

Formación de una capa tribológica en la aleación SAE-783

R. Andresen Eguiluz^a, A. Bravo Bénard^b, M.A. Ramírez Toledo^c,

H. Durán Cortés^d, A. Ortiz Prado, R. Schouwenaars

División de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP 04510, México D.F.

^aroberto.andresen@comunidad.unam.mx, ^bagsterix@yahoo.com.mx,

^cletho21@yahoo.com.mx, ^dalberthus@gmail.com

Resumen

El cambio que sufre la microestructura de las superficies en aleaciones tribológicas dúctiles es fundamental para lograr una reducción en el coeficiente de fricción y el desgaste de componentes tales como cojinetes de deslizamiento. Estos parámetros determinan en gran medida el desempeño y la vida útil de elementos mecánicos en movimiento relativo. Se observa que aún trabajando con cargas bajas y tiempos cortos, existe una deformación plástica severa alcanzando varios micrómetros de profundidad. Esta tribocapa se forma bajo condiciones extremas de operación estableciéndose una estructura metaestable lograda por las altas presiones de contacto.

Abstract

The microstructural change experienced by the surfaces of ductile tribologic alloys is of special interest to achieve a reduction in the friction coefficient and limit the wear of components such as journal bearings. The parameters mentioned above determine the performance and operating life of mechanical elements in relative motion. It can be seen that severe plastic deformation is induced, even when working with small loads and short times, achieving a depth in the micrometer scale. This tribolayer develops under extreme operating conditions, forming a metastable structure, as a result of the high contact pressures achieved.

Palabras clave:

Tribocapa, cojinete de deslizamiento, desgaste, coeficiente de fricción

Key words:

Tribolayer, journal bearing, wear, friction coefficient

Nomenclatura

R_a	rugosidad promedio
ε_{vM}	deformación de von Mises
σ_0	esfuerzo de cedencia del material
σ_{vM}	esfuerzo de von Mises
F	fuerza normal
μ	coeficiente de fricción
t	tiempo de ensayo
σ	esfuerzo normal
ω	velocidad angular
r	radio de curvatura del perno
e	deformación ingenieril
S	esfuerzo ingenieril
E	módulo de Young
ν	coeficiente de Poisson
HB	dureza Brinell
HV	microdureza Vickers
a	área de contacto
T	par
c	constante de contacto
D	diámetro del indentador

Introducción

La aleación SAE 783 (Al-19%Sn-1%Cu en % de peso) es un material metálico compuesto utilizado actualmente para producir cojinetes de deslizamiento para motores de combustión interna. Los cojinetes son elementos que restringen por lo menos un grado de libertad de los seis que posee un cuerpo rígido. Estos tienen la propiedad de ser más blandos que la contraparte tribológica, como lo es un cigüeñal, llevándose la parte de desgaste por la operación, además de operar con coeficientes de fricción bajos y permitir la incrustación de partículas potencialmente abrasivas. Su desarrollo se ha visto limitado a lo largo de la historia Williams (1994), y es momento de que las mejoras se traduzcan en un aumento en la capacidad de carga. Esto permitirá el diseño de motores más eficientes, reduciendo considerablemente los costos tanto energéticos como económicos, en días en que las fuentes de combustible fósil están contadas.

Los materiales sometidos a movimiento relativo bajo condiciones de contacto sufren cambios tanto físicos como mecánicos y químicos en sus superficies, consecuencia de la deformación y adhesión a las que están expuestos los semiplanos del par tribológico. La fricción está íntimamente ligada a los fenómenos de adhesión y desgaste, los cuales deben de ser estudiados

a un nivel molecular para comprender lo sucedido a un nivel macroscópico. Dado que el contacto real entre cuerpos es discreto, las presiones pueden variar de 1 Pa hasta 1 GPa en cuestión de microsegundos, Urbakh, Klafter, Gourdon, Israelachvili (2004). Los cojinetes de deslizamiento para motores de combustión interna fabricados, entre otros materiales compatibles, con la aleación SAE 783 han sido caracterizados de diversas maneras, Torres (2006), Durán (2007), Schouwenaars, Jacobo, Cerrud and Ortiz (2005), Schouwenaars, Torres, Jacobo and Ortiz (2007), Schouwenaars, Jacobo, Ortiz (2007), buscando el equilibrio idóneo entre algunas de las propiedades mecánicas más significativas, como lo son dureza, ductilidad y tenacidad.

En el presente trabajo se estudia la evolución del coeficiente de fricción entre un acero AISI 9840 y la aleación SAE 783 sin lubricación y se relaciona con el desgaste sufrido por la aleación tribológica dúctil, así como con la profundidad del cambio microestructural provocados por la deformación plástica.

Material y procedimiento experimental

Un lingote de la aleación SAE 783 de origen industrial fue utilizado como material de partida. Se cortaron placas regulares las cuales fueron careadas con el propósito de eliminar imperfecciones superficiales y obtener una sección transversal constante, para así reducir los defectos provocados por el proceso de laminación. Con el laminado se obtuvo un material con una deformación de von Mises igual a tres ($\varepsilon_{VM}=3$), con reducciones de 2% para el primer paso, 4% para el segundo, 6%, 8% y 10% para los siguientes tres, y continuando con reducciones del 10% hasta alcanzar la deformación antes mencionada. Se utilizó una laminadora Fenn Amca International con rodillos de 125 milímetros de diámetro a una velocidad de 7.62 m/s. Las láminas fueron recocidas a una temperatura de 300°C durante 10 y 30 minutos Torres (2006) and Schouwenaars, Torres, Jacobo and Ortiz (2007), seguidas de un desbaste con lijás de los números 240 y 600. Se les aplicó, para finalizar, un baño ultrasónico en acetona durante 30 minutos. Los resultados fueron superficies con rugosidades promedio, Ra, menores a 1 μm .

La contraparte tribológica es un perno de acero AISI 9840 (Fe-0.4%C-0.25%Si-0.8%Mn-1%Ni-0.25%Mo en peso) de 20 mm de diámetro y un radio de curvatura, r, de 20 mm en la superficie de contacto. El acabado superficial de los pernos de ensayo es menor a los 3.6 μm , valor reportado en Fontani, Fancini, Longobardi, Sansoni (2001) como Ra de cigüeñales nuevos de automóviles compactos.

Tabla 1. Parámetros controlados

ω [rpm]	σ_0	r [mm]	t [s]	Recosido [min]	ε_{VM}
			300	10	
50	1.25	20	600	30	3
			1200		

Esto se logró con fresado controlado por computadora con cortador de carburo de tungsteno de 1/8 de pulgada de bola y cuatro gavilanes.

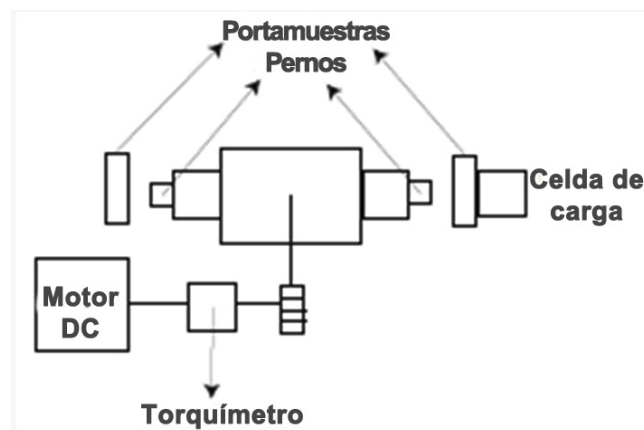


Figura 1. Configuración del tribómetro coaxial.

Los experimentos fueron realizados en un tribómetro coaxial de velocidad y carga regulables, diseñado y construido ex-profeso en el laboratorio de los autores Iniesta, Márquez (2007), instrumentado con una celda de carga y un torquímetro dinámico, monitoreados con un equipo comercial de adquisición de datos. Se registraron datos con una frecuencia de 10 Hz. La velocidad de operación fue de 50 rpm, sugerido en Standart Test Method for Pin Abrasion Testing (2001). La fuerza aplicada corresponde a 1.25 σ_0 , siendo σ_0 el esfuerzo de cedencia de la aleación con deformación ε_{VM} igual a tres para los tratamientos térmicos mostrados en la tabla 1, es decir 62 MPa para el recocido de 10 minutos y 37 MPa para el de 30 minutos. Se obtuvo la magnitud de la fuerza con simulaciones basadas en el Método de Elementos Finitos (MEF) Ramírez (2007). Se realizaron mediciones de microdureza Vickers, HV, con un microdurómetro Microhardness Tester HV-1000 con carga de 9.8N y 20 segundos de retención. Las observaciones se realizaron sin ataque químico en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) Philips XL30 de las superficies desgastadas, así como de las secciones transversales. Las muestras fueron preparadas con técnicas metalográficas tradicionales.

Resultados

Simulación por medio del MEF

La simulación hecha por medio del MEF consistió en modelar una multicapa compuesta por la aleación tribológica blanda y un respaldo de acero. En los cojinetes de deslizamiento es este respaldo el que proporciona la rigidez a la estructura. La contraparte del tribopar se modeló como una superficie analítica idealmente rígida. Se obtuvo la fuerza de reacción del perno para cada uno de los valores de σ_{VM} máximo de la bicapa correspondiente a cada subintervalo, la cual se tomó como base para aplicar la carga durante los ensayos. Los valores de estas simulaciones se muestran en la tabla 2. Cabe resaltar el comportamiento no lineal a partir del esfuerzo de cedencia, el cual define un salto brusco en la fuerza necesaria para poder aumentar en una fracción pequeña la magnitud del esfuerzo aplicado.

Tabla 2. Relación entre fuerza y esfuerzo.

Muestra	σ [MPa]	F [N]
10 min recocido	46.5	1.04
	62	1.7
	77.5	15.54
30 min recocido	27.75	0.66
	37	0.77
	46.25	6.7

Desgaste de las muestras

En la figura 2 se distinguen claramente las dos fases presentes en la aleación SAE 783. El aluminio se aprecia en tonos grises y el estaño en blanco. Esta diferencia es causada por el peso atómico, característico de cada elemento.

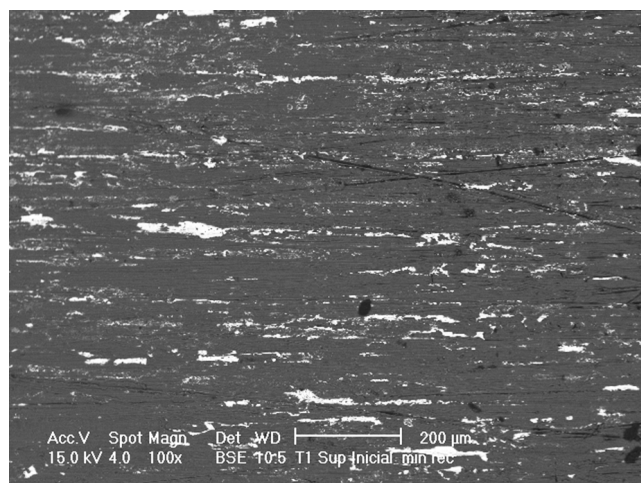


Figura 2. Microestructura superficial de partida, $\varepsilon_{VM}=3$ con 30 minutos de recocido.

En la figura 3 es prácticamente imposible distinguir, con la resolución del equipo utilizado, las fases presentes, a causa de la mezcla mecánica que han sufrido los elementos. Los pernos de ensayo se han escogido como semiplanos de sección esférica con la finalidad de controlar mejor el contacto. Es de dominio amplio que el contacto nominal y el real difieren por mucho Williams (1994), Urbakh, Klafter, Gourdon, Israelachvili (2004), Ludema, Kenneth (1996), además de que la distribución de los esfuerzos no es pareja a lo largo de la superficie dadas las variaciones aleatorias de altura en el relieve. Esto puede ser una de las causas, de las marcas en la pista de deslizamiento, provocando que material de una zona en particular se desprenda prematuramente.

Las figuras 4 y 5 muestran la sección transversal de las capas mezcladas mecánicamente por el contacto y movimiento relativo del perno y la muestra. Se observa que la deformación plástica de la aleación no se limita al espesor de la tribocapa. Los listones de estaño inmediatamente debajo de la zona severamente deformada y mezclada son un claro indicador de que la combinación de esfuerzos a esta profundidad continúa siendo mayor a σ_0 , Schouwenaars, Jacobo, Ortiz (2007).

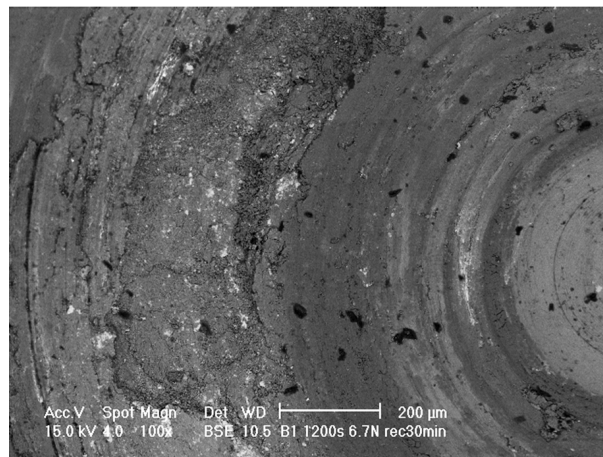


Figura 3. Microestructura superficial final de un ensayo de 1200 segundos para una probeta con 30 minutos de recocido. Sentido horario de giro.

El efecto del tiempo en la tribocapa deja dos huellas claras. La primera se puede apreciar comparando las micrografías mostradas en las muestras de 1200 segundos, Figura 5, la cual sugiere que mientras mayor es el tiempo de ensayo, mejor será la mezcla entre los elementos involucrados. Se aprecia claramente al comparar la homogeneidad de los tonos de las zonas mezcladas de ambas micrografías. La segunda indica que el espesor de la tribocapa también aumenta con un incremento del tiempo de ensayo. Esto se resume en la Figura 7.

La fuerza aplicada influye de manera drástica sobre la cantidad de material que se desprende. En cambio tiene poco efecto en la profundidad u homogeneidad de la tribocapa. Uno de los mecanismos de desgaste es el desprendimiento de partículas de material y su redeposición en algún punto delante en la pista de deslizamiento Ludema, Kenneth (1996). El mecanismo es muy parecido a lo que se describe en procesos de aleación mecánica de polvos en un molino de bolas, Schouwenaars, Jacobo, Cerrud and Ortiz (2005). Esto puede ocurrir mientras la dureza del material lo permita, ya que cada ciclo de deformación endurece a la aleación. Las grietas observadas en la micrografía de la Figura 5 muestran el tamaño de las partículas que han sido redepositadas y que serán desprendidas nuevamente hasta terminar por perderse, causando desgaste.

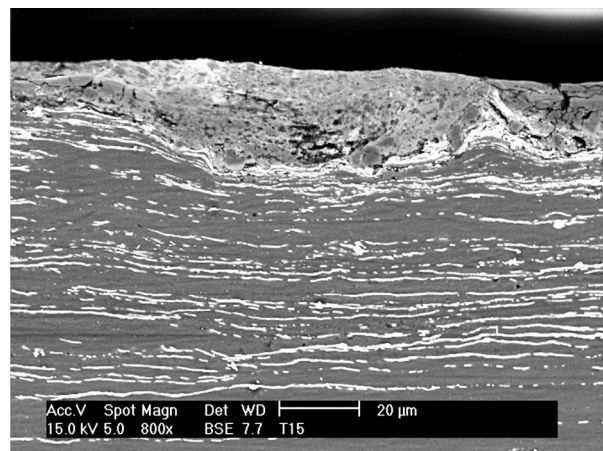


Figura 4. Tribocapa formada después de un ensayo de 600s y 6.7N sobre muestra con recocido de 30min.

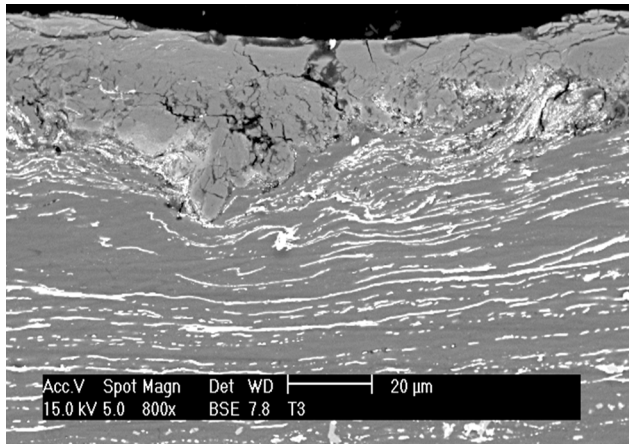


Figura 5. Tribocapa formada después de un ensayo de 1200s y 6.7N sobre muestra con recocido de 30min.

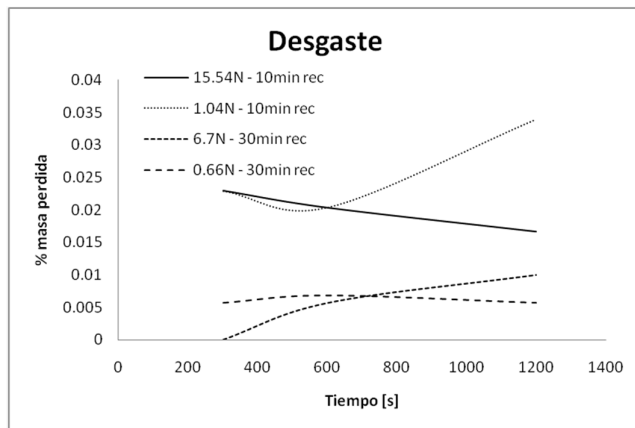


Figura 6. Espesores de las tribocapas formadas durante los distintos ensayos de desgaste y fricción.

Evolución del coeficiente de fricción

La evolución del coeficiente de fricción para cada ensayo se obtuvo a partir de la ecuación (1), desarrollada a detalle en el trabajo [5].

$$\mu = 0.75 \frac{T}{Fa} \quad (1)$$

a es el radio del área de contacto y está en función de la dureza Brinell, HB, dada por la ecuación (2). c es una constante en función de las propiedades elásticas de los materiales involucrados (E y ν), y se obtiene a partir de la ecuación 3. D es el diámetro del indentador y es igual a $2r$, siendo r el radio de curvatura del perno y F la fuerza normal aplicada.

$$a = \frac{\sqrt{D^2 - \left(D - \frac{2f}{HB\pi D}\right)^2}}{2} \quad (2)$$

$$c = \frac{1 + \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 + \nu_2^2}{E_2} \quad (3)$$

El coeficiente de fricción está en función de la carga normal aplicada, del par, de la HB del material más blando y del diámetro del indentador.

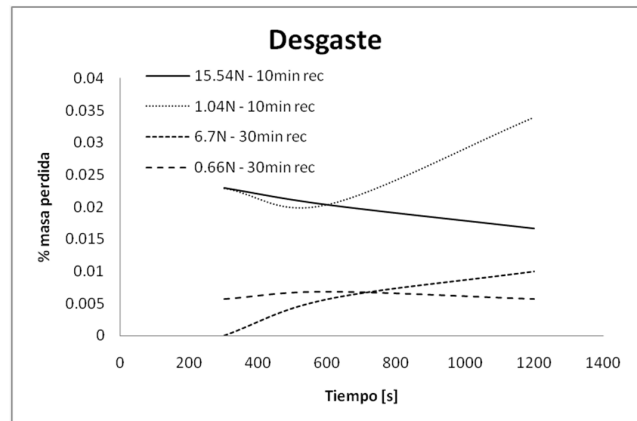


Figura 7. % de masa perdida durante los ensayos de desgaste.

Los valores de la dureza Brinell (500 kg-f y esfera de 10mm, Standard Hardness Conversion Tables for Metals¹. Relationship among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness (2002)) para cada uno de los tratamientos termomecánicos son de 71.63 kg/mm² (HV=79.627 kg/mm²) para un recocido de 10 minutos y de 62.52 kg/mm² (HV=69.041 kg/mm²) para uno de 30 minutos. Estos se obtuvieron a partir de microdureza HV, los cuales fueron convertidos a partir de interpolación con tablas proporcionadas por la norma ASTM Standard Hardness Conversion Tables for Metals¹. Relationship among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness (2002).

En la figura 8 se aprecia la evolución del coeficiente de fricción para las muestras con un recocido de 10 minutos. La fuerza necesaria para alcanzar el $1.25 \sigma_0$ es de 15.54 N. Se observa que para los ensayos de 300 y 1200 segundos el coeficiente de fricción tiende a decrecer, comportamiento esperado para una aleación tribológica. En la figura 9 se muestra el comportamiento del coeficiente de fricción para las muestras con un recocido de 30 minutos. En este caso es necesario aplicar una fuerza de 6.7 N para alcanzar la misma fracción del esfuerzo de cedencia. Los coeficientes de fricción aumentan conforme avanza la prueba, contrario a lo esperado.

Discusión

Los resultados de las simulaciones son un punto de partida para obtener la fuerza necesaria para alcanzar los valores de esfuerzo deseados, ya que los modelos analíticos propuestos por Herz, Williams (1994), son válidos únicamente para contacto elástico y no consideran la bicapa. Esta solu-

ción resulta ser, como es usual, una simplificación del proceso real. Fenómenos como la anisotropía provocada por la laminación, el desprendimiento de material y la redeposición a lo largo de la pista de deslizamiento no son considerados. El endurecimiento por trabajo en frío del material es intrínseco en la curva S-e, la cual se definió como parte del comportamiento elasto-plástico de la aleación tribológica dúctil.

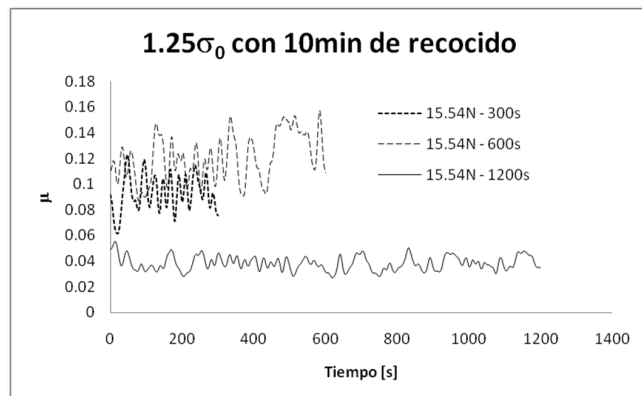


Figura 8. Evolución del coeficiente de fricción, contacto plástico, aleación con 10 minutos de recocido.

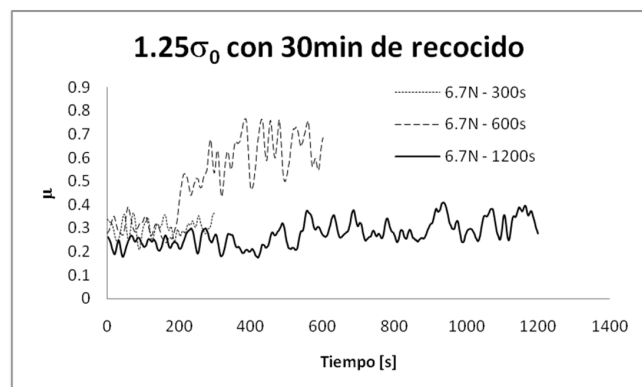


Figura 9. Evolución del coeficiente de fricción, contacto plástico, aleación con 30 minutos de recocido.

La figura 3 es una reiteración de la hipótesis del contacto discreto, ya que las marcas dejadas a lo largo de la pista de deslizamiento lo muestran a través de una distribución heterogénea de material desprendido y redepositado. De no ser así, la tribocapa formada tendría que ser uniforme en toda su extensión.

Las micrografías 4 y 5 muestran claramente grietas subsuperficiales, zonas en las que los esfuerzos cortantes máximos actúan.

La profundidad de la tribocapa formada aumenta con el tiempo de ensayo, pudiendo ser causa de la redeposición cíclica de material durante el contacto del par tribológico. Esto sucede hasta que se alcanza el límite de incurstabilidad de la aleación, consecuencia del endurecimiento por trabajo en frío.

La evolución de los coeficientes de fricción para las gráficas 8 y 9 poseen un rango de valores muy distintos para condi-

ciones similares en términos de σ_0 . Esta diferencia puede deberse al valor de la fuerza aplicada, y a la conservación de la magnitud del par (ver ec. 1). Las líneas de tendencia de la gráfica 8 poseen todas unas pendientes negativas, mientras que para la gráfica 9 no es el caso. La discrepancia en estos resultados es por la resolución del equipo de adquisición de datos, ya que la variación de la señal es significativa.

Conclusiones

En cuanto a los resultados obtenidos por medio del MEF, son sin duda una buena referencia para la parte experimental. Sin embargo, esta simulación puede ser todavía mejorada considerando aspectos simples como la anisotropía de la lámina y efectos térmicos, y eventualmente otros más complejos como el desprendimiento del material.

Salta a la vista el hecho de que el tiempo de ensayo es un factor predominante sobre la fuerza aplicada en la formación de la tribocapa, volviéndose más profunda y más homogénea. También se aprecia el hecho de que la capa tiene su espesor máximo en el centro del área de contacto.

Los coeficientes de fricción se comportaron de manera extraña para el caso de la aleación SAE783 con recocido de 30 minutos. Los valores oscilaron entre 0.6 y 0.18, siendo estos muy elevados para tratarse de una aleación tribológica. Una de las razones por las cuales se obtuvieron estos valores es por la magnitud de la fuerza aplicada. La variación de la amplitud de la señal es grande, representando un porcentaje importante del valor promedio. A esto se le suma el mecanismo de carga al tribómetro coaxial, el cual no permite controlar de manera precisa la carga aplicada. Para la fuerza de 15.54N esto no pareció representar un problema, ya que la variación en la amplitud de la señal representó una fracción mucho menor. Los valores del coeficiente de fricción para esta familia de experimentos estuvieron por debajo del 0.15, con una pendiente negativa, siendo un buen valor y un buen comportamiento para una aleación cuyo fin es el de reducir el coeficiente de fricción entre el par de materiales y permitir la incurstabilidad.

Reconocimientos

Los autores están agradecidos con el apoyo económico brindado por CONACyT durante los estudios de Posgrado de Ciencia e Ingeniería de Materiales en el Instituto de Investigaciones en Materiales, así como con el alumno de ingeniería Richar Salvador Cruz por el apoyo brindado durante la realización de este trabajo y con el taller del IIM-UNAM. Se agradece el apoyo financiero del CONACyT a través del proyecto Ciencias Básicas 61259 y el apoyo a la estancia sabática bajo beca n° 90913, así como el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM a través de los proyectos PAPIIT IN120209 y PAPIIT IN102206.

Referencias

Williams, J.A. Engineering Tribology. Oxford University Press, 1994.

M. Urbakh, J. Klafter, D. Gourdon, J. Israelachvili. The nonlinear nature of friction. *Nature*, 430:525-528, 2004.

Torres, J. A. Optimización del proceso termomecánico de la aleación SAE 783 para cojinetes de deslizamiento. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2006.

D. Fontani, F. Fancini, G. Longobardi, P. Sansoni. Control of crankshaft finish by scattering technique. *Optics and Lasers Engineering*, 35: 387-396, 2001.

O.E. Iniesta García, R. Márquez Sánchez. Diseño y construcción de un tribómetro coaxial. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2007.

Standard Test Method for Pin Abrasion Testing. ASTM Designation: G 132 - 96, 2001.

Ramírez, M.A. Modelado de la respuesta mecánica de multicapas dúctiles durante el ensayo en un tribómetro coaxial. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2009.

Ludema, Kenneth C. Friction, Wear, Lubrication. CRC Press, 1996.

Durán, H.A. Superficie de respuesta para el proceso termomecánico de la aleación SAE 783. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2007.

Standard Hardness Conversion Tables for Metals¹. Relationship among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness. ASTM Designation: E 140 – 97e3, 2002.

R. Schouwenaars, V H. Jacobo, S.M. Cerrud and A. Ortiz: Tribolayer formation as a functionally self-grading process in soft anti-friction alloys. *Materials Science Forum*, Vol. 492-493 (ISSN: 0255-5476), Page 531, 2005.

R. Schouwenaars, J. A. Torres, V. H. Jacobo and A. Ortiz: Tailoring the Mechanical Properties of Al-Sn-alloys for Tribological Applications. *Materials Science Forum* 539-543 (2007) 317-322.

R. Schouwenaars, V.H. Jacobo, A. Ortiz. Microstructural aspects of wear in soft tribological alloys. *Wear*, Volume 263, Issues 1-6, 10 September 2007, Pages 727-735.