

ANÁLISIS DE SIMULACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIÓN PLÁSTICA DURANTE EL CONTACTO Y DESLIZAMIENTO DE DOS CUERPOS

Simulation analyses of the stresses and plastic strain during two body contact and sliding

RESUMEN

El objetivo se centra en estudiar el comportamiento de los esfuerzos equivalentes y la deformación plástica obtenidos como consecuencia de la aplicación de carga normal y desplazamiento tangencial de un penetrador rígido sobre un sustrato de aluminio.

La simulación por el Método de los Elementos Finitos (MEF), utilizando el software ABAQUS, fue usado para evaluar los esfuerzos y los campos de deformaciones. El fenómeno fue simulado con una malla bidimensional, asumiendo el estado plano de deformaciones. Los resultados fueron obtenidos para diferentes valores de coeficiente de fricción entre el indentador rígido y la probeta de aluminio de comportamiento elasto-plástico.

PALABRAS CLAVES: Deformación plástica, Desgaste, Esfuerzos de Contacto, Simulación Computacional.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the contact stresses and plastic strains obtained as a consequence of the application of normal load together with tangential displacement with different friction values 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.

KEYWORDS: Contact stresses, Computer simulation, Plastic strain, Wear

1. INTRODUCCIÓN

En algunas aplicaciones de la ingeniería se presenta el contacto y movimiento relativo entre cuerpos, ejemplo de esto son los sellos mecánicos, los anillos de los pistones en los motores de combustión, herramientas de corte, entre otros; por esta razón, para un adecuado diseño y selección de estos componentes, es necesario analizar el comportamiento que los materiales presentan durante su exposición a condiciones tribológicas (fricción, desgaste y lubricación) [1,2].

Hoy en día, la industria ha incrementado el interés por hacer más eficientes los sistemas tribológicos, para ello se hace necesario el estudio del comportamiento mecánico de los materiales de los elementos de máquina que intervienen en estos sistemas; el análisis de esfuerzos

y deformaciones bajo condiciones de contacto y deslizamiento juega un papel importante, ya que mediante estudios experimentales y recientemente de simulación, se puede llegar a analizar características mecánicas de sustratos y de protección superficial para una determinada aplicación industrial.

Uno de los principales fenómenos de desgaste es el desgaste abrasivo, el cual es un fenómeno que ocurre con mucha frecuencia en los elementos de máquinas y aparece cuando partículas de alta dureza entran en contacto con la superficie dúctil de elementos de máquinas, trayendo como consecuencia la deformación y posterior corte y levantamiento del material. Fenómeno este, que se justifica por la acción de determinadas fuerzas normales y tangenciales [1-3], por lo que este tipo de desgaste está directamente relacionado con los campos

IVAN NEGRIN HERNANDEZ

Ingeniero Mecánico, PhD.
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de las Villas, Cuba
linegrin@uclv.edu.cu

EDUARDO A. PÉREZ RUIZ

Ingeniero Mecánico, MSc.
Grupo Investigación DIMAS
Programa de Ingeniería Mecánica
Universidad de Ibagué, Colombia
eduardo.perez@unibague.edu.co

de esfuerzos y con la fricción generada durante el deslizamiento.

Entre los parámetros característicos del desgaste abrasivo se encuentra el tamaño y la forma de las partículas, lo que tiene gran influencia en la generación de los esfuerzos de contacto durante el mismo. Para ello se ha estudiado y establecido que las partículas con un tamaño entre 5 y 500 μm son las responsables de producir el mayor desgaste abrasivo y erosivo, aunque para los procesos de pulido sea preferido el uso de partículas con dimensiones menores a 1 μm [4].

De otro lado, el método de simulación numérica por medio de los Elementos Finitos (MEF), ha sido utilizado para el entendimiento de la deformación plástica generada en los materiales metálicos durante procesos de conformación, entre los que se citan, la forja en caliente y en frío, el laminado, la obtención de acabados superficiales de calidad [5-13].

Así mismo, la simulación numérica ha sido utilizada en el estudio del comportamiento de determinadas propiedades mecánicas de materiales y recubrimientos, para lo cual se ha estudiado la simulación del proceso de indentación [14-20] y de indentación y rayado simultáneo [3, 14].

Por lo anterior, el uso de la simulación numérica por medio de los elementos finitos ha cobrado bastante importancia en el entendimiento de los fenómenos de contacto, por lo que para una mejor comprensión del fenómeno de desgaste abrasivo es importante simular este proceso teniendo en cuenta el desplazamiento de una partícula de rígida sobre la superficie de un material dúctil.

En el presente estudio se considera una partícula rígida con radio de 200 μm deslizando sobre una superficie dúctil, para lo cual son considerados diferentes valores de coeficiente de fricción (0;0,4;0,7) analizando su influencia en el comportamiento de los esfuerzos normales, tangenciales y la deformación plástica.

2. MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo de elementos finitos, para la simulación del proceso de indentación y deslizamiento de un penetrador rígido, sobre un substrato de material con comportamiento elasto-plástico, fue desarrollado usando el software ABAQUS (Figura 1).

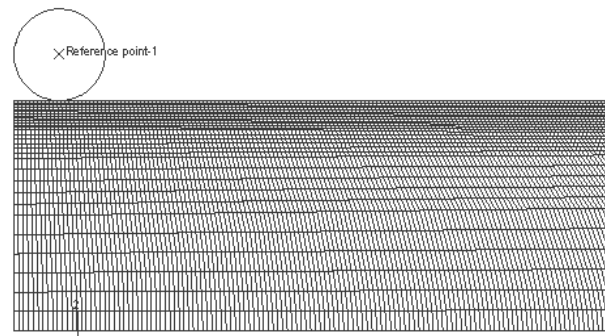


Figura 1. Malla desarrollada para la simulación de elementos finitos

Para el estudio de convergencia analítica de ajuste a la malla fueron analizados 3 modelos (Tabla 1), en donde se determinó el valor de esfuerzo máximo equivalente (Mises) en cada paso de simulación (Figura 2).

<i>Modelo</i>	<i>Número de Elementos</i>
1	8830
2	16660
3	22120

Tabla 1 Número de elementos utilizados en cada modelo

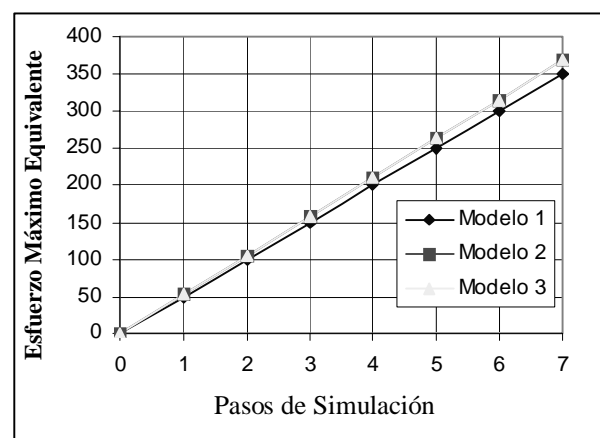


Figura 2. Esfuerzos equivalentes máximos de los tres modelos en los diferentes pasos de la simulación

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. El mismo consta de 16660 elementos planos de 4 nodos para el estado plano de deformaciones.

El penetrador fue considerado con un radio de 200 μm , similar al radio de la punta del penetrador Rockwell C, y es considerado 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 $E = 68,9 \text{ GPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,33$) fueron obtenidos de la literatura [21, 22]. Para definir el comportamiento plástico fueron usados datos de curvas esfuerzo-deformación obtenidas durante ensayo preliminar en una máquina universal de ensayos [16], permitiendo identificar el valor del esfuerzo de fluencia como $\sigma_y = 295 \text{ MPa}$.

Para el proceso de simulación se aplicó una carga incremental hasta 50N durante el desplazamiento del penetrador como se observa en la figura 3, el cual fue de aproximadamente 10 mm. En este proceso no fue considerado el efecto de la velocidad de desplazamiento del indentador. En cuanto al sustrato, este fue restringido en movimiento en los laterales y en la parte inferior y la carga fue aplicada en el nodo de referencia del penetrador.

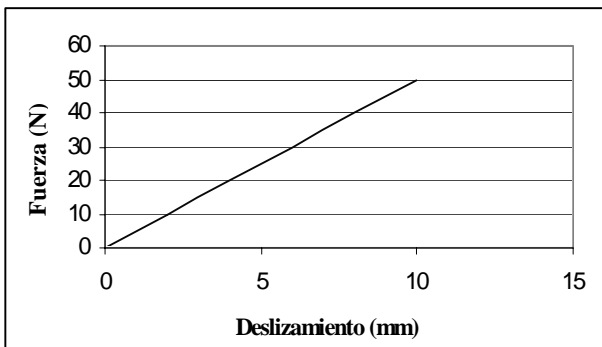


Figura 3. Modo de aplicación de la carga

El contacto fue simulado definiendo dos zonas, una considerada como *master* (el indentador) y la otra como *slave* (sustrato). La simulación de movimiento relativo entre estas superficies es lo que define el proceso de contacto, para esto se realizaron tres simulaciones con diferentes coeficientes de fricción (0,0; 0,4 y 0,7). Los resultados son referidos y analizados principalmente a los esfuerzos equivalentes obtenidos 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 [1,2].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se observan los pasos de la secuencia de movimiento del indentador y se puede apreciar el incremento de los esfuerzos equivalentes a medida que aumenta la carga normal 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 los esfuerzos que aparecen durante el proceso de indentación y en la magnitud de los esfuerzos residuales producto del proceso de deformación plástica.

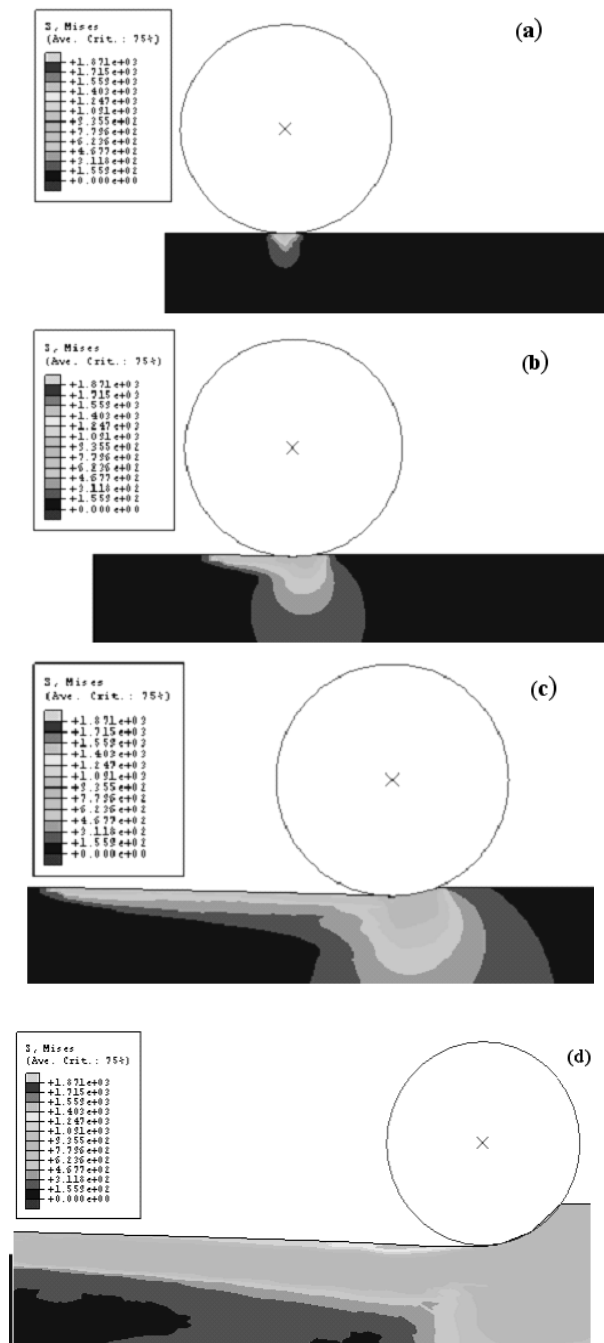


Figura 4. Secuencia del movimiento del penetrador sobre la probeta considerando coeficiente de fricción igual a 0,4

Para los análisis realizados se tomó como referencia el punto de mayores esfuerzos (normales o tangenciales) en cada paso de la simulación, que se encuentra en la zona del material comprimido debajo del indentador (Figura 5).

En este caso, al ser considerado un comportamiento elasto-plástico para el sustrato, los esfuerzos máximos alcanzan valores dentro del rango que establece la

literatura en estos casos [21,22], y al considerar directamente el grado de deformación plástica el gráfico de esfuerzos-deformaciones toma su forma característica (Figura 6.).

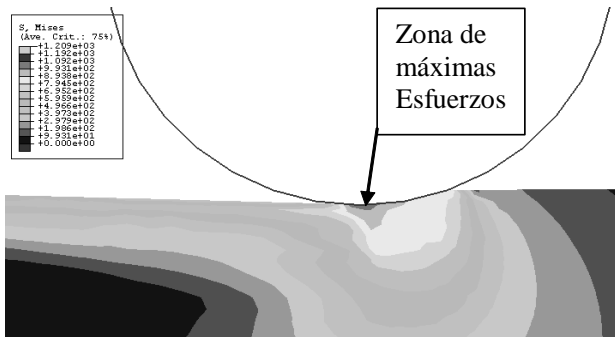


Figura 5. Zona de máximo esfuerzo equivalente

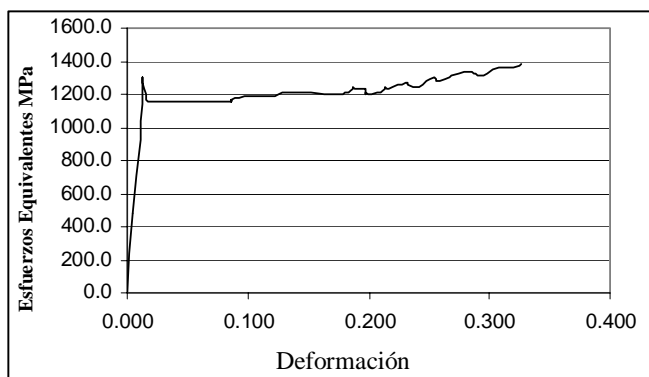


Figura 6. Comportamiento de los valores de esfuerzo vs el grado de deformación alcanzado

De otro lado, según expresado en la literatura, el desgaste en los materiales metálicos debe ocurrir predominantemente durante el régimen elasto-plástico o totalmente plástico [14,15], en donde la presión de contacto (p) para ambos casos se define como:

a) $1.8 \tau_y \leq p \leq 5.2 \tau_y$ (p) presión de contacto 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 = Esfuerzo tangencial de fluencia.

En la simulación se ha utilizado el aluminio AA 6061-T6 con un valor promedio de fluencia de $\tau_y=177$ MPa, por lo que la presión de contacto deberá encontrarse en el rango: $318,6 \text{ MPa} \leq p \leq 920,4 \text{ MPa}$. La Figura 7, permite observar que la presión de contacto obtenida se encuentra dentro del rango característico del comportamiento elasto-plástico, lo que conlleva a que estos valores de presión provoquen esfuerzos tangenciales, tal como se observa en la Figura 8.

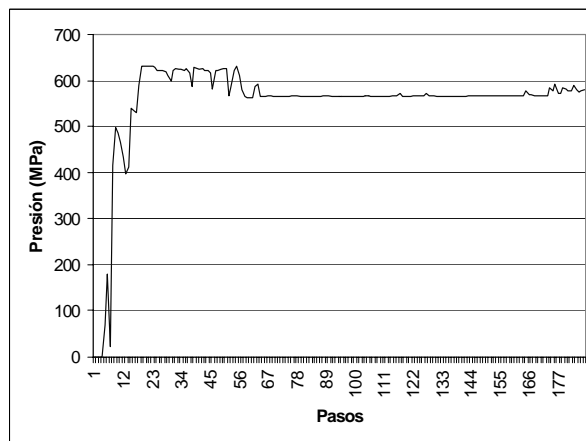


Figura 7. Distribución de la presión durante el deslizamiento

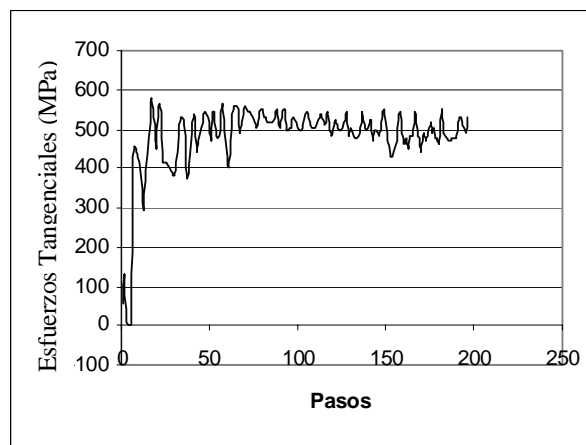


Figura 8. Comportamiento del esfuerzo tangencial considerando coeficiente de fricción de 0,4 durante el deslizamiento

Un comportamiento similar tienen los esfuerzos equivalentes, llegando a valores que se encuentran dentro del régimen plástico (Figura 9).

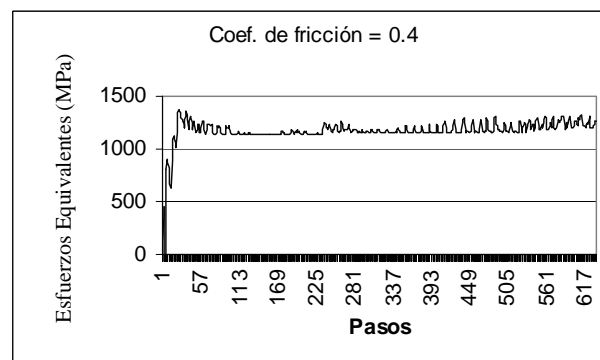


Figura 9. Máximo esfuerzo equivalente considerando coeficiente de fricción de 0,4 durante el deslizamiento

Como se puede observar en las Figuras 8 y 9, a partir del paso 200 de simulación, el valor de los esfuerzos máximos no es totalmente continuo y por el contrario se observan repentinos incrementos en la forma de oscilaciones. Este comportamiento, no esperado, tal vez puede ser entendido como el fenómeno conocido como stick-slip, ya que este comportamiento coincide con resultados obtenidos por Berger E, [22], quien hace un profundo análisis del fenómeno stick-slip en los procesos de fricción.

De la misma forma, al comparar los valores de los esfuerzos equivalentes obtenidos en las simulaciones con diferentes coeficientes de fricción se puede apreciar que todos los gráficos mantienen la misma tendencia, sin embargo el esfuerzo promedio se incrementa al aumentar el valor del coeficiente de fricción (Figura10).

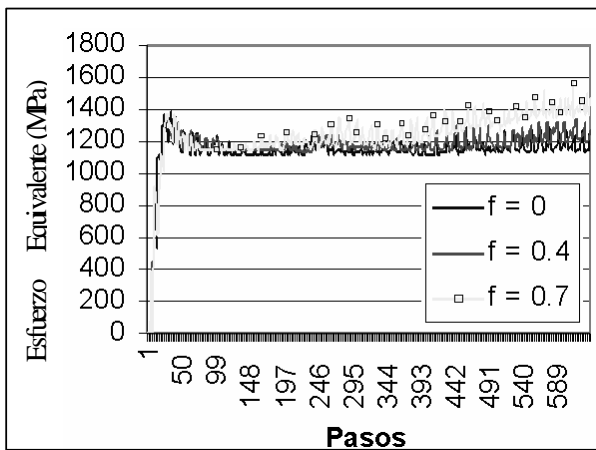


Figura 10. Comportamiento del esfuerzo equivalente vs deslizamiento para diferentes valores de coeficiente de fricción

Los Esfuerzos tangenciales también tienen el mismo patrón de comportamiento que los esfuerzos equivalentes, como se puede apreciar el la Figura 11.

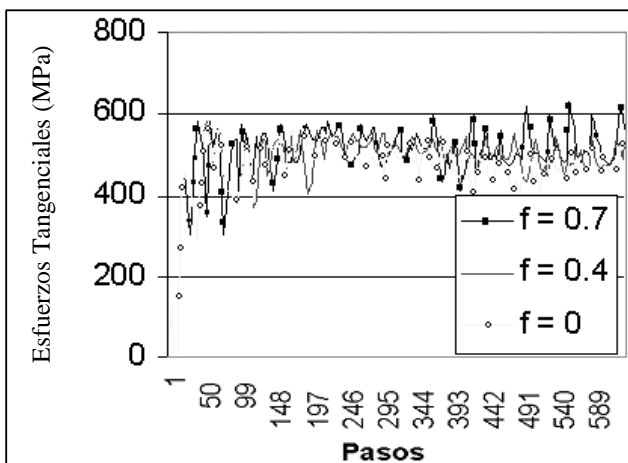


Figura 11. Comportamiento de esfuerzos tangenciales vs deslizamiento para diferentes valores de coeficiente de fricción

Como puede observarse, el coeficiente de fricción tiene influencia en el valor del esfuerzo tangencial medio, al igual que en el valor de esfuerzos equivalentes, los cuales aumentan al aumentar el coeficiente de fricción.

Al analizar la deformación plástica se puede apreciar, como es de suponer, que esta aumenta al aumentar la carga aplicada (Figura 12), sin embargo, el aumento de la deformación plástica no es constante, sino que ocurre de forma escalonada, presuponiendo que el comportamiento se asocia con la influencia de las fuerzas resistivas o de oposición al movimiento (fuerza de fricción) ya que como se observa el incremento en el coeficiente de fricción genera una marcada influencia en la magnitud de la deformación plástica.

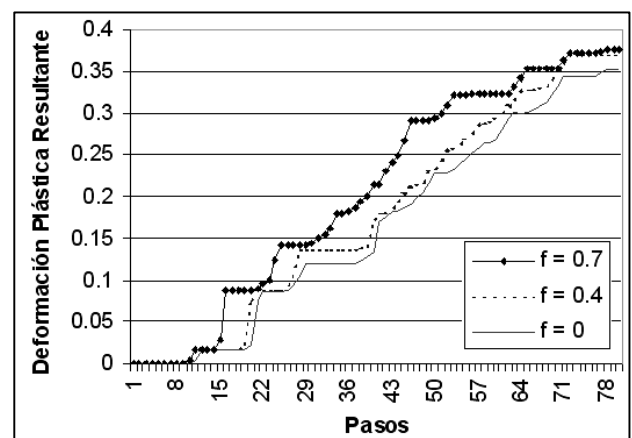


Figura 12. Comportamiento de la deformación plástica vs deslizamiento para diferentes valores de coeficiente de fricción

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten suponer la confiabilidad del modelo de simulación desarrollado, ya que los resultados coinciden con la literatura consultada, por lo anterior el modelo sirve como base para simular el efecto del deslizamiento de una partícula rígida sobre una superficie con comportamiento elasto-plástico y analizar la distribución de esfuerzos y deformación plástica generada durante diferentes tipos de desgaste.

Para simular el comportamiento de un material elasto-plástico sometido a condiciones de desgaste (acción simultánea de cargas normales y tangenciales), es importante considerar la magnitud del coeficiente de fricción generado durante el contacto, pues el mismo tiene una marcada influencia en la magnitud de los esfuerzos, tanto tangenciales como normales y en la magnitud de la deformación plástica. Es así como altos valores de coeficiente de fricción generan altos valores de esfuerzos equivalentes y de esfuerzos tangenciales como consecuencia del aumento en la deformación plástica (acumulación del material) durante el deslizamiento.

El modelo desarrollado permitió observar, para los pasos intermedios y finales de simulación, el cambio repentino y oscilatorio de cada uno de los valores de los esfuerzos durante el deslizamiento de la partícula rígida bajo diferentes condiciones de fricción, lo que presupone la existencia del fenómeno denominado stick-slip. Sin embargo, es necesario de nuevas simulaciones para identificar posibles desajustes en el proceso de simulación y de un análisis más a fondo de este fenómeno para reproducir de forma confiable el efecto de esta energía dinámica durante los procesos de contacto y deslizamiento.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. I. M Hutchings. Tribology friction and wear of engineering materials. Edward Arnold. London. 1992
- [2]. I. Kragelsky. Friction, wear, lubrication. Tribology Handbook. Editorial MIR. 1991.
- [3]. K. Holmberg, A. Laukkanen, H. Ronkainen, K. Wallin, S. Varjus. *A model for stresses, crack generation and fracture toughness calculation in scratched TiN-coated steel surfaces*. *Wear* 254 (2003) 278-291.
- [4]. B. Anantha Ram, J. Danckert, T. Faurholdt. *Finite element analysis of stress due to normal and sliding contact conditions on an elastic surface*. 4th European LS-DYNA Users Conference 2003.
- [5]. Y. M. Guo, K. Nakanishi, Y. Yokouchi. A hot forging simulation by the volumetrically elastic and deviatorically rigid-plastic finite-element method, *Journal of Materials Processing Technology* 89-90. (1999) 111-116.
- [6]. S. Jiang Z, L. X Xiong, G. Wang, Q. Zhang. “3-D rigid-plastic FEM analysis of the rolling of a strip with local residual deformation” . *Journal of Materials Processing Technology*.79. (1998) 109-112.
- [7]. Z. Jiang, A.K Tieu. “3-D finite element modelling of ribbed strip rolling”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 40 (2000) 2139-2154.
- [8]. Z. Jiang, A. Tieu. “A simulation of three-dimensional metal rolling processes by rigid-plastic finite element method”. *Journal of Materials Processing Technology*. 112 (2001) 144-151.
- [9]. Z. Jiang, A. Tieu, X. Zhang, C. Lu, W. Sun, Finite element simulation of cold rolling of thin strip, *Journal of Materials Processing Technology* 140 (2003) 542-547.
- [10]. W. Zhrgang, D. Kuniaki, J. Younghoon. “FEM simulation of surface smoothing in the ironing process”. *Journal of Materials Processing Technology*. 113 (2001) 705-709.
- [11]. M. Vecchio *Análisis del proceso de laminación de chapas por métodos empíricos y de elementos finitos*. Ph.D. thesis, CINI, Argentina, 2003.
- [12]. S. Kobayashi, S. Oh, T. Altan. “Metal forming and the finite-element method”. Oxford University Press, 1989.
- [13]. M. Dejun, X. Kewei, H. Jiawen. “Numerical simulation for determining the mechanical properties of thin metal films using depth-sensing indentation technique”. *Thin Solids Films*. 323. (1998).183-187.
- [14]. J. Malzbender, G. de With. Modeling of the fracture of a coating under sliding indentation. *Wear*. 239. (2000). 21-26.
- [15]. A. Eleod, J. Devez, T. Balogh. “Numerical modelling of the mechanical process of particle detachment by finite element method”. *Periodica Polytechnica Ser. Transp. Eng.* Vol. 28. No. 1-2 (2000).77-90.
- [16]. R.M.Souza, Finite Element Modeling of contact stresses during the indentation of wear resistant coatings on soft substrates, PhD Thesis, Colorado School of Mines, (1999)
- [17]. R.M Souza, A. Sinatora, G. Mustoe, J. Moore. “Numerical and experimental study of the circular cracks observed at the contact edges of the indentations of coated systems with soft substrates” *Wear*. 251. (2001).1337-1346.
- [18]. E. Pérez R, R. Souza, L.I. Negrin, “Análisis por elementos finitos de la distribución de esfuerzos radiales y comportamiento plástico de sistemas recubiertos (películas delgadas resistentes al desgaste/sustratos de aluminio) en un ensayo de indentación”.*Sci. Tech*. 30. (2006).137-142.
- [19]. E. Pérez R, R. Souza. “Numerical and Experimental analyses on the contact stresses developed during single and successive indentations of coated systems”. *Surface and Coatings Technology*. 188-189. (2004). 572-580.
- [20]. L. Piana, E. Pérez R, R. Souza, A. Kunrath, T. Strohaecker. “Numerical and experimental analyses on the indentation of coated systems with substrates with different mechanical properties”. *Thin Solid Films*. 491. (2005). 197-203.
- [21]. Metals & Materials Engineering. The University of British Columbia. <http://www.mmat.ubc.ca/courses/mmat382/> .
- [22]. E. Berger. “Friction modeling for dynamic system simulation”. *Applied Mechanics Reviews*. 2001.