



ESTUDIO DEL CONTACTO ENTRE UN PENETRADOR RÍGIDO Y UNA PROBETA DE ALUMINIO CONSIDERANDO CARGA NORMAL Y DESPLAZAMIENTO TANGENCIAL USANDO EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

LUIS I. NEGRÍN H.¹, ROBERTO M. SOUZA², EDUARDO A. PÉREZ R.³

¹Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas,
Facultad de Ing. Mecánica

Carretera a Camajuaní km 5, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, CP 54830

²Universidad de Sao Paulo,
Sao Paulo, Brasil

³Universidad de Ibagué,
Colombia

(Recibido 5 de septiembre de 2006, para publicación 20 de noviembre de 2007)

Resumen – El objetivo de este trabajo es estudiar los campos de tensiones y deformaciones plásticas obtenidos como consecuencia de la aplicación de carga normal al mismo tiempo que se aplica desplazamiento tangencial de un penetrador rígido sobre una probeta de aluminio. La simulación por el Método de los Elementos Finitos (MEF), utilizando el software ABAQUS, fue usado para evaluar las tensiones y los campos de deformaciones. El fenómeno fue simulado con una malla bidimensional, asumiendo el estado plano de deformaciones. La carga normal fue aumentada progresivamente (0 – 50 N) en función del desplazamiento. Los resultados fueron obtenidos para diferentes valores del coeficiente de fricción entre el indentador rígido y el aluminio de comportamiento elasto-plástico. Los resultados obtenidos permiten la correlación entre los esfuerzos de contacto y el comportamiento elasto-plástico de materiales sometidos a ciertos tipos de ensayos de desgaste. Se verificaron algunos resultados de la literatura, como, por ejemplo, el aumento de las tensiones y deformaciones con el aumento del coeficiente de fricción definido en el contacto. Según el criterio de los autores, en el proceso se reproduce el fenómeno *stick-slip*, lo que hace más realista la simulación y permite profundizar en su estudio.

Palabras clave – Desgaste, tensiones de contacto, deformación plástica, simulación.

1. INTRODUCCIÓN

El desgaste abrasivo es un fenómeno que ocurre con mucha frecuencia en los elementos de máquinas. El mismo aparece cuando partículas abrasivas de alta dureza entran en contacto con las superficies de las piezas y deforman o arrancan material de las mismas bajo la acción de determinadas fuerzas normales y tangenciales [1]. Este tipo de desgaste está directamente relacionado con las tensiones de contacto y la fricción provocadas por estas partículas. Usualmente la superficie de los elementos de máquinas tiene una menor dureza que estas partículas que entran en contacto con ellas durante su explotación, lo que provoca un severo desgaste y su salida de servicio. Con el objetivo de reducir este desgaste se pueden realizar diversos tratamientos superficiales, entre los que se encuentra el recubrimiento con filmes delgados con alta resistencia al desgaste. En particular, las técnicas de deposición química a vapor (CVD) y la deposición física a vapor (PVD) han hecho posible el recubrimiento con filmes de espesores del orden de 1 μm con materiales como TiN, TiC, Al₂O₃ y más recientemente diamante como carbón (DLC) y MoS₂ [2].

El tamaño y la forma de las partículas abrasivas tienen gran influencia en las tensiones que provocan al entrar en contacto con las piezas. Las partículas con un tamaño entre 5 y 500 μm son las responsables de producir el mayor desgaste abrasivo y erosivo, aunque para el proceso de pulido pueden usarse partículas con dimensiones menores a 1 μm , también este fenómeno puede ser provocado por cuerpos duros con

decenas e incluso con centenas de milímetros [1]. Usualmente para aplicaciones prácticas las mismas tienen un radio entre 10 y 200 μm [3].

El Método de los Elementos Finitos (MEF) ha sido muy utilizado para la simulación de procesos en los que se produce la deformación plástica de metales. Los procesos de forja en caliente y en frío [4,5], el laminado [6-9], la obtención de acabados superficiales de calidad mediante la deformación plástica de la superficie [10], el comportamiento de determinadas propiedades de recubrimientos con filmes delgados en el proceso de indentación [11,12] y de indentación y riscamiento simultáneo [2,13], así como el desgaste abrasivo producto del arranque de partículas [14] o por deformación plástica [3] de la superficie, han sido modelados mediante el MEF.

B. Rose hace un estudio del desgaste en el mecanismo de soporte de un radio telescopio usando el MEF y se logra simular el *stick-slip*, siendo éste el único documento de los consultados que se refiere a este fenómeno en la simulación del contacto entre dos elementos [15].

Anantha Ram simula un substrato bajo la acción de cargas normales y tangenciales actuando de forma estática y se obtienen las tensiones de contacto que son comparadas con las obtenidas al aplicar la teoría de Hertz [3].

Para una mejor comprensión del desgaste abrasivo es importante simular este proceso teniendo en cuenta el desplazamiento de la partícula de alta dureza sobre la superficie y analizar la deformación plástica que se produce, así como la influencia de las tensiones tangenciales y el coeficiente de fricción.

En el presente estudio se fija el radio de la partícula a 200 μm y se varía el coeficiente de fricción, analizando su influencia en el comportamiento de las tensiones normales, tangenciales y las deformaciones plásticas.

La relación entre las tensiones de cortante y el coeficiente de fricción en el proceso de modelación de las deformaciones plásticas utilizando el MEF está dada por la siguiente expresión [5-9]:

$$\tau_f = \frac{m_1 \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

donde:

- τ_f – tensión tangencial
- m_1 – coeficiente de fricción
- σ_s – tensión de fluencia

M. Vecchio hace un profundo análisis teórico sobre la modelación del proceso de laminación utilizando el MEF [16] y se profundiza en la obtención de dicha expresión (1).

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El modelo de elementos finitos, para la simulación del proceso de indentación y movimiento transversal, de un penetrador de diamante sobre un substrato de un material con comportamiento elastoplástico (Fig. 1), fue desarrollado usando el software ABAQUS versión 6.5.

Para el estudio de convergencia fueron hechos 3 modelos (Tabla 1) y se determinó las tensiones máximas equivalentes (Mises) en cada paso. El error del modelo 2 en relación al 1 y al 3 no fue mayor que el 2% en ninguno de los pasos, siendo adecuado para desarrollar la simulación (Fig. 2). El mismo consta de 16660 elementos planos de 4 nodos para el estado plano de deformaciones y de 10970 nodos.

El penetrador tiene un radio de 200 μm , similar al radio de la punta del penetrador Rockwell C, y es considerado en los cálculos como rígido. Para el substrato se utilizaron las propiedades de la aleación de aluminio AA 6061-T6 con comportamiento elasto-plástico. Los valores de las propiedades elásticas de la aleación (módulo de elasticidad $E = 68.9$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0.33$) fueron obtenidos de la literatura [18]. Para definir el comportamiento plástico fueron usados datos de curvas tensión-deformación [19]. La tensión de fluencia ($\sigma_y = 295$ MPa) fue directamente obtenida durante el ensayo a tracción de probetas hechas de ese material.

Para el proceso de simulación se aplicó una carga de 50 N de forma lineal durante el desplazamiento del penetrador (Fig. 3).

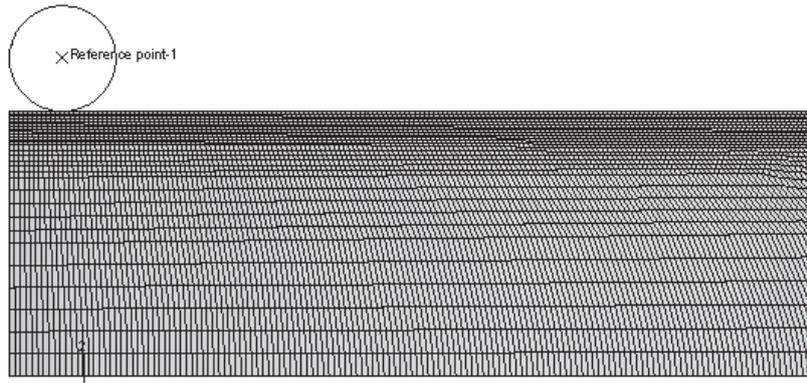


Fig. 1. Modelo de elementos finitos.

Tabla 1. Modelos analizados.

Modelo	Elementos	Nodos
1	8830	5814
2	16660	10970
3	22120	14566

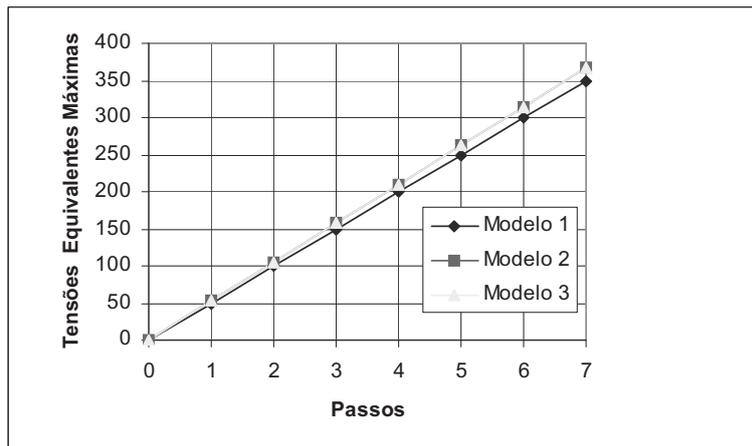


Fig. 2. Tensiones equivalentes máximas de los tres modelos en los diferentes pasos de la simulación.

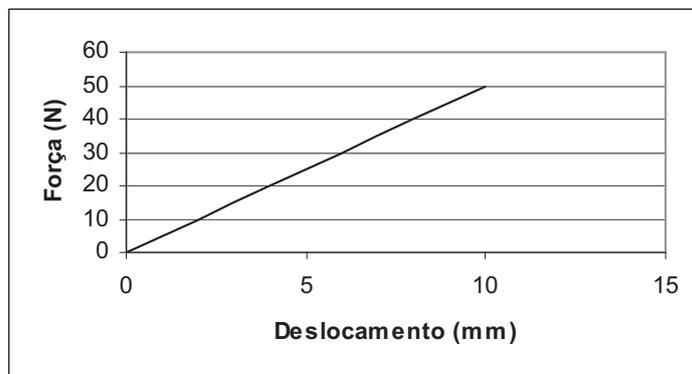


Fig. 3. Modo de aplicación de la carga.

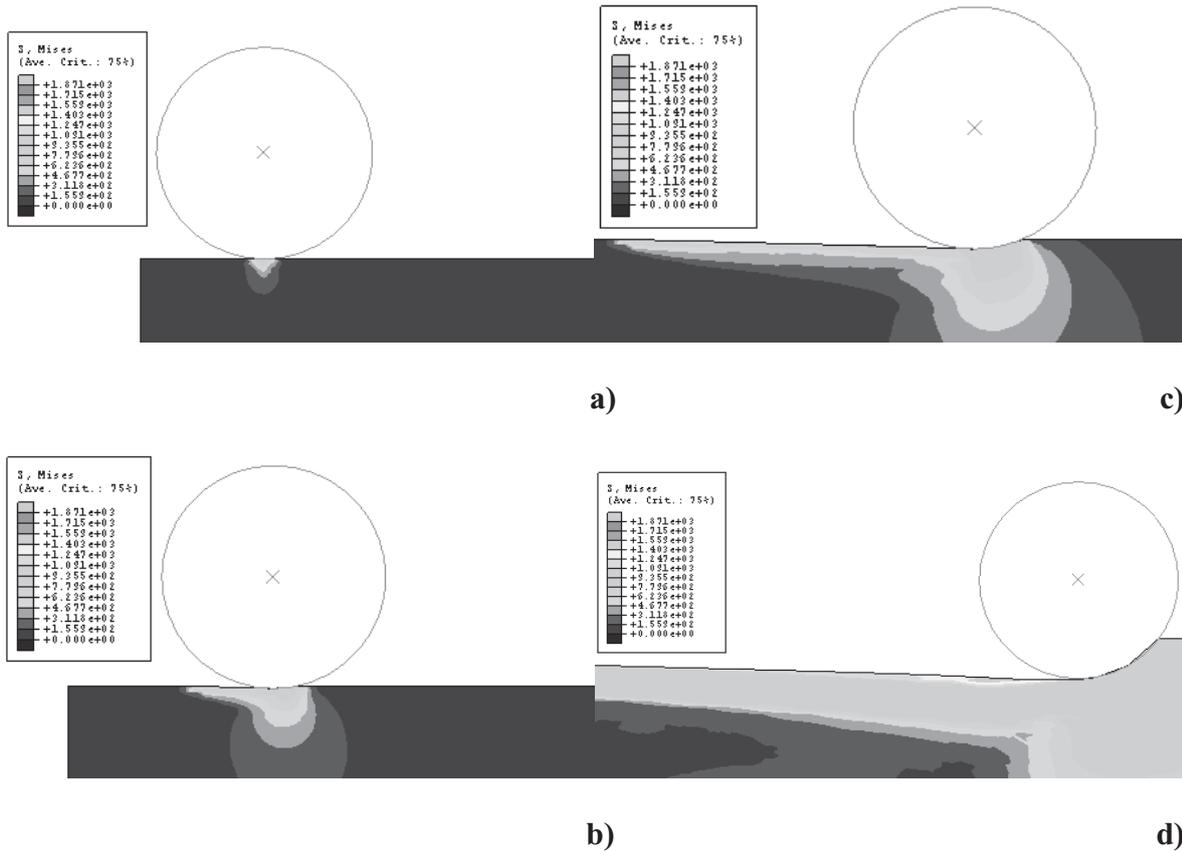


Fig. 4. Secuencia del movimiento del penetrador sobre la probeta.

En este proceso no fue considerado el efecto de la velocidad de desplazamiento de penetrador, el sustrato se considera fijo en los laterales y en la parte inferior y la carga es aplicada en el punto de referencia del penetrador (Fig.1).

El contacto es modelado definiendo dos zonas, una considerada como *master* (en este caso el penetrador) y la otra como *slave* (sustrato). La simulación de movimiento relativo entre estas superficies es lo que define el proceso de contacto. Se simulan tres casos con diferentes coeficientes de fricción (0, 0.4 y 0.7) y se analiza el efecto de este parámetro en las tensiones resultantes.

Los resultados son referidos y analizados principalmente a las tensiones equivalentes obtenidas por la teoría de Von Mises. Este criterio de falla es generalmente utilizado para modelar y entender la deformación y la falla de materiales con comportamiento dúctil [2].

3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la Fig. 4 se muestran pasos de la secuencia del movimiento del penetrador y se puede apreciar el incremento de las tensiones equivalentes a medida que aumenta la carga y el desplazamiento. En este modelo es considerado un coeficiente de fricción de 0.4.

Como se puede observar, la aplicación del movimiento tangencial tiene gran influencia en el valor y en la distribución de las tensiones que aparecen durante el proceso de penetración y en la magnitud de las tensiones residuales producto del proceso de deformación plástica.

Para los análisis que se realizan se toma como referencia el punto de mayores tensiones (normales o tangenciales) en cada paso de la simulación, que se encuentra en la zona del material comprimido debajo del penetrador (Fig. 5).

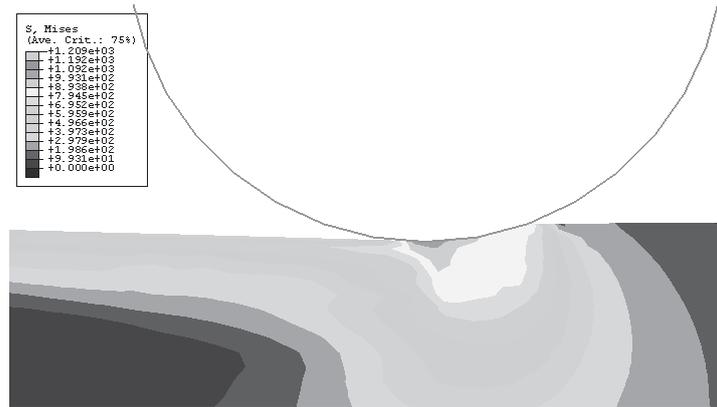


Fig. 5. Zona de tensiones equivalentes máximas.

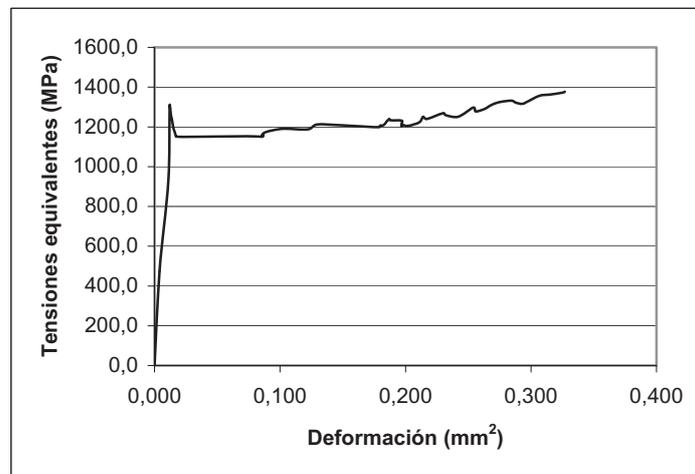


Fig. 6. Gráfico de tensiones equivalentes vs. deformación.

El desgaste en los metales ocurre predominantemente durante el régimen elasto-plástico o totalmente plástico [20] y el valor de la presión de contacto (p) para ambos casos se define como:

- a) - $1.8 \tau_y \leq p \leq 5.2 \tau_y$ rango de la presión de contacto (p) para el régimen elasto-plástico.
- b) - $5.2 \tau_y \leq p$ rango de la presión de contacto (p) para el régimen plástico.

Donde τ_y = tensión tangencial de fluencia.

En la simulación se ha utilizado el aluminio AA 6061-T6 que tiene $\tau_y \approx 177$ MPa y según las expresiones anteriores para que el régimen sea elasto-plástico:

$$318.6 \text{ MPa} \leq p \leq 920.4 \text{ MPa}$$

Como se aprecia en la Fig. 7. la presión calculada en el software ABAQUS se mantiene dentro de este rango y estos valores de presión provocan tensiones tangenciales que tienen un comportamiento como se aprecia en la Fig. 8.

Un comportamiento similar tienen las tensiones equivalentes, llegando a valores que se encuentran dentro del régimen plástico (Fig. 9.)

Como se puede apreciar en las Figuras 8 y 9 el valor de las tensiones máximas tienen oscilaciones, estando esto motivado, según el criterio de los autores, producto del efecto del *stick-slip*. Este comportamiento coincide con lo planteado en la bibliografía [22], donde se hace un profundo análisis del fenómeno *stick-slip* en los procesos de fricción. Al comparar los valores de las tensiones equivalentes obtenidas en

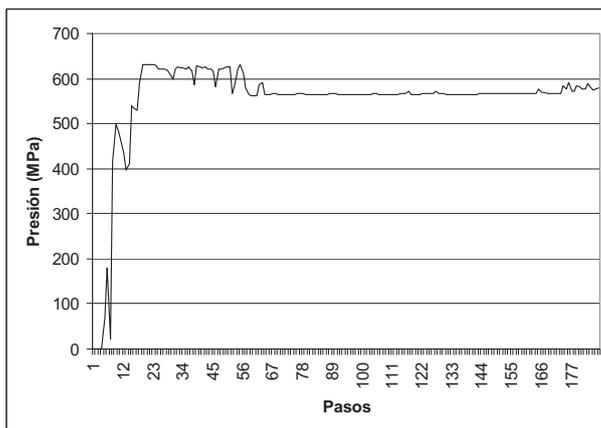


Fig.7. Gráfico de presión en el proceso de indentación simulado en el ABAQUS.

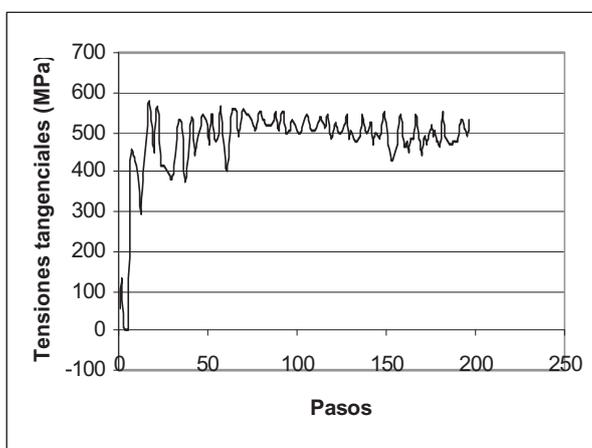


Fig. 8. Comportamiento de las tensiones tangenciales máximas para el modelo con coeficiente de fricción de 0.4.

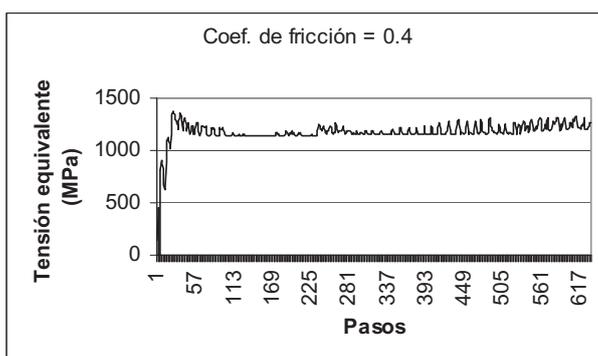


Fig. 9. Gráfico de tensiones equivalentes máximas vs desplazamiento del indentador con coeficiente de fricción de 0.4.

las simulaciones con diferentes coeficientes de fricción se puede apreciar que todos los gráficos mantienen la misma tendencia, sin embargo la tensión promedio se incrementa al aumentar el coeficiente de fricción (Fig. 10).

Las tensiones tangenciales también tienen el mismo patrón de comportamiento que las tensiones equivalentes, como se puede apreciar en la Fig. 11. El coeficiente de fricción tiene influencia en el valor de la tensión tangencial media, esta aumenta al aumentar el coeficiente de fricción.

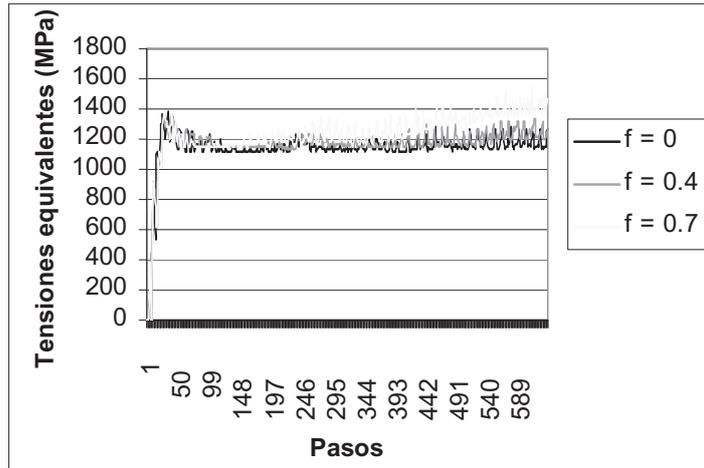


Fig. 10. Gráfico del comportamiento de las tensiones equivalentes máximas en modelos con diferentes coeficientes de fricción.

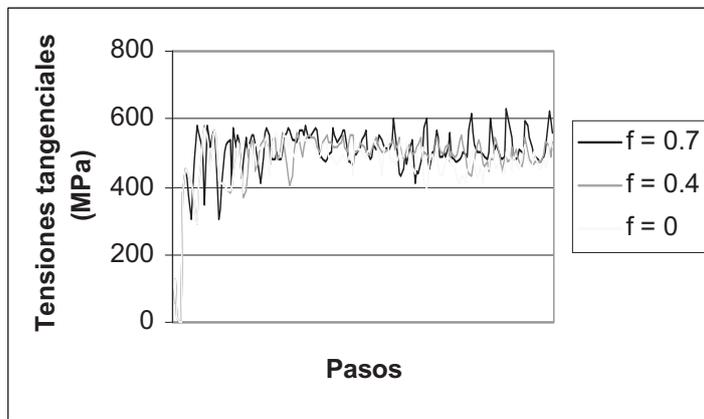


Fig. 11. Gráfico del comportamiento de las tensiones tangenciales máximas en modelos con diferentes coeficientes de fricción.

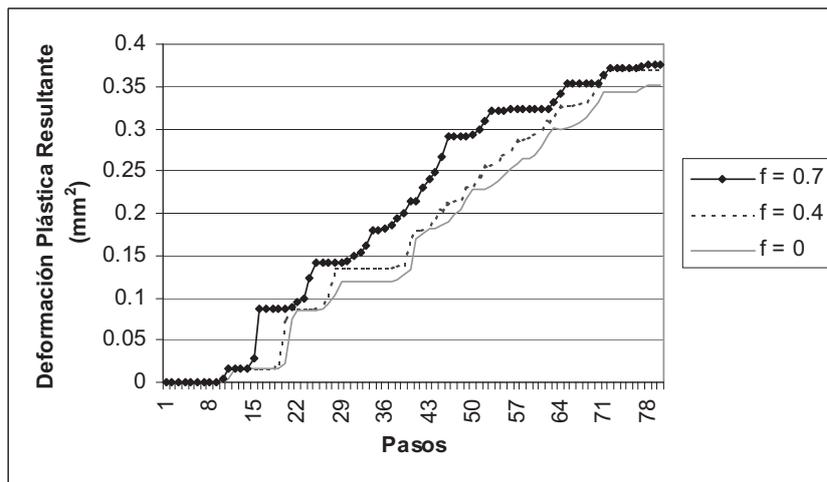


Fig. 12. Comportamiento de la deformación plástica máxima con diferentes coeficientes de fricción.

Al analizar la deformación plástica se puede apreciar, como es de suponer, que ésta aumenta al aumentar la carga aplicada (Fig.12). Sin embargo el aumento de la deformación plástica no es constante, sino que ocurre de forma escalonada, presuponándose que esto es producto del *stick-slip*. También se puede constatar que el coeficiente de fricción tiene influencia en la magnitud de la deformación plástica.

4. CONCLUSIONES

- Para simular el comportamiento de un material elasto-plástico sometido a la acción simultánea de cargas normales y tangenciales es importante tener en cuenta el coeficiente de fricción, pues el mismo tiene una marcada influencia en la magnitud de las tensiones, tanto tangenciales como normales y en la magnitud de las deformaciones plásticas.
- Los resultados obtenidos coinciden con los resultados experimentales, así como con la literatura consultada. El modelo desarrollado sirve como base para simular el mecanismo de desgaste abrasivo de materiales con comportamiento elasto-plástico.
- Con el modelo desarrollado se pueden apreciar variaciones en forma de vibraciones de la magnitud de las tensiones y deformaciones que se producen en el proceso de traslación del penetrador. Según los autores esto debe ser objeto de un estudio más profundo, pues podría estar relacionado con el efecto *stick-slip* y de ser así, además de contribuir a una simulación más real, permitiría realizar un mejor estudio de este fenómeno en los procesos de fricción y desgaste.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Fenómenos de Superficie (LFS) de la Escola Politécnica de la Universidade de São Paulo, Brasil y a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES (OFICIO/CCI/CAPES N° 0424-15/2003).

REFERENCIAS

- [1] Hutchings, I.M., *Tribology friction and wear of engineering materials*, Edward Arnold, London (1992)
- [2] Holmberg, K., Laukkanen, A., Ronkainen, H., Wallin, K., Varjus, S., "A model for stresses, crack generation and fracture toughness calculation in scratched TiN-coated steel surfaces", *Wear*, **254**, 278-291 (2003)
- [3] Anantha Ram, B.S., Danckert, J., Faurholdt T., "Finite element analysis of stress due to normal and sliding contact conditions on an elastic surface", *4th European LS-DYNA Users Conference* (2003)
- [4] Guo, Y.M., Nakanishi, K., Yokouchi, Y., "A hot forging simulation by the volumetrically elastic and deviatorically rigid-plastic finite-element method", *Journal of Materials Processing Technology*, **89-90**, 111-116 (1999)
- [5] Kim, Y.S., Son, H.S., Kim, C.I., "Rigid-plastic finite element simulation for process design of impeller hub forming", *Journal of Materials Processing Technology*, **143-144**, 729-734 (2003)
- [6] Jiang, Z., Xiong, S., Liu, X., Wang, G., Zhang, Q., "3-D rigid-plastic FEM analysis of the rolling of a strip with local residual deformation", *Journal of Materials Processing Technology*, **79**, 109-112 (1998)
- [7] Jiang, Z.Y., Tieu, A.K., "3-D finite element modeling of ribbed strip rolling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **40**, 2139-2154 (2000)
- [8] Jiang Z., Tieu, A., "A simulation of three-dimensional metal rolling processes by rigid-plastic finite element method", *Journal of Materials Processing Technology*, **112**, 144-151 (2001)
- [9] Jiang, Z., Tieu, A., Zhang, X., Lu, C., Sun, W., "Finite element simulation of cold rolling of thin strip", *Journal of Materials Processing Technology*, **140**, 542-547 (2003).
- [10] Zhrgang, W., Kuniaki, D., Younghoon, J., "FEM simulation of surface smoothing in the ironing process", *Journal of Materials Processing Technology*, **113**, 705-709 (2001)

- [11] Souza, R.M., Sinatora, A., Mustoe, G.W., Moore, J.J., “Numerical and experimental study of the circular cracks observed at the contact edges of the indentations of coated systems with soft substrates”, *Wear*, **251**, 1337-1346 (2001)
- [12] Ma, D., Xu, K., He, J., “Numerical simulation for determining the mechanical properties of thin metal films using depth-sensing indentation technique”, *Thin Solids Films*, **323**, 183-187 (1998)
- [13] Malzbender, J., de With, G., “Modeling of the fracture of a coating under sliding indentation”, *Wear*, **239**, 21-26 (2000)
- [14] Eleod, A., Devecz, J., Balogh, T., “Numerical modeling of the mechanical process of particle detachment by finite element method”, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, **28**(1-2), 77-90 (2000)
- [15] Rose, B., Kan, F., Antebi, J., Junjea, G., “Wear estimation of a wheel-on-track system for radio telescopes”, *ABAQUS Users’ Conference* (2004)
- [16] Vecchio, M., “Análisis del proceso de laminación de chapas por métodos empíricos y de elementos finitos”. Ph.D. Thesis, CINI, Argentina (2003)
- [17] Kobayashi, S., Oh, S., Altan, T., *Metal forming and the finite-element method*, Oxford University Press (1989)
- [18] ASM Committee on Aluminium Alloys, ASM Handbook Committee, *Metals Handbook*, Vol. 2, ASM International, Materials Park (1970)
- [19] Souza, R. M., Ph.D. thesis, Colorado School of Mines, USA (1999)
- [20] Metals & Materials Engineering. The University of British Columbia. <http://www.mmat.ubc.ca/courses/mmat382/>
- [21] Kragelsky, I., *Friction, wear, lubrication: tribology handbook*, Editorial MIR (1991)
- [22] Berger, E., *Friction modeling for dynamic system simulation*, Applied Mechanics Reviews (2001)

STUDY OF THE CONTACT BETWEEN A RIGID INDENTER AND ALUMINUM SPECIMEN CONSIDERING NORMAL LOAD AND TANGENTIAL DISPLACEMENT USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract – The objective of this work is to study the stress fields and plastic strains obtained as a consequence of the application of normal load together with tangential displacement of a rigid indenter to an aluminum specimen. The simulation, conducted through the Finite Elements Method (FEM), using the software ABAQUS, was applied to evaluate the stress and strain fields. The phenomenon was simulated with a two-dimensional mesh, assuming a plane strain condition. The normal load was increased progressively (0 - 50 N) as a function of the displacement. The results were obtained for different values of the coefficient of friction between the rigid indenter and the aluminum with elastic-plastic behavior. The results allow the correlation between the contact loads and the elastic-plastic behavior of materials subjected to certain types of wear tests. Some results of the literature were verified, such as the increase of the stresses and strains with the increase of the coefficient of friction. According to the authors’ opinion, in the process, the stick-slip effect takes place, what makes the simulation more realistic.

Keywords – Wear, Contact stresses, Plastic strain, Simulation.