los aditivos se pueden colocar en más de una categoría, ya que cumplen varias funciones. En consecuencia, hay algunas superposiciones inevitables en los listados tabulares. Además de los materiales de freno básicos, normalmente hay algo de porosidad (5-10% o más). Para analizar el papel de los aditivos en el control de la fricción y el desgaste, es insuficiente simplemente conocer su composición, ya que su forma, distribución y tamaño de partícula pueden afectar la fricción y el comportamiento al desgaste. Por ejemplo, las partículas esféricas redondeadas de un material duro y abrasivo pueden tener un efecto diferente al de las partículas esféricas angulares en la formación y estabilidad de las películas de superficie producidas por fricción las que controlan el comportamiento de frenado [Y. Lu A.E. Anderson - A. Wirth].

El cabal conocimiento de estas variables y su correlación (más allá de la variabilidad del coeficiente de roce según lo indicado) permiten optimizar los diseños de elementos mecánicos cuyo funcionamiento se basa en el roce de partes para transmitir movimiento.

De este modo se puede establecer las mejores condiciones de funcionamiento, de acuerdo a su aplicación específica y garantizar la eficiencia del funcionamiento. En el presente trabajo se estudiará el efecto de la presión de contacto sobre la temperatura, el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste de un moderno material utilizado en aplicaciones de deslizamiento.

2. Materiales y metodos

2.1. Par disco-pin

Se confeccionaron 6 discos de 5 cm de diámetro y 3 mm de espesor y 6 pines de los cuales la mitad tienen frente plano y los otros semiesféricos, ver figura 1.



Figura 1 – Imágenes de los cilindros de cara plano y semiesférica y del disco

La composición del disco a evaluar se detalla en la Tabla 1. En color amarillo se presentan las fibras, en verde las cargas, en naranja el aglutinante, en celeste los modificadores de fricción.

Tabla 1. Composición del disco

Material	Fibra mineral	Celulosa	Fibra vegetal	Cargas livianas	Cargas pesadas	Aglutinante
Porcentaje	2%	7%	12%	7%	20%	20%
Material	Colorante	Coke	Lubricante	Caucho	Oxido de metal	Scrap y polvo Scrap
Porcentaje	2%	2%	1,50%	5,50%	2%	16%

La composición del disco fue caracterizada con lupa estereoscópica con luz polarizada rasante.

2.2. Ensayo tribológico

La máquina utilizada para ensayar las muestras pin-disco fue programada para girar a 580 rpm, con rampa de inicio y final de 1 segundo y una carga aplicada de 10N. La medición del coeficiente de fricción se efectuó con una placa NI 9237, con

compensación de temperatura. La pérdida de peso se evaluó cada 1 hora con una balanza analítica de 0,1 miligramo. La presión de contacto fue de 0,3 N/mm² y 3 N/mm² para el pin plano y semi-esférico respectivamente.

2.3. Medición de temperatura

Se utilizó una termocupla K colocada a 1mm de la superficie de contacto y la adquisición de datos se realizó con una placa NOVUS de 8 canales de 1000 valores por segundo con canales opto acoplados. Después de 30 minutos de ensayo se tomaron fotos con cámara termográfica FLIR.

2.4. Caracterización de superficie de desgaste

Después de realizado el ensayo se caracterizó con lupa estereoscópica la superficie del pin y el disco desgastado. Se evaluó el material desprendido y se dimensiono con un software específico de medición de partículas.

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización del disco

En la figura 2 se muestra la superficie del disco. Se pueden diferenciar las distintas fases siendo la matriz de cargas y aglutinantes la de mayor volumen, seguido por partículas de metal, óxidos, caucho, coke y fibras. Se observó un contenido de 10-15 % de huecos aislados [M.G. Jacko -J.K. Lee].

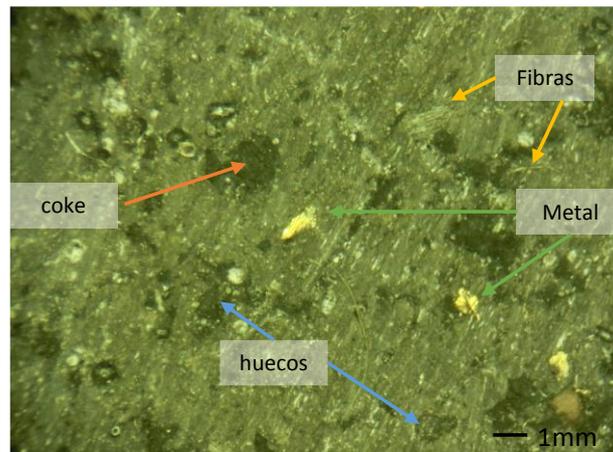


Figura 2: Foto lupa de las fases del disco

3.2. Ensayos tribológicos

En la figura 3 se presentan los resultados de la pérdida de peso medida cada 1 hora de ensayo o 3617 m de distancia recorrida. Se obtuvieron las ecuaciones que vinculan el desgaste con la distancia recorrida con un valor de correlación superior 0,98.

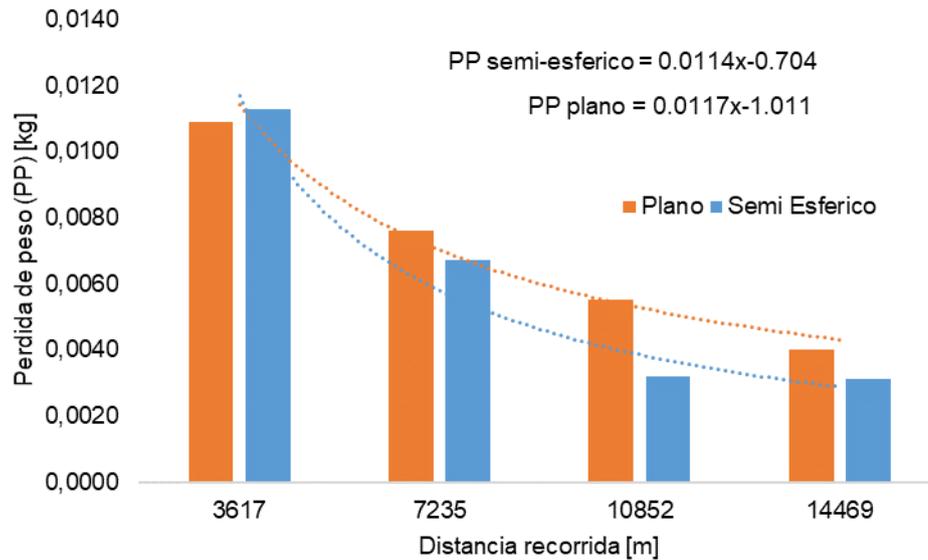


Figura 3: Pérdida de peso para pin plano y Semiesférico

En la figura 3 se observa para ambas condiciones de ensayo, pin plano y semi-esférico, un periodo inicial de gran desgaste que disminuyo rápidamente estabilizándose después de las 3 horas o 10.000 m de distancia recorrida. El pin semi-esférico presentó el mayor desgaste inicial relacionado con la mayor presión de contacto. En el periodo de desgaste moderado se invirtió la tasa de desgaste siendo mayor para el pin plano, indicando un cambio en el mecanismo de desgaste [B.K. Satapathy].

En la figura 4 se muestran los valores de pérdida de peso acumulada en función de la distancia recorrida. Las ecuaciones de correlación lineal no tienen en cuenta el periodo inicial. Se puede ver que el pin plano presento la mayor tasa de desgaste. Esto estaría relacionado con la mayor área de contacto del área circular respecto a un sector de área de la semiesfera.

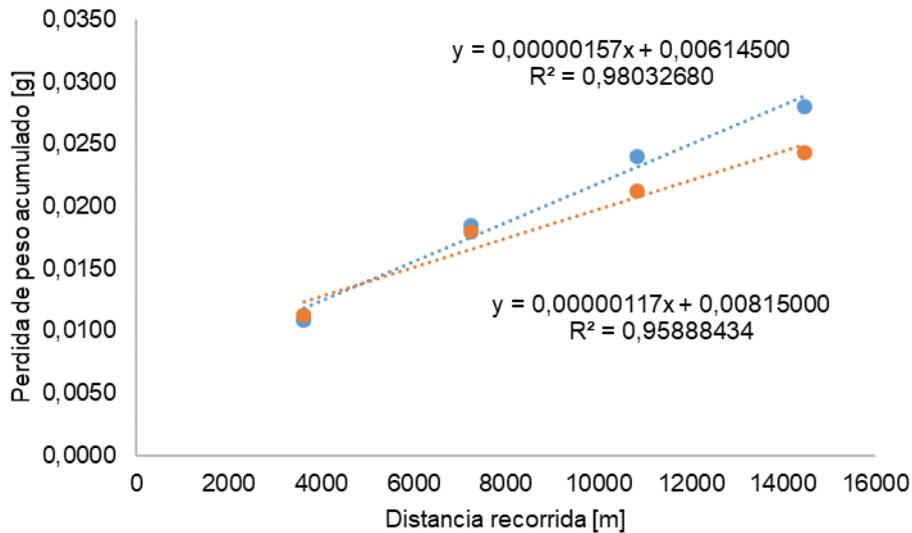


Figura 4: Tasa de desgaste medida para el pin plano y semiesférico.

Los resultados de coeficientes de fricción para los pares disco pin plano y disco pin semiesférico se presentan en la figura 5.

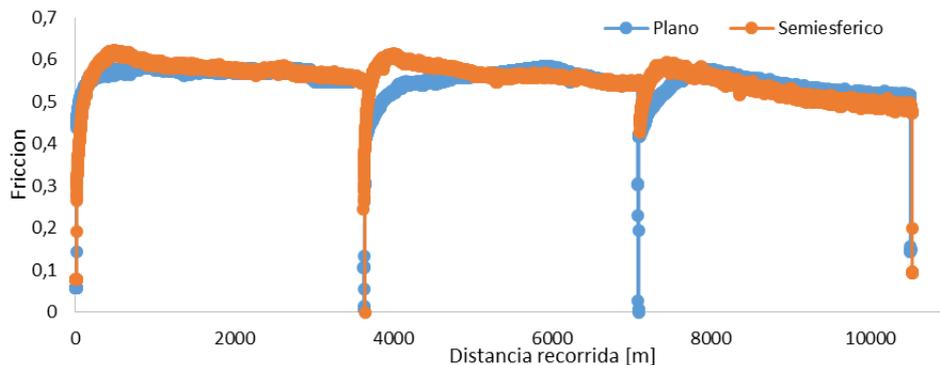


Figura 5: Coeficiente de fricción para el pin plano y semiesférico.

Se puede ver en la figura 5 que el pin semiesférico presenta un aumento inicial del coeficiente de fricción a valores de 0,64 que luego disminuyen hasta estabilizarse a 0,60. Esto estaría asociado al periodo inicial de alta interacción entre fases del disco y la superficie del pin y la baja viscosidad de la matriz debido a la menor temperatura. Después de 3000 metros de distancia recorrida se observa una leve disminución del coeficiente de fricción alcanzando valores de 0,58. En este sentido en el último tramo de medición de fricción más allá de los 8000 metros el valor medido promedio fue de 0,48. Diferentes autores [5-7] han propuesto que la presencia de material particulado en la interfase sumado al efecto de la

temperatura y presión produce su aglomeración reduciendo el esfuerzo de roce. Además, algunas de partículas están constituidas por grafito o elementos lubricantes que redundan en el beneficio de mejorar el coeficiente de rozamiento [B.K. Satapathy - W., Griepentrog - Fernandes, G. P]. El coeficiente de fricción presenta leves diferencias en el periodo estacionario entre el pin plano y el semiesférico.

3.3. Temperaturas pin-disco.

En la figura 6 se muestran los valores de temperatura del pin plano y semiesférico adquiridos a 1 mm desde la superficie de contacto.

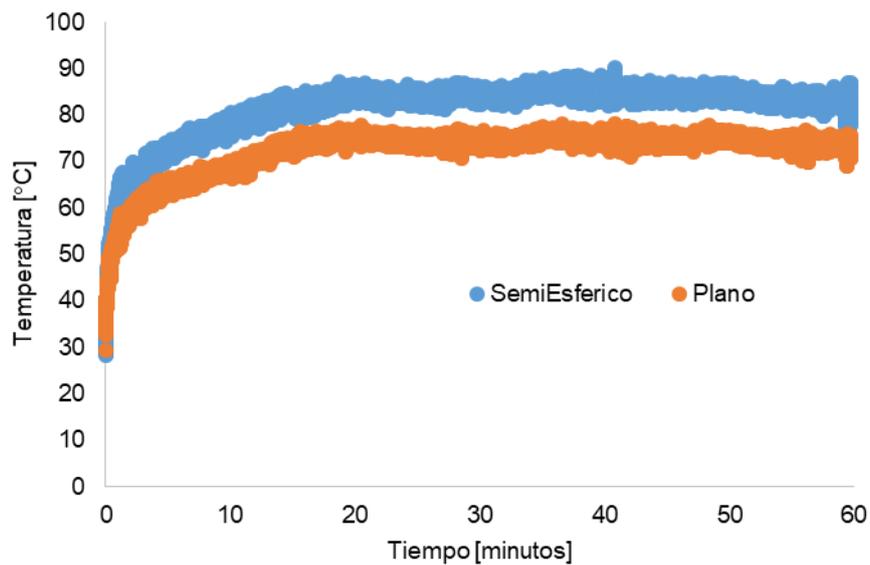


Figura 6: Evolución de la temperatura para pin plano y semi-esferico

Los valores de temperatura son representados en la figura 6. Se observa que después de 20 minutos se alcanza la temperatura del régimen estacionario siendo 80 °C y 71 °C para el pin semiesférico y plano respectivamente.

En la figura 7 se muestran imágenes termográficas del ensayo tribológico con dos mediciones de temperatura puntuales sobre la zona de contacto pin-disco y en el extremo opuesto de la pista del disco desgastado.

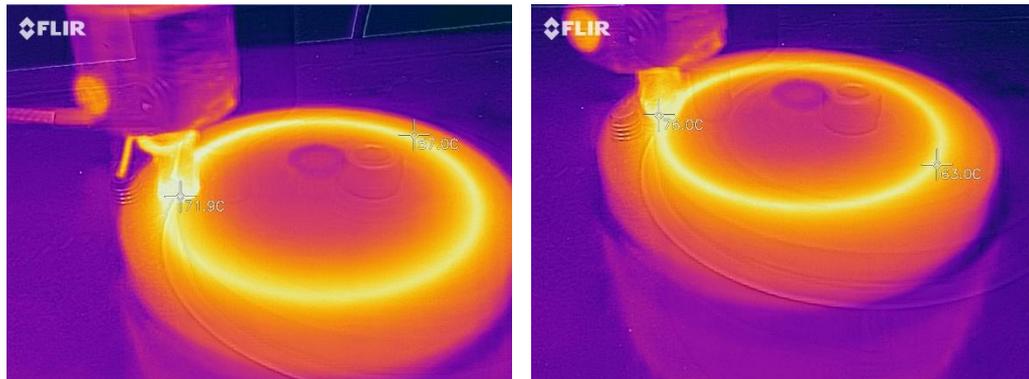


Figura 7: Imagen termográfica del par pin plano/disco y pin semi-esferico/disco.

En base a lo observado en la figura 7 se puede determinar que la temperatura medida en la zona de contacto pin-disco es similar a la determinada con la termocupla K en la figura 6. Esto es corroborado con la zona brillante que indica un radio de 2 mm de acción térmica de igual temperatura. Además, se destaca que hay una leve disminución de entre 12-18°C entre extremos en la pista de desgastada

3.4. Caracterización de desgaste

La evolución de la superficie del pin semiesférico desgastado se muestra en la figura 8.

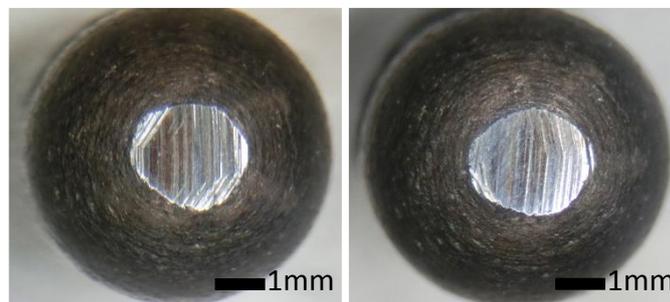


Figura 8: Superficie del pin semi-esferico desgastado a 3617m y 14469m.

Durante el periodo inicial se observó un incremento del área de contacto en el pin semiesférico pasando de unos pocos milímetros cuadrados a un 3 mm². No se evidenció un aumento de la zona de contacto entre los 3617 m y 14469 de distancia recorrida, como se muestra en la figura 8. Sobre la superficie del pin se observan las líneas de abrasión en dirección coincidente al movimiento del disco. En el caso del pin plano no se detectó desgaste en la cara de contacto.

En la figura 9 se muestran imágenes de la superficie del disco desgastado a 14469 m.

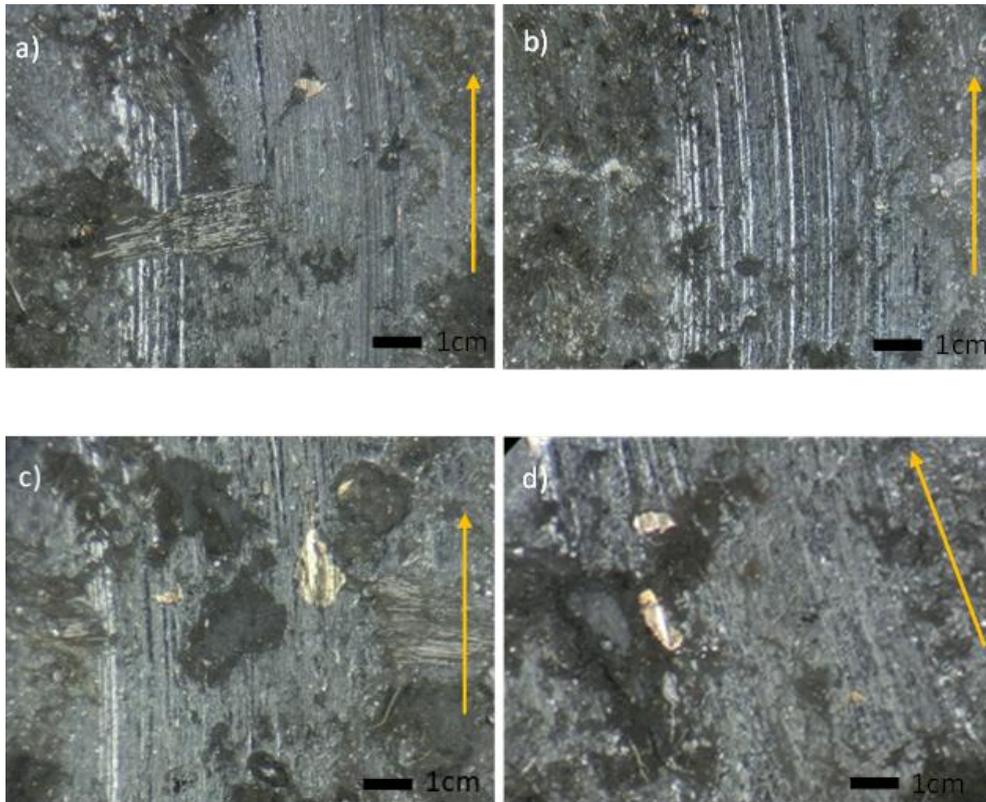


Figura 9: Superficies del disco desgastado.

En todas las muestras analizadas se observaron líneas de abrasión en dirección al sentido de giro. El ancho de la zona desgastado fue de 2 mm y 6 mm para los discos ensayados con pin semiesferico y plano respectivamente. Las fibras y el material particulado metálico mostraron desgaste superficial pero no se observó desprendimiento del mismo debido a la efectiva adhesión con la matriz. El coque sufrió fracturas produciendo partículas de pequeño tamaño las cuales rellenan junto con otras partículas finas los huecos del disco. Las sucesivas pasadas del pin produjeron aumento de temperatura que con la presión de contacto compactaron y amalgamaron las partículas desprendidas [Fernandes, G. P - Saffar, A - Kchaou, M-Sallit, I]. Después de cada ensayo se recolecto el material desprendido. En la figura 10 se muestran imágenes del debris obtenido a 1 hora y 3 horas.

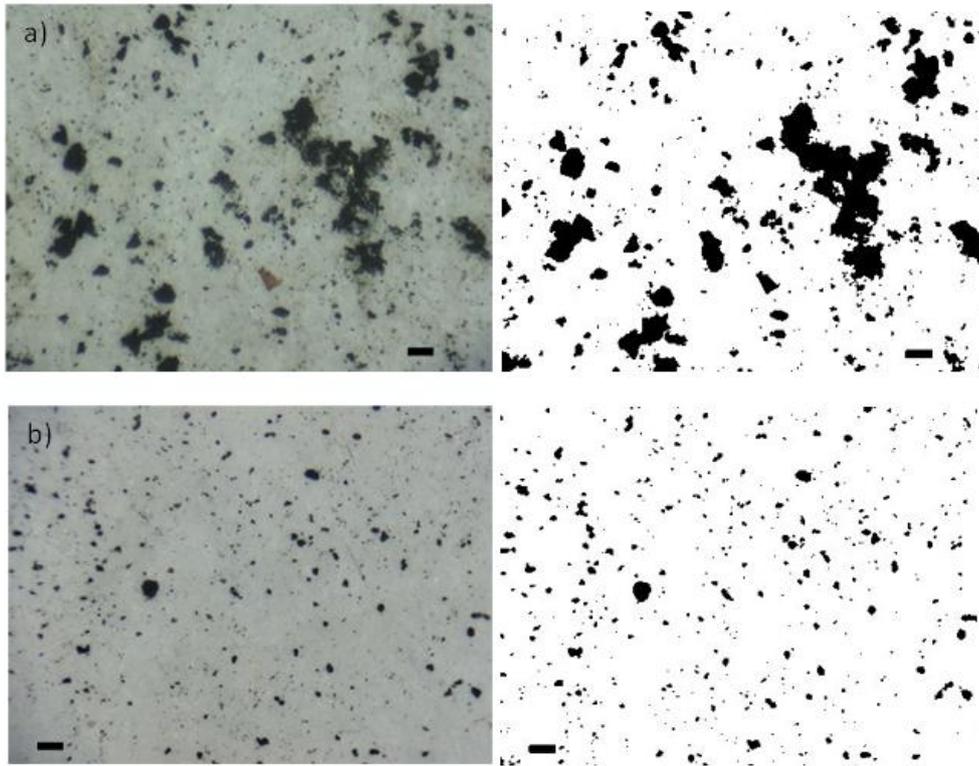


Figura 10: Imágenes de lupa y de análisis digital del material desprendido del par pin semiesférico/disco a) 3617m y b)10852m. Barra 4 mm.

El tamaño y morfología de las partículas desprendidas en el periodo inicial presentan una forma irregular en tamaños mayores a los 4 mm y tipo circular/elíptico para las de menor tamaño, como se muestra en la figura 10a. Después de unas horas de distancia recorrida la forma de las partículas fue mayoritariamente regulares elípticas. Además, se observó una disminución del tamaño de las mismas. Esto estaría asociado con el cambio de mecanismo de desgaste pasando de una abrasión severa a desgaste suave con compactación de partículas.

En la figura 11 se presentan los gráficos de frecuencias relativos al tamaño de partículas de la figura 10 a y b.

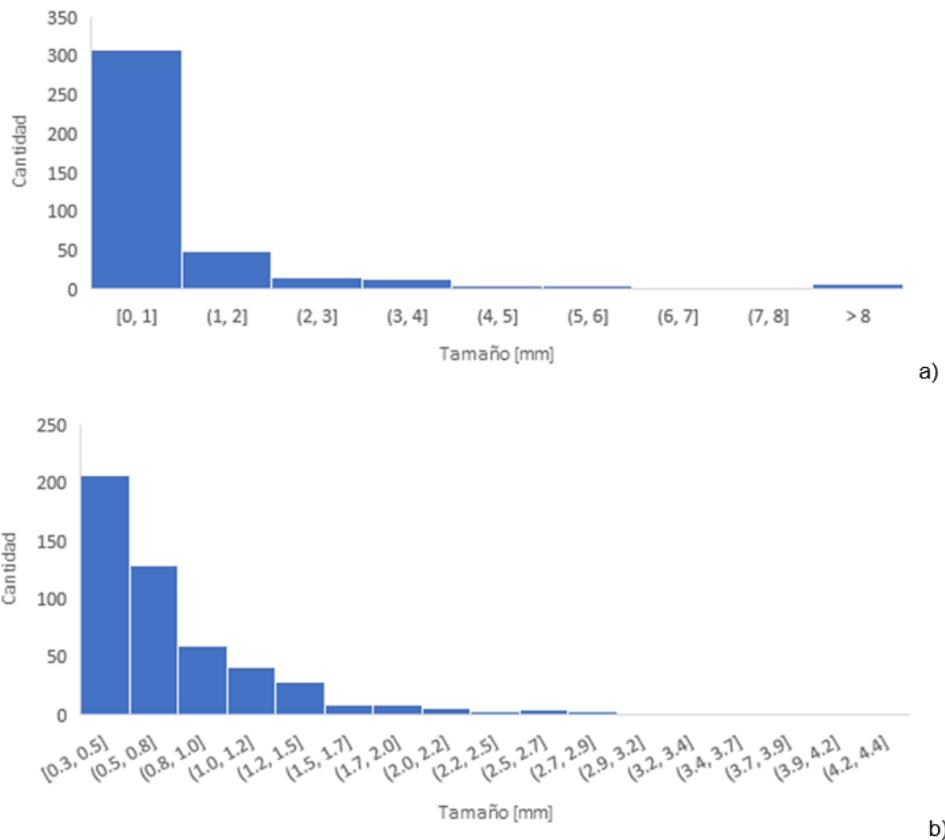


Figura 11: Graficas de cuantificación de partículas a a) 3617m y b)10852m.

El tamaño promedio de las partículas fue entre 0-6 mm y mayores a 8 mm recolectadas en la primera hora de ensayo y de 0,3-2,0mm para las muestras 3hs. Además, se debe considerar que si bien la cantidad de partículas mayor a 8 mm fue baja el volumen que conforman representa una importante incidencia en el desgaste.

4. Conclusiones

El estudio llevado a cabo sobre el análisis tribológico de dos pares pin plano/disco y pin semiesférico/disco presentó en ambas condiciones un periodo inicial elevado de desgaste y luego un cambio a desgaste suave con compactación del material desprendido. El tamaño y forma del debris cambio con el desgaste de varios milímetros (> 8) a decimas de milímetro. La temperatura alcanzada fue de 80 y 71 C para pin semiesférico y plano. El semiesférico mostró desgaste abrasivo en la zona de contacto hasta alcanzar un área de 3 mm². El coeficiente de fricción fue de 0,58 en el periodo inicial y de 0,48 en los últimos tramos del ensayo. No se

observaron diferencias significativas entre ambos pines en referencia al coeficiente de fricción.

5. Referencias

- J. Bijwe, Composites as friction materials: recent developments in nonasbestos fiber reinforced friction materials—a review, *Polym. Comp.* 18 (3) (1997) 378–396.
- P.J. Blau, Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and their Additives, ORNL/TM-2001/64, September 2001.
- D. Chan, G.W. Stachowiak, Review of automotive brake friction materials, *Proc. Inst. Mech. Eng. D: J. Automob. Eng.* 218 (2003) 953–966.
- Y. Lu, A golden section approach to optimization of automotive friction materials, *J. Mater. Sci.* 38 (5) (2003) 1081–1085.
- Y. Lu, A combinatorial approach for automotive friction materials: combined effects of ingredients on friction performance, *Polym. Comp.* 23 (5) (2002) 814–817.
- Y. Lu, M.A. Wright, T. Policandriotes, Modelling wear traces of automotive friction materials by cantor set, *Tribol. Trans.* 45 (2) (2002) 258–262.
- A.E. Anderson, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM Hand Book, vol. 18, ASM Materials Information Society, USA, 1990, pp. 569–577.
- A. Wirth, D. Eggleston, R. Whitaker, A fundamental tribochemical study of the third body layer formed during automotive friction braking, *Wear* 179 (1994) 75–81.
- M.G. Jacko, S.K. Rhee, in: M. Grayson (Ed.), *Encyclopedia Composite Materials and Components*, John Wiley and Sons, 1983, pp. 144–154.
- J.K. Lee, J.H.C. Lin, C.P. Ju, Surface effect on braking behavior of PAN–pitch carbon–carbon composite, *Wear* 199 (1996) 228–236.
- B.K. Satapathy, J. Bijwe, Performance of friction materials based on variation in nature of organic fibres. Part I. Fade and recovery behaviour, *Wear* 257 (5–6 Suppl. 1–2) (2004) 573–584.
- B.K. Satapathy, J. Bijwe, Fade and recovery behavior of non-asbestos organic (NAO) composite friction materials based on combinations of rock fibers and organic fibers, *J. Reinf. Plast. Comp.* 24 (6) (2005) 563–577.
- W., Griepentrog, M., Gross, T., & Urban, I. (2001). Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes. *Wear*, 251(1-12), 1469–1476.
- Fernandes, G. P., Zanotto, P. S., & Sinatora, A. (2015). Contribution on understanding the friction film development in the performance of a dry automotive clutch system. *Wear*, 342-343, 364–376.

- Saffar, A., & Shojaei, A. (2012). Effect of rubber component on the performance of brake friction materials. *Wear*, 274-275, 286–297
- Kchaou, M., Sellami, A., Elleuch, R., & Singh, H. (2013). Friction characteristics of a brake friction material under different braking conditions. *Materials & Design (1980-2015)*, 52, 533–540.
- Sallit, I., Richard, C., Adam, R., & Robbe-Valloire, F. (1998). Characterization Methodology of a Tribological Couple. *Materials Characterization*, 40(3), 169–188.