

Estudio del desgaste por contacto bola-plano en la aleación de aluminio 6061

Wear study of the ball on flat contact in 6061 aluminum alloy

TORRES-SUAREZ, Francisco Emmanuel*†, MENDOZA-MENDOZA, Jesús Cornelio, VALDEZ-SIERRA, Jonnatan y VERA-CÁRDENAS, Edgar Ernesto

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pachuca

ID 1^{er} Autor: *Francisco Emmanuel, Torres-Suarez* / ORC ID: 0000-0003-4779-5085, Researcher ID Thomson: P-4870-2018, Mendeley: francisco-emmanuel-torres-suarez

ID 1^{er} Coautor: *Jesús Cornelio, Mendoza-Mendoza* / ORC ID: 0000-0002-9506-4212, Researcher ID Thomson: P-4814-2018, Mendeley: jesus-cornelio-mendoza-mendoza

ID 2^{do} Coautor: *Jonnatan, Valdez-Sierra* / ORC ID: 0000-0001-5206-0863, Researcher ID Thomson: P-5354-2018, Mendeley: jonnatan-valdez-sierra

ID 3^{er} Coautor: *Edgar Ernesto, Vera-Cárdenas* / ORC ID: 0000-0002-9658-0008

Recibido: 15 de Septiembre, 2018; Aceptado 5 de Diciembre, 2018

Resumen

En este trabajo se estudió el desgaste por deslizamiento de la aleación de aluminio 6061 empleando técnicas experimentales, para posibles aplicaciones en componentes mecánicos de sistemas automotrices. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo utilizando una máquina reciprocante de configuración bola sobre plano. Se realizaron pruebas en condiciones secas y lubricadas empleando un aceite SAE 40. La duración de las pruebas fue de 9000 ciclos a temperatura ambiente (20-23°C y 45%-50% de humedad relativa), a una frecuencia de 5 Hz, amplitud de deslizamiento de 3 mm y una carga normal de 1.96 N (0.75 GPa de presión de contacto). Antes de las pruebas de desgaste, se determinó la rugosidad y microdureza del aluminio. Se caracterizó el desgaste presentado por microscopía óptica y SEM. Se obtuvieron los coeficientes de fricción tanto en condiciones secas como lubricadas, observando una clara diferencia entre ambas condiciones. Finalmente se calcularon los volúmenes de desgaste por medio de perfilometría, obteniendo un promedio de la profundidad, longitud y ancho de la huella de desgaste. Los resultados muestran una clara reducción del coeficiente de fricción y tasas de desgaste en condiciones lubricadas, los mecanismos de desgaste observados principalmente fueron deformación plástica y abrasión de tres cuerpos.

Desgaste por deslizamiento, Aluminio, Lubricación

Abstract

In this work the sliding wear of 6061 aluminum alloy was studied using experimental techniques, for possible applications in mechanical components of automotive systems. The experimental tests were carried out using a reciprocating machine with a ball-on-plane configuration. Tests were carried out in dry and lubricated conditions using a SAE 40 oil. The duration of the tests was 9000 cycles at room temperature (20-23 ° C and 45% -50% relative humidity), at a frequency of 5 Hz, Slip amplitude of 3 mm and normal load of 1.96 N (0.75 GPa of contact pressure). Before the wear tests, the roughness and microhardness of the aluminum were determined. The wear presented by optical microscopy and SEM was characterized. The coefficients of friction were obtained both in dry and lubricated conditions, observing a clear difference between the two. Finally, the wear volumes were calculated by means of profilometry, obtaining an average of the depth, length and width of the wear scar. The results show a clear reduction of the coefficient of friction and wear rates in lubricated conditions, the wear mechanisms observed mainly were plastic deformation and abrasion of three bodies.

Sliding wear, Aluminum, Lubrication

Citación: TORRES-SUAREZ, Francisco Emmanuel, MENDOZA-MENDOZA, Jesús Cornelio, VALDEZ-SIERRA, Jonnatan y VERA-CÁRDENAS, Edgar Ernesto. Estudio del desgaste por contacto bola-plano en la aleación de aluminio 6061. Revista del Desarrollo Tecnológico. 2018. 2-8: 7-13

* Correspondencia al autor (correo electrónico: ing_torres91@outlook.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El uso del aluminio en la industria automotriz ha aumentado considerablemente durante la última década. Actualmente se manufacturan componentes de aluminio como pistones, carcasas de motores, ruedas, cajas de transmisión, sistemas de frenos anti-bloqueo, conjunto de suspensión, amortiguadores e intercambiadores de calor para los sistemas de climatización, radiadores, estructuras y carrocerías entre otros. Además, las aleaciones de aluminio 6061 se utilizan cada vez más debido a la buena resistencia a la corrosión, alta capacidad de amortiguación, baja densidad y buena conductividad eléctrica y térmica. (Himanshu, K.K.S., & Sandeep, 2014).

El uso del aluminio tiene grandes ventajas medioambientales, tales como: la ligereza del material supone una reducción del peso del vehículo de hasta un 30% lo que se traduce en un ahorro de combustible. En términos de su capacidad de reciclaje más del 95% del aluminio contenido en los automóviles es recuperado y reciclado (Rohatgi, 1991).

Las aleaciones de aluminio tienen propiedades mecánicas que pueden ser modificadas en cuanto a su microestructura y dureza, haciéndolas resistentes al desgaste por deslizamiento para fabricar entre otros, cilindros para frenos y especialmente pistones (Hutchings, 1992).

En el área de contacto de componentes automotrices se presentan esfuerzos debido al trabajo por deslizamiento y por la temperatura, afectando la vida útil de los motores y mecanismos. Es crítico mantener la integridad de estos componentes para asegurar la reducción de emisiones contaminantes y su impacto en la economía. Para lograr esto, se deben utilizar los materiales adecuados junto con sistemas de lubricación para contrarrestar el desgaste por deslizamiento (Ishizuki, Sato, & Takase, 1981; Haddad, 1995).

Entre los componentes internos más importantes de un motor es el pistón, el cual actualmente es fabricado de aleaciones de aluminio debido a su bajo peso, bajo costo y resistencia aceptable. Sin embargo, pueden estar presente otros elementos en pequeñas cantidades, como el silicio.

Los pistones hipereutécticos son más resistentes que las aleaciones comunes de aluminio y se usan para aplicaciones de alto rendimiento. Aunque son menos resistentes que los pistones forjados, pero son más económicos (Mattson, 1995; Tain, 1997).

El objetivo de este trabajo es realizar el estudio de desgaste por deslizamiento en condiciones secas y lubricadas de la aleación de aluminio 6061, la cual es utilizada en la manufactura de algunos componentes mecánicos y partes de motores de combustión interna.

Metodología experimental

I. Elaboración de probetas

Se elaboraron 4 probetas de aluminio 6061 de un redondo con un diámetro de 5/8 de pulgada, estas se cortaron a un espesor de 5 mm con un disco de corte de metal, como se muestra en la figura 1.



Figura 1 Corte de probetas de aluminio

El acabado de la superficie del material fue de tipo espejo, para obtener este acabado se utilizó una pulidora Metallographic Lapping / Polishing Machine UNIPOL-820 como se muestra en la figura 2.



Figura 2 Pulidora UNIPOL-820

El pulido se realizó con una lija de agua de 600 para comenzar a remover las rebabas de la superficie, posteriormente se usó una lija del número 800 para comenzar a darle un acabado uniforme, por último, se utilizó una lija de 1200 para obtener un acabado liso y brillante. Las probetas son las que se muestran en la figura 3.



Figura 3 Acabado superficial de probetas de aluminio 6061

II. Rugosidad

La rugosidad de la superficie de las probetas se determinó con un rugosímetro Mitutoyo SJ-400 como se muestra en la figura 4, para calcular el valor promedio de la rugosidad se midieron 10 puntos diferentes, los parámetros empleados para la medida de la rugosidad fue la rugosidad media Ra y la profundidad de la rugosidad Rz.

III. Dureza

La dureza del aluminio 6061 se determinó con un micro durómetro vickers hardness tester como se muestra en la figura 5, para determinar la dureza promedio se midieron 10 puntos diferentes, aplicando una carga de 50 g en el material. Los valores promedio de rugosidad y dureza de los materiales son los que se muestran en la tabla 1.



Figura 4 Medición de rugosidad

ISSN: 2531-2960

ECORFAN® Todos los derechos reservados

Material	Aluminio 6061
Micro dureza (Vickers)	113.807
Rugosidad Ra (μm)	0.239

Tabla 1 Propiedades del material (valores Promedio)

IV. Pruebas de desgaste por contacto bola sobre plano

Se utilizó un maquina reciprocante para llevar a cabo pruebas de desgaste por contacto de bola sobre plano. El pin es sujetado con un prisionero en el brazo alternativo y las probetas circulares son sujetadas en una base cuadrada. La máquina reciprocante es controlada por un generador de funciones. Las mediciones de fricción se determinaron a través de un modelo de celda de carga SM-50N, con una capacidad de 50 N y una potencia nominal de 3 mV/V.

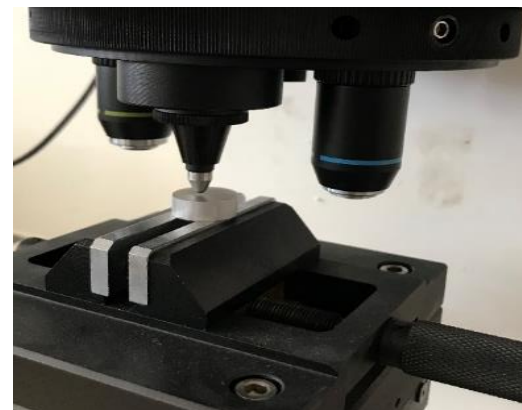


Figura 5 Medición de micro dureza Vickers

Las condiciones de prueba que se utilizaron para el desgaste por contacto bola-plano, para condiciones secas y lubricadas en el Aluminio 6061, fue una carga de 5 N, una velocidad de 200 rpm, un tiempo de 15 min y aceite SAE 40 para las condiciones lubricadas. En la figura 6 se muestra la máquina tribológica reciprocante.

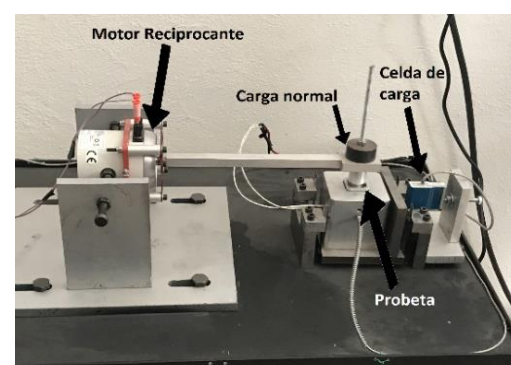


Figura 6 Máquina tribológica reciprocante

Resultados y discusión

I. Coeficiente de fricción (cf)

Por medio del software “Data Studio” conectado a la celda de carga se toman mediciones cada 0.1 s de la fuerza de fricción.

Al final de los 15 min de la prueba se tienen 9 000 datos puntuales. En la figura 7 se pueden ver las gráficas del cf para las pruebas realizadas en condiciones secas.

A pesar de contar con un comportamiento distinto en ambas pruebas, el valor máximo del cf en la prueba 1 es de 0.69 y el mínimo de 0.45, mientras que en la prueba 2 el máximo es de 0.74 y el mínimo de 0.49. El cf, sin embargo, será el promedio de todos los valores puntuales, el cual en el caso de la prueba 1 es de 0.538 mientras que en la prueba 2 es de 0.574, y es por tanto que el cf del aluminio 6061 en contacto bola-plano con un pin de acero AISI 4140 en condiciones secas se determina como 0.556.

El mismo análisis es realizado en las pruebas lubricadas, en la figura 8 se observa el comportamiento de las dos pruebas realizadas.

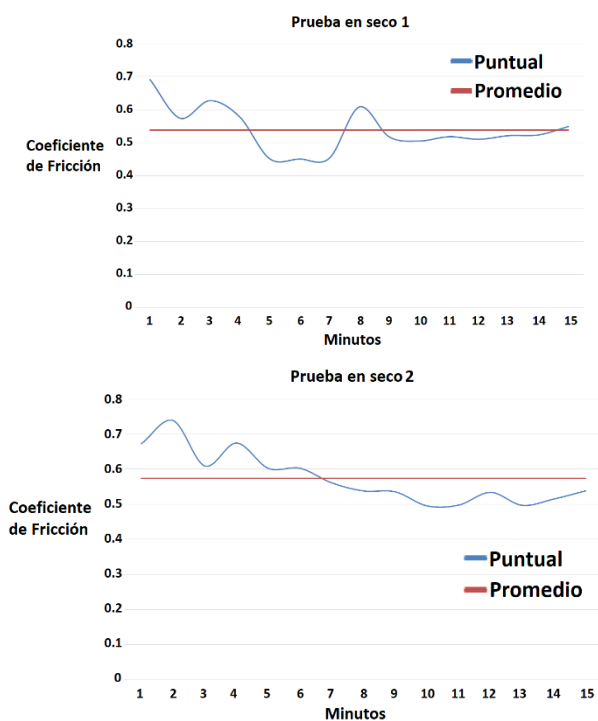


Figura 7 Coeficiente de fricción en pruebas en seco

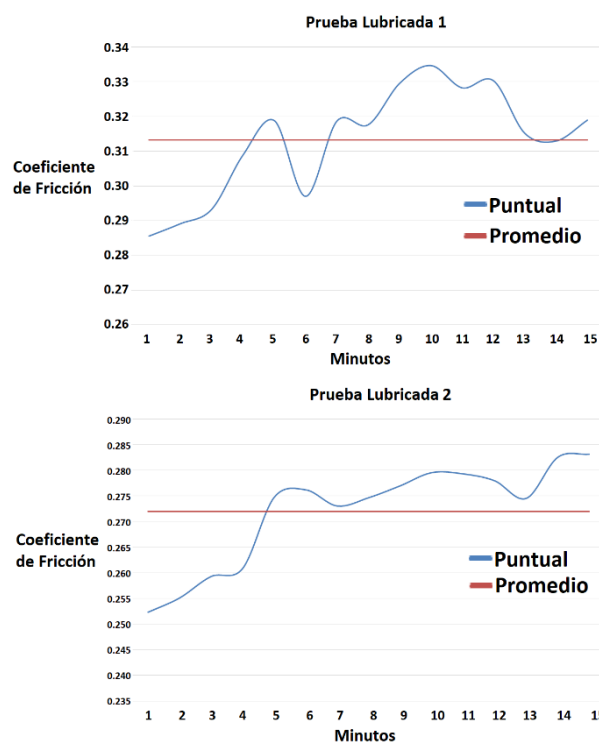


Figura 8 Coeficiente de fricción en pruebas lubricadas

Los valores de la prueba 1 van de 0.286 a 0.334 con un promedio de 0.313 mientras que los de la prueba 2 van de 0.252 a 0.283 con un promedio de 0.272, y es por tanto que el cf del aluminio 6061 en contacto bola-plano con un pin de acero AISI 4140 en condiciones lubricadas se determina como 0.2925. El cf en condiciones lubricadas es 47.4% menor que en condiciones secas, gracias al lubricante el cf bajó casi a la mitad.

II. Perfilometría

Las huellas de desgaste que se generaron en la superficie del aluminio 6061 en pruebas de deslizamiento en seco son las que se muestran en la figura 9, y en la figura 10 se muestran las huellas de desgaste en la superficie del aluminio 6061 en pruebas de deslizamiento lubricadas.

Con un perfilometro Mitutoyo SJ-400 se determinaron los perfiles longitudinales de las huellas de desgaste en las probetas de aluminio 6061, sometidas a desgaste por contacto bola plano en condiciones secas y lubricadas, los cuales se muestran en la figura 11 y 12.



Figura 9 Huellas de desgaste en condiciones secas



Figura 10 Huellas de desgaste en condiciones lubricadas

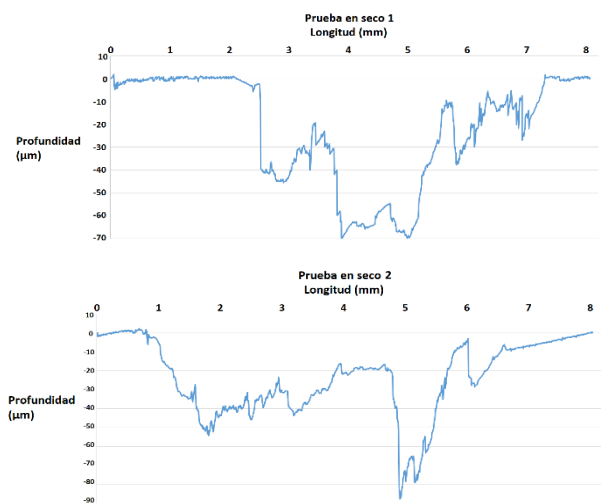


Figura 11 Perfilometría aluminio 6061 condiciones secas

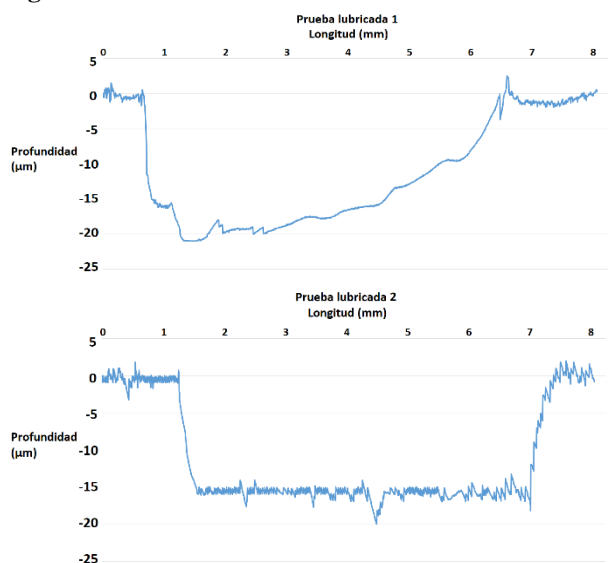


Figura 12 Perfilometría aluminio 6061 condiciones lubricadas

En la figura 11 se puede apreciar la profundidad de huella de 70 μm en la prueba 1 y de 88 μm en la prueba 2 ambas realizadas en condiciones secas, mientras en la figura 12 se aprecia una profundidad máxima de huella de 21 μm realizadas en condiciones lubricadas. Esto representa un aumento de profundidad de huella de hasta 233% si no se usa lubricación.

III. Microscopía

En la figura 13 se puede observar la microscopia de las diferentes formas de desgaste presentes en las probetas de aluminio 6061 bajo condiciones secas, se observan múltiples zonas de arranque de material, picaduras, ralladuras, grietas y fracturas.

En la figura 14 se muestra la microscopia de las huellas de desgaste bajo condiciones lubricadas, la huella de desgaste es altamente uniforme y solo presenta pequeñas ralladuras.

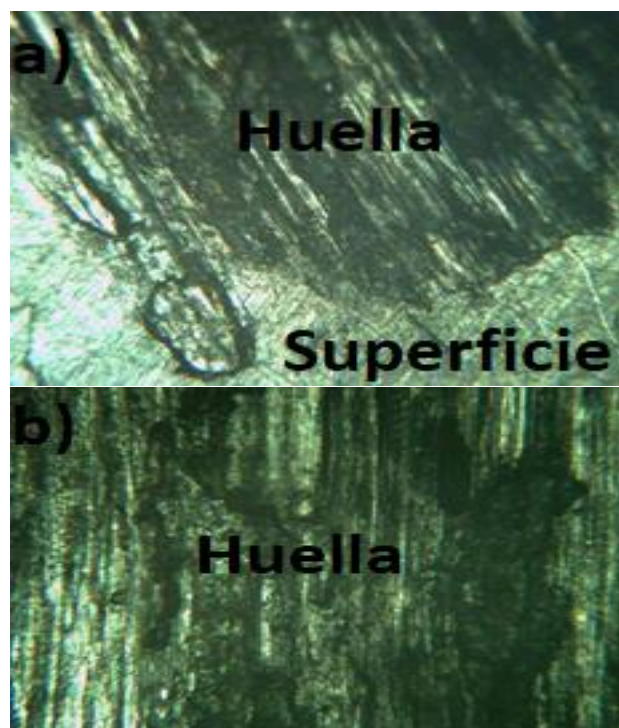


Figura 13 Microscopia de Aluminio 6061 en contacto bola-plano en condiciones secas, a) Inicio de huella de desgaste, b) Huella de desgaste en zona media

En la figura 15 se muestra la microscopia del pin, se observa la manera en que se comportó el material, este no presenta desgaste significativo, únicamente obtuvo adherencia de aluminio.

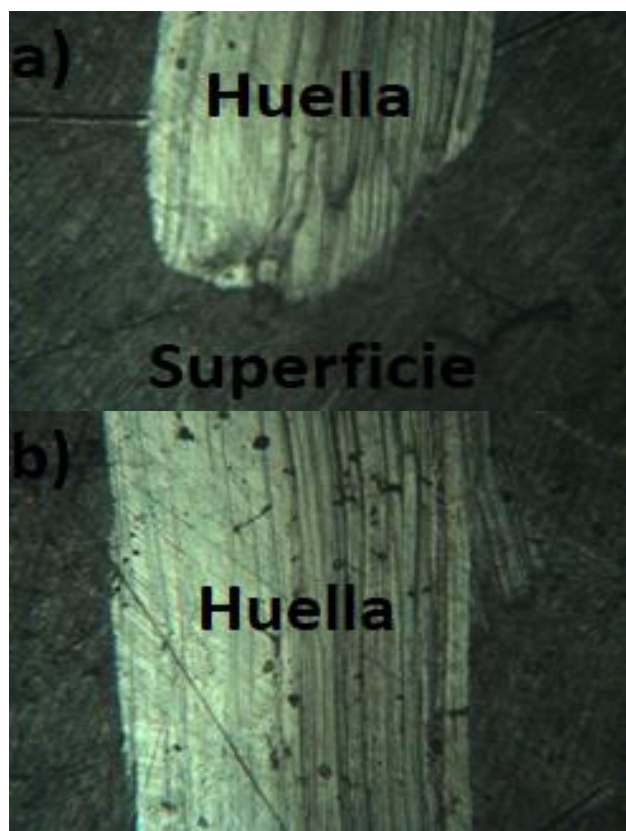


Figura 14 Microscopia de Aluminio 6061 en contacto bola-plano en condiciones Lubricadas, a) Inicio de huella de desgaste, b) Huella de desgaste en zona media.

IV. Tasa de desgaste

Para obtener la tasa de desgaste en primer lugar se debe encontrar el volumen de desgaste, este se obtiene mediante la ecuación (1), mostrada a continuación.

$$V_d = \left(R^2 \cos^{-1} \left(\frac{R-d}{R} \right) - (R-d) \sqrt{2Rd - d^2} \right) (l - 2r) \quad (1)$$

Donde d , l y r se muestran en la figura 16, y R es el radio del pin con el que se realizaron las pruebas, que en este caso es de 3.175 mm. Los datos obtenidos de las huellas se muestran en la tabla 2, se considera el promedio de varias mediciones tomadas.



Figura 15 Microscopia de PIN (Acero AISI 4140), desgaste por contacto bola-plano, a) centro del pin, b) extremo del pin

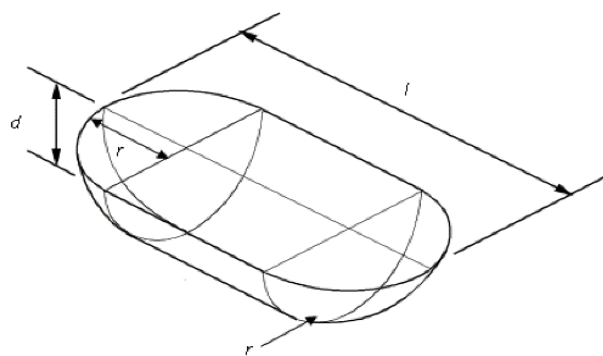


Figura 16 Dimensiones de huella para volumen de desgaste (Green, 2006)

	Huellas de desgaste		
	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Profundidad (µm)
Probeta 1 Seco Promedio	5.531	2.049	62.587
Probeta 2 Seco Promedio	5.386	2.785	69.927
Probeta 1 Lubricada Promedio	5.831	1.205	15.292
Probeta 2 Lubricada Promedio	5.168	1.124	19.912

Tabla 2 Medidas de huellas de desgaste

Con base en los datos de la tabla 2 se generan los datos de la tabla 3 para finalmente introducirlos en la ecuación (1) y encontrar el volumen de desgaste para ambas condiciones, en seco y con lubricación.

	l (mm)	r (mm)	d (µm)
Seco	5.459	1.209	66.2572
Lubricado	5.5	0.582	17.6022

Tabla 3 Medidas promedio de huellas de desgaste

Reemplazando valores se tiene un volumen de desgaste en condiciones secas de 0.17374 mm^3 y de 0.03399 mm^3 para condiciones lubricadas. Claramente es mucho mayor el desgaste en condiciones secas, siendo 411.15% mayor. Y finalmente la tasa de desgaste se determina mediante la ecuación (2).

$$T_d = \frac{V_d}{F_n s} \quad (1)$$

Donde F_n es la fuerza normal aplicada y s es la distancia total recorrida, esta es a su vez la amplitud de la huella multiplicado por 2 y por el número de ciclos. En este caso los ciclos fueron 3000 y la amplitud de huella es la que se encuentra como 1 en la tabla 3. Por tanto, la tasa de desgaste en condiciones secas es de $10.6088 \times 10^{-7} \frac{\text{mm}^3}{\text{Nmm}}$ y para condiciones lubricadas de $2.06 \times 10^{-7} \frac{\text{mm}^3}{\text{Nmm}}$, respecto de tasa de desgaste las condiciones secas son 414.99% más altas que las condiciones lubricadas. En la figura 17 se aprecia esta comparación.

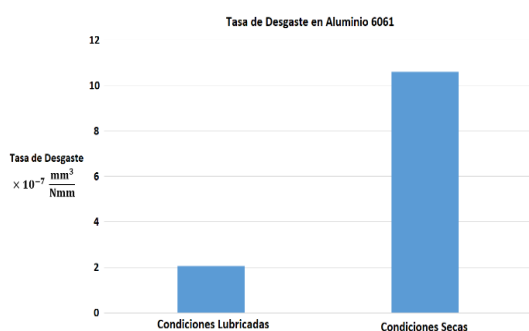


Figura 17 Grafica comparativa de la tasa de desgaste entre condiciones secas y lubricadas

Conclusiones

De acuerdo con los estudios de coeficiente de fricción y el comportamiento de desgaste realizadas a probetas de aluminio 6061 probadas en condiciones secas y en condiciones donde hay aceite lubricante SAE 40, junto con un análisis de las huellas de desgaste utilizando microscopia óptica, las conclusiones son las siguientes:

- Se presentaron cambios en el cf para las probetas de aluminio 6061 en contacto con un pin bola-plano de acero AISI 4140, en condiciones secas el cf es de 0.556, mientras que en condiciones donde hay lubricante de por medio el cf es menor con un 0.2925, la película de aceite lubricante es la causa de que el cf sea menor comparado a las condiciones secas.

- El compartimiento de las tasas de desgaste en las probetas en condiciones secas es mayor en comparación a las probetas que tienen lubricación.

Referencias

- Green, D., Lewis, R., & Dwyer-Joyce, R. (2006). The Wear Effects And Mechanisms of Soot Contaminated Automotive Lubricants. *Journal of Tribology*, Copy of paper "In-Press" with IMechE, Part J.
- Haddad, S. D. (1995). Theoretical Treatment of Piston Motion in I. C. Piston Engine for The Prediction of Piston Slap Excitation. *Mech. Mach. Theory*, 30(2), 253-269.
- Himanshu, K., K.K.S., M., & Sandeep, K. (2014). A Review on Mechanical and Tribological Behaviors of Stir Cast Aluminum Matrix Composites. *Procedia Materials Science*, 6, 1951-1960.
- Hutchings, I. M. (1992). *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Great Britain: Edward Arnold.
- Ishizuki, Y., Sato, F., & Takase, K. (1981). Effect of Cylinder Liner Wear on Oil Consumption in Heavy Duty Diesel Engines. *SAE Technical Paper 810931*.
- Mattson, C. (1995). Measurement of the Oil Film Thickness Between the Cylinder Liner and the Piston Rings in a Heavy duty Directly Injected Diesel Engine. *SAE paper 952469*.
- Rohatgi, P. (1991). Cast aluminum-matrix composites for automotive applications. *J. Met.*, 43, 10-15.
- Tain, T. (1997). Modeling the Performance of the Piston Ring-Pack in Internal Combustion Engines (Ph.D. Thesis, MIT).