

MODELADO DE LA DEFORMACIÓN DE LA SUBSUPERFICIE DE UN PIN DURANTE UN ENSAYO DE DESGASTE

MODELING OF THE PIN SUBSURFACE DEFORMATION IN A WEAR TEST

M.R. Rosenberger ^{1,*}, E. Forlerer ² y C.E. Schvezov ¹

¹ Programa de Materiales, Modelado y Metrología, Fceqyn - UNaM. CONICET.

Félix de Azara 1552, 3300 Posadas, Misiones, Argentina.

² Unidad de Actividad Materiales - GIDAT-GAEN. CNEA.

Av. Gral. Paz 1499, (1650) San Martín. Buenos Aires. Argentina

e-mail: rrmario@fceqyn.unam.edu.ar

Durante el desgaste de un pin de aluminio bajo condiciones no lubricadas se observa gran cantidad de material deformado y acumulado en el borde de salida, formando rebaba. Se ha observado experimentalmente que esta deformación se da principalmente en la subsuperficie. Se estudió la influencia de la temperatura sobre la deformación del pin usando simulaciones por elementos finitos. Se empleó un modelo tridimensional con propiedades dependientes de la temperatura correspondientes a una aleación aluminio A1100. Cargas normales y tangenciales aplicadas sobre el pin fueron simuladas, reproduciendo las sollicitaciones de un equipo pin-on-ring. Se empleó un modelo elasto-plástico considerando pequeñas deformaciones en el rango plástico. Los cálculos se realizaron a diferentes temperaturas simulando diferentes condiciones de generación de calor por fricción. Se observó en los resultados de la simulación una repentina deformación, la rebaba, cuando la carga tangencial alcanza un valor definido como la carga crítica. Esta carga crítica disminuye cuando se incrementa la temperatura. Los resultados del modelo son comparados con resultados experimentales realizados en una aleación de aluminio A1060 reforzado con 15 % de partículas de alúmina. La comparación muestra poca desviación entre las predicciones y los experimentos lo cual puede ser atribuido al valor del coeficiente de fricción adoptado en el modelo.

Palabras Claves: Desgaste, Deformación plástica, Modelado, Método de elemento finito, Efecto de la temperatura.

During the wear of an aluminum pin under dry sliding it is normally observed a lot of material plastically deformed and placed in the ending borders, forming the burr. Experiments indicated that the deformation is concentrated in the subsurface. The influence of the temperature on burr deformation was studied using finite element analysis. A three-dimensional pin was considered in the model, temperature dependent properties corresponding to an A1100 aluminium alloy were assumed. Normal and tangential loads were applied in the circular face of the pin simulating a test performed in a pin-on-ring machine. An elasto-plastic model was employed with small deformation in the plastic range. The simulation was performed applying different temperatures simulating different conditions of heat generation and gradually increasing the tangential load. A sudden deformation, the burr, was observed when the tangential load achieves a well determined value defined as the critical load. This critical load increases when the temperature diminishes. The results of the model are compared with experimental results performed on A1060 aluminum alloys reinforced with 15 % alumina particles that generate a tribolayer. The comparison shows little deviation between predictions and experiments which may be attributed to the friction coefficient value assumed in the model.

Key Word: Wear, Plastic deformation, Modeling, Finite element method, Temperature effect.

I. INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de desgaste se ha observado que la deformación de la subsuperficie es uno de los fenómenos de mayor influencia en la tasa de desgaste. La magnitud de la deformación es mayor en materiales dúctiles y es observada incluso en materiales compuestos con matriz dúctil. Se han sugerido diversos

mecanismos para explicarla, tales como la propagación y crecimiento de fisuras^(1, 2), concentración de tensiones de corte en la subsuperficie⁽³⁾, la coalescencia de poros^(4, 5), y el ablandamiento debido al aumento de temperatura por fricción. En particular la influencia de la temperatura pudo ser observada en el desplazamiento de la carga crítica de transición moderada/severo en

* Contacto: Tel: +54 3752 427491; Fax: +54 3752 425414; email: rrmario@fceqyn.unam.edu.ar

materiales compuestos de matriz de aluminio desgastados contra acero⁽⁶⁾.

Los sistemas tribológicos que presentan una capa tribológica (tribolayer) más dura que el sustrato frecuentemente mejoran la resistencia al desgaste del cuerpo que cubren en dicho sistema. Esto se observa en el sistema aluminio-acero, cuando sobre el aluminio se deposita, durante el desgaste, una capa de material mecánicamente mezclado (MML) que contiene hierro y aluminio⁽⁷⁾. Se ha observado que cuando se genera la MML se tiene un régimen de desgaste moderado. Este régimen está limitado a un intervalo de cargas, donde el extremo superior del intervalo, señalado por la carga crítica, es el punto más relevante ya que lo separa del régimen de desgaste severo. En el régimen severo los esfuerzos debidos al desgaste son muy elevados y el colapso de la subsuperficie hace que la MML pierda el sustento, se fragmente y no se retenga el tiempo necesario para brindar la función de protección frente al desgaste del material original.

Considerando que el colapso de la MML puede ser debida a fallas en el sustrato, se abordó el modelado de desgaste enfocándose en el proceso de deformación plástica de la subsuperficie, producto de los esfuerzos debidos a la fricción y de la disminución de la resistencia del material debida al aumento de la temperatura por la fricción. Se realiza la simulación de la deformación de la subsuperficie sometida a diferentes cargas y diferentes temperaturas con un modelo elasto-plástico, para pequeñas deformaciones, aplicada a una probeta con las propiedades del aluminio y dimensiones reales para ser comparados con la deformación de las probetas reales.

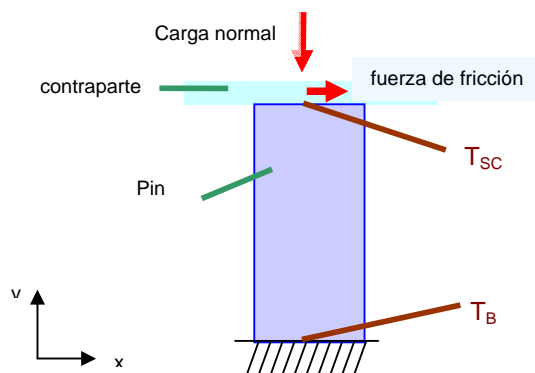


Figura 1. Esquema del sistema físico considerado para el modelo de deformación. T_{SC} : Temperatura de la Superficie de Contacto. T_B : Temperatura de la Base.

El modelo tomado como la suma de procesos quasi-estáticos puede ser considerado como una aproximación al proceso estacionario de desgaste. Planteado de esta manera, la forma más simple de determinar la tasa de desgaste es a través del acortamiento de la probeta. Una ventaja de este método es que no considera a priori una ley de desgaste que relacione volumen desgastado con carga, como es por ejemplo la Ley de Archard⁽⁸⁾, lo que lo diferencia de los modelos usualmente empleados. Por

otro lado, los resultados del acortamiento de la probeta pueden ser verificados directamente de los experimentos.

II. MÉTODOS

Descripción del sistema

El modelo reproduce parcialmente las condiciones de ensayo de un sistema pin-on-ring, donde el pin es una aleación de aluminio y el disco es de acero. Se analiza una instancia inicial del desgaste donde las deformaciones plásticas son pequeñas. Se eligió esta configuración para comparar los resultados con experimentos que se realizaron previamente⁽⁹⁾.

El modelo analiza la deformación del pin en función de las cargas normal y tangencial aplicadas a diferentes temperaturas.

El modelo de deformación

Con el objetivo de determinar la cantidad de deformación plástica en la subsuperficie del pin de aluminio, se consideró un modelo simple mostrado en la Fig. 1. El pin está sujeto a una carga normal a la superficie de contacto y a una fuerza de fricción distribuidas uniformemente en la superficie del pin. El extremo interior del pin está fijo.

TABLA I: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN AA1100 COMO FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA⁽¹⁰⁾

Temp. [°C]	Tensión de fluencia [MPa]	Tensión máxima [MPa]	Elong. [%]
0	35	97	40
24	35	90	40
100	32	70	45
150	29	55	55
205	24	40	65
260	18	28	75
315	14	20	80
370	11	14	85

La temperatura de la superficie de contacto y la temperatura de la base del pin son impuestas para reproducir los valores de temperatura alcanzada por fricción.

El campo de deformaciones elasto-plástica es calculado usando ABAQUS Student 6.4 considerando que el material del pin es una aleación de aluminio AA1100-TO.

La curva tensión vs. deformación de la aleación se simplifica a un modelo lineal con dos pendientes, la primera correspondiente a la región elástica, hasta la tensión de fluencia y la segunda correspondiente a la región plástica desde la tensión de fluencia hasta la tensión máxima. Los datos de tensión de fluencia, tensión máxima y elongación necesarios para hacer las simulaciones de deformación se muestran en la Tabla 1

como función de la temperatura y corresponden a AA1100-T0.

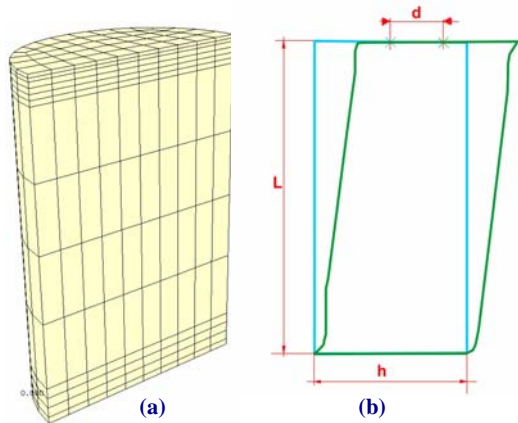


Figura 2. (a) vista del dominio tridimensional discretizado con hexaedros; (b) en verde esquema de un pin deformado, en azul se representa el pin sin deformar. la dimensión d es el desplazamiento de la superficie de contacto, $h = 6,35$ mm, $L = 10$ mm

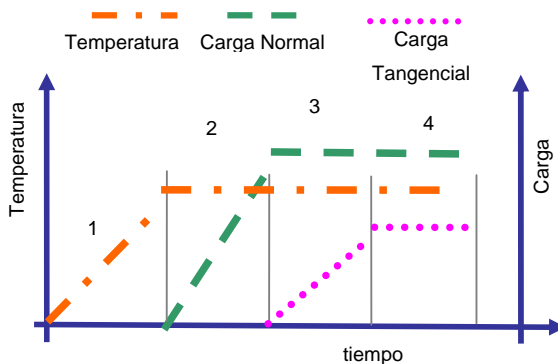


Figura 3. Secuencia de aplicación de la carga y la temperatura en el modelo

El dominio correspondiente al pin de aluminio fue discretizado como se muestra en la Fig. 2. El diámetro del pin es 6,35 mm y su altura 10 mm, ambas son las mismas dimensiones del pin utilizado en los experimentos. Utilizando la simetría del problema se puede simplificar y modelar medio pin tal como se muestra en la Fig. 2.a, empleando un modelo tridimensional.

El modelo es calculado para un amplio rango de temperaturas impuestas en la superficie de contacto: 24, 150, 200, 250, 300 y 350 °C. La temperatura de la base del pin es 20 °C menor que la temperatura de la superficie de contacto. Este valor de diferencia de temperatura entre la superficie de contacto y la base del pin surge de las mediciones y modelos realizados⁽¹¹⁾ y que resulta quasi-independiente de la temperatura absoluta. Los valores de cargas aplicadas en las simulaciones comprendieron desde 32 hasta 270 N. La

secuencia seguida para aplicar las condiciones de contorno, en cada simulación, es la siguiente: primero se imponen las temperaturas en ambos extremos del pin, una vez alcanzado el equilibrio térmico se aplica la carga normal y luego la carga tangencial, esto se esquematiza en la Fig. 3.

Experimentos de desgaste

Ensayos de desgaste fueron realizados en un equipo pin-on-ring en el cual la contraparte es un disco de acero al carbono con dureza de 272 HB, y cargas aplicadas comprendidas entre 4,9 y 115,9 N a una velocidad constante de 2,7 m/s. La tasa de desgaste es determinada por el acortamiento del pin.

Además, se midió la temperatura utilizando una termocupla colocada a 6 mm de la superficie de contacto del pin.

III. RESULTADOS

Resultados del modelo de deformación

Los resultados del modelo son presentados como desplazamientos “ d ” de un elemento en la superficie de contacto, como se indica en la Fig. 2.b, en función de la carga aplicada y para un rango de temperaturas de la superficie de contacto entre 20 y 350 °C.

El desplazamiento “ d ” como función de la carga aplicada, calculado a 6 temperaturas de la superficie de contacto diferentes se muestra en la Fig. 4. Se observa que todas las curvas siguen un patrón sigmoide, en el cual hay un comportamiento quasi-lineal a bajas cargas y un cambio repentino en la pendiente a una carga bien definida, llamada carga crítica, en la cual el desplazamiento se incrementa rápidamente con un mínimo incremento en la carga aplicada. El valor de la carga crítica disminuye con la temperatura reforzando el punto de vista de un comportamiento previo elástico. Esta carga crítica se grafica en función de la temperatura en la Fig. 5.

Con respecto a la primera sección, a bajas cargas, se observa que la pendiente se incrementa con la temperatura. Esta parte de la deformación puede ser asociada a la deformación elástica de la flexión del pin. El comportamiento quasi-lineal (elástico) continua hasta que se alcanza la carga crítica.

El campo de deformación obtenido con el modelo a cargas menores que la crítica se muestran en la Fig. 6.a y b, para una carga aplicada de 132 N a una temperatura de 200 °C. La Fig. 6.a y 6.b muestran el borde de entrada y de salida del pin, respectivamente. En primer lugar, se observa que en ambos casos el pin mantiene su forma cilíndrica, en segundo lugar que la deformación está distribuida en toda la superficie, aunque, en los bordes de salida y entrada se alcanzan valores más elevados que en el centro de la superficie de contacto, con valores picos de 0,193 mm y cero respectivamente.

Un campo de deformación completamente diferente se obtuvo para cargas superiores a la carga crítica, como puede ser observado en la Fig. 7. La Fig. 7.a y 7.b corresponden a la entrada y la salida del pin, respectivamente, para una carga de 144 N y una

temperatura de 200 °C. En este caso la deformación general no está uniformemente distribuida como en la Fig. 6 y se concentra en los bordes de entrada y salida, con un valor pico de 1,365 mm, con un gran desplazamiento del volumen conduciendo a la formación de rebaba en el borde de salida. La formación de rebaba fue observada, a todas las temperaturas para las cargas superiores a la carga crítica e inmediatamente después que el desplazamiento del centro de la

condiciones no se alcanzan el pin desgastado mantendrá su forma cilíndrica como se muestra en la Fig. 8.b, donde se muestra una probeta desgastada una distancia de 100 m con una carga aplicada de 32,4 N. A pesar de la diferencia de materiales empleado en los experimentos y el modelo ambos resultados muestran un acuerdo cualitativo.

Cuando la carga crítica es calculada y graficada como una función de la temperatura, ver la Fig. 5, se

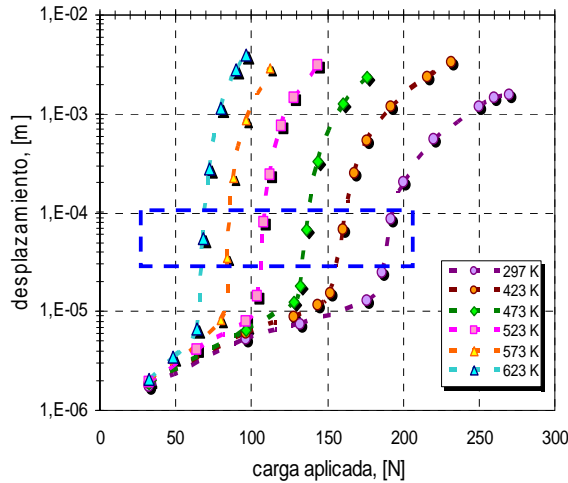


Figura 4. Desplazamiento de la cara superior versus la carga aplicada, valores agrupados por la temperatura impuesta en la cara superior de la probeta. El recuadro de líneas de trazo encierra las simulaciones que mostraron gran deformación formando una rebaba.

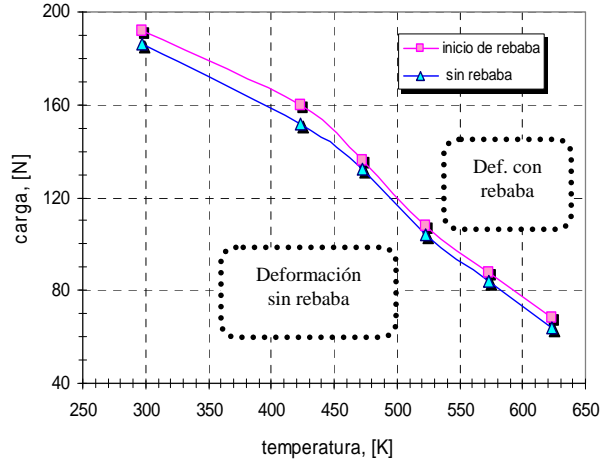


Figura 5. Cargas críticas en función de la temperatura. La curva separa la región en una zona con rebaba y otra sin rebaba..

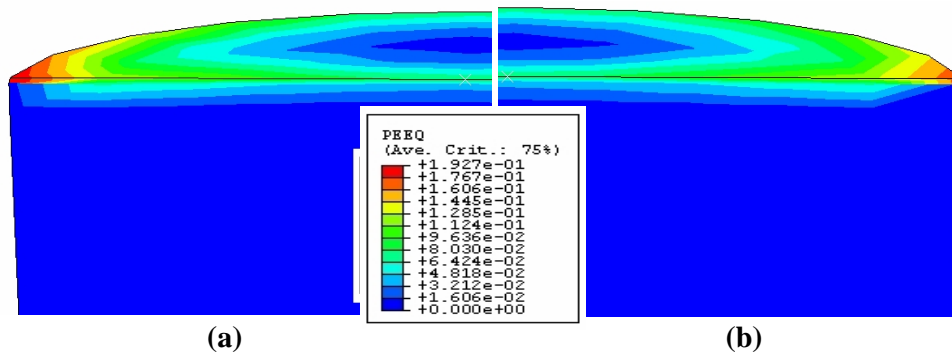


Figura 6. Probeta deformada en la condición de máxima carga aplicada igual a 132 N, a una temperatura de 200 °C. No se observa rebaba en el borde de salida; (a) borde de entrada (b) borde de salida

superficie de contacto alcanza un valor de $3,0 \times 10^{-5}$ m, una rebaba aún más pronunciada se muestra en la Fig. 8.a en una aleación de aluminio A1060 reforzado con 15% en volumen de partículas de Al_2O_3 desgastadas una distancia de 20 m a una carga normal aplicada de 91,2N. Rebabas similares se observa frecuentemente y sus dimensiones dependen de la duración total del ensayo de desgaste^(7, 9, 12), de estos resultados se ve que a cargas mayores que la carga crítica el desplazamiento de la superficie de contacto produce rebaba. Si estas

separa el campo en dos regiones, en una de las cuales el proceso de desgaste produce rebaba cuando la carga es superior a la carga crítica y en otra no se forma rebaba cuando la carga es menor a la carga crítica.

El modelo fue utilizado para calcular la reducción de longitud de la muestra debido a la deformación de la subsuperficie producida a diferentes cargas y diferentes temperaturas, estos resultados se muestran en la Fig. 9. El acortamiento de la probeta se calculó para un desplazamiento de la contraparte, el disco de acero en

los experimentos, igual a 1 metro, por lo tanto el acortamiento se expresa en milímetros acortados de la probeta sobre los metros de distancia recorrida. Se observa que a medida que aumenta la carga, a una

misma temperatura, la reducción en longitud se incrementa paulatinamente hasta alcanzar la carga crítica, luego el incremento aumenta repentinamente.

Se observa que el efecto es más catastrófico a cargas

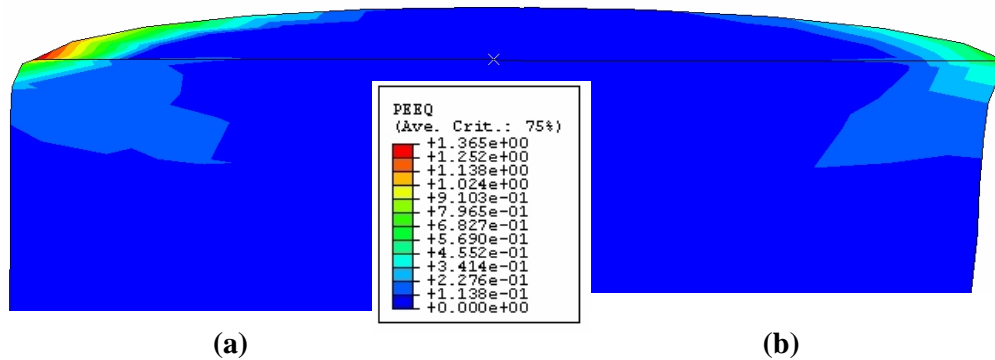


Figura 7. Probeta deformada en la condición de máxima carga aplicada igual a 144 N, a una temperatura de 200 °C. Se observa rebaba en el borde de salida. (a) borde de entrada (b) borde de salida

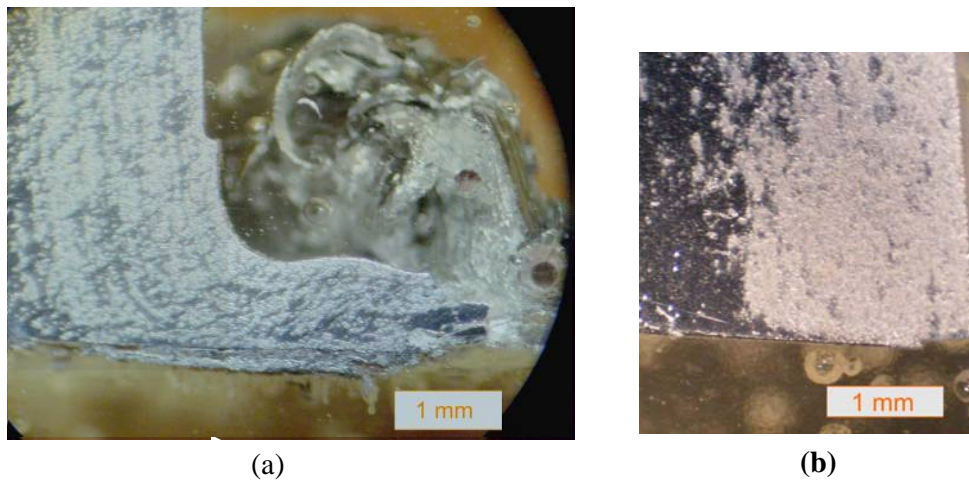


Figura 8. Bordes de salida de probetas de Al₂O₃/15p (a) borde con rebaba desgastada con 92,4 N hasta 20 m; y (b) borde sin rebaba desgastada con 32,4 N hasta 100 m. La flecha señala la dirección de deslizamiento

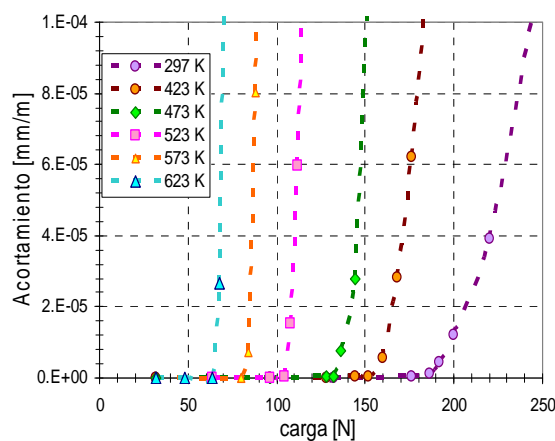


Figura 9. Acortamiento calculado debidas a la deformación plástica de la subsuperficie, como función de la carga aplicada; para diferentes temperaturas.

más altas. Sin embargo, los resultados del modelo son obtenidos para una temperatura constante en la superficie de contacto, el cual no es el caso en un experimento real, ya que, en realidad, cuando la carga se incrementa la temperatura también se incrementa. La Fig. 10 muestra un comportamiento real de la temperatura como una función de la carga aplicada medida a 6 mm de la superficie de contacto.

La tasa de desgaste, que relaciona el acortamiento de la probeta, para los experimentos mostrados en la Fig. 10, se muestra en la Fig. 11; allí se observa que la tasa de desgaste es muy baja hasta que una carga crítica, situada entre 70 y 80 N, es alcanzada y, a partir de la cual, se observa un súbito incremento en la tasa de desgaste. Después de los 80 N la probeta experimenta lo que se conoce como un régimen de desgaste severo. En este punto es posible combinar los resultados del modelo con los experimentos. Se sabe de los datos

experimentales de la Fig. 10 y la Fig. 11 que la temperatura a la que se produce la transición es de aprox. 150 °C, en el punto de medición. Por lo tanto, para la comparación se toma la curva del modelo a 150°C. La carga aplicada en el modelo que inicia la deformación con rebaba a 150 °C se puede correlacionar con el valor experimental según el siguiente modelo:

$$F_{\text{Tangencial(modelo)}} = \text{coef.fricc.} * F_{\text{Normal(exp.)}} \quad (1)$$

$$152 \text{ N} = 1,9 * 80 \text{ N}$$

Este valor esta de acuerdo a los valores reportados en la literatura, donde se ha encontrado valores de coeficiente de fricción comprendidos entre 0,4 y 1,0 para régimen moderado y valores entre 1,1 y 1,9 para régimen severo ⁽¹³⁾. En la Figura 12.a, se muestra la comparación del modelo con un coeficiente de fricción igual a 1,9 frente a los resultados experimentales. Se puede ver el ajuste de ambas curvas en las cercanías de

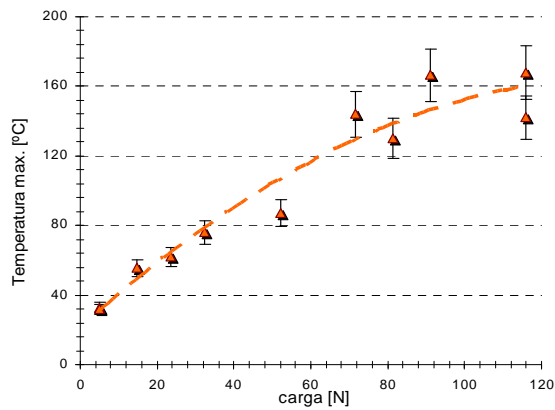


Figura 10. Temperatura máxima alcanzada en los experimentos de desgaste en un punto situado a 6 mm de la superficie de contacto.

la carga crítica, debido a la imposición de un coeficiente de fricción igual a 1,9 pero se observa que el modelo pasa a la izquierda de los valores experimentales, es decir indica unos valores de tasa de desgaste mayores que los experimentos a la misma carga.

Por otro lado, pueden ajustarse los resultados del modelo para superponer la porción superior de las curvas, en ese caso se obtiene un valor de coeficiente de fricción igual a 1,55. Cabe destacar que la carga crítica predicha del modelo es superior a la observada experimentalmente.

Estos resultados pueden indicar que hay un cambio en el coeficiente de fricción con el cambio de régimen entre los valores del coeficiente de fricción considerados, fenómeno que si es incluido con el modelo de deformación plástica acoplado con transferencia de calor, representará cualitativamente y cuantitativamente el acortamiento de un pin de aluminio sometido al desgaste, destacándose el cambio abrupto

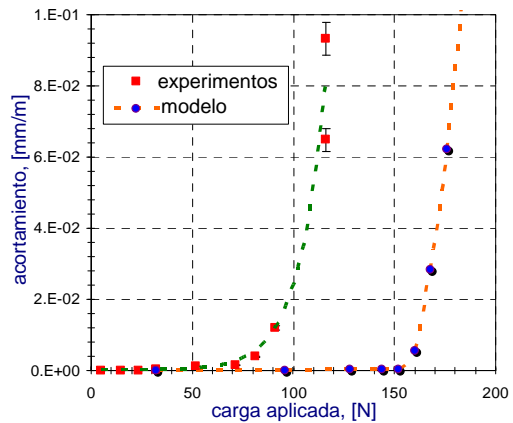


Figura 11. Comparación entre acortamiento del modelo a 150 °C, y datos experimentales.

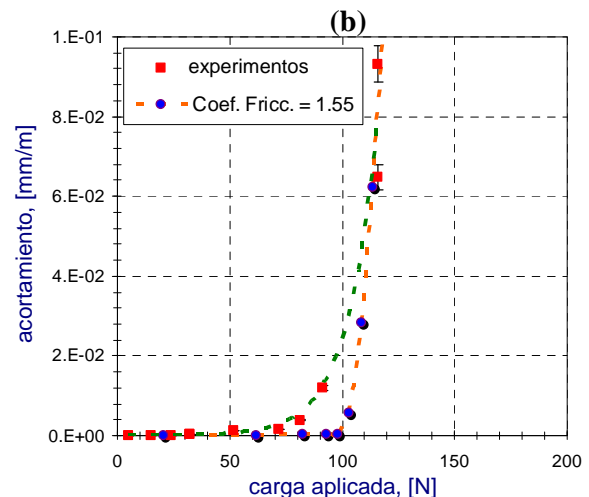
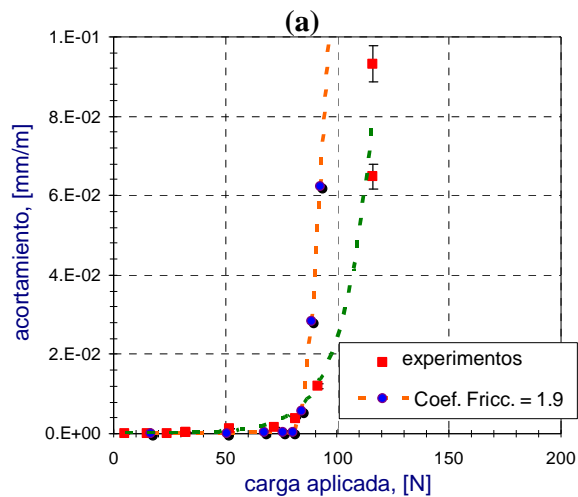


Figura 12. Comparación entre acortamiento del modelo a 150 °C con dos valores propuestos de coeficiente de fricción, (a) coef. fricc.=1,9 y (b) coef. fricc.=1,55; contra los datos experimentales.

de comportamiento que distingue el régimen moderado del régimen severo.

Respecto a los valores de los coeficientes de fricción, ambos valores están en el rango informado en la literatura ⁽¹²⁾. Un modelo cuantitativo más preciso debería tener en cuenta la oscilación, normalmente observada, del coeficiente de fricción, así como, el cambio de acuerdo al régimen de desgaste mencionado.

IV. CONCLUSIONES

Se ha propuesto un modelo de deformación plástica con transferencia de calor para modelar el desgaste por acortamiento de una probeta de aluminio. Se ha encontrado un ajuste cualitativo entre el modelo usando propiedades de una aleación de aluminio A1100 y experimentos realizados en una aleación de aluminio Al060 reforzado con partículas de alúmina con una proporción de 15% en volumen. Además, se realizó un ajuste cuantitativo asumiendo un coeficiente de fricción constante, donde se presentaron dos criterios: uno ajustando según el valor de la carga crítica, y el otro ajustando al valor del acortamiento en el régimen severo.

Ajustando por la carga crítica se obtiene un valor de 1,9 para el coeficiente de fricción. Ajustando por el acortamiento en el régimen severo se obtiene 1,55. Ambos valores están en el rango de valores de coeficiente de fricción citado en la literatura para el sistema aluminio-hierro.

Referencias

- 1 - Rosenfield, A.R. *Wear*, **116**, 319-328 (1987)
- 2 - Rigney D.A., Chen L.H., Naylor G.S., Rosenfield A.R., *Wear*, **100**, 195-219 (1984)
- 3 - Kuo S.M., Rigney D.A., *Materials Science Engineering. A*, **157**, 131-143 (1992).
- 4 - Venkataraman B., Sundararajan G., *Acta Materialia*, **44(2)**, 461-473 (1996)
- 5 - Rigney D.A., *Wear*, **245**, 1-9 (2000)
- 6 - J. Zhang, A.T. Alpas, *Materials Science Engineering A*, **161**, 273-284 (1993)
- 7 - Rosenberger M.R., Forlerer E., Schvezov C.E., *Wear*, **259(1-6)**, 590-601 (2005)
- 8 - Rabinowicz E., "Friction and Wear of Materials", John Wiley & Sons Inc., 2nd edition, New York (1995).
- 9 - Rosenberger M.R., Forlerer E., Schvezov C.E., *Wear* (2008) (<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.06.007>)
- 10 - Properties of Wrought Aluminum Alloys, ASM Handbook Volume -02, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials". TMS. Ohio. (1995)
- 11 - Rosenberger, M.R., "Desgaste de Materiales Compuestos de Matriz de Aluminio bajo regímenes que inducen Mezclado Mecánico con la Contraparte", Tesis de doctorado. Univ. De General San Martín. San Martín. Argentina. (2009)
- 12 - Kwok J.K.M., Li S.C., *Composites Science and Technology*, **59**, 55-63 (1999)
- 13 - Yu S.Y., Ishii H., Tohgo K., Cho Y.T., Diao D., *Wear*, **213**, 21-28 (1997)