

SIMULACIÓN (FEM) DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS DE CONTACTO EN SISTEMAS RECUBIERTOS BAJO REPETIDAS INDENTACIONES

FEM Simulation on the distribution of contact stresses during repeated indentations of coated systems

RESUMEN

Este trabajo busca estudiar campos de esfuerzos obtenidos en un sistema recubierto (sustrato dúctil y un recubrimiento rígido) cuando se aplican repetidas indentaciones. Para esto, fue realizada una simulación FEM a través del software ABAQUS, considerando una malla bidimensional axisimétrica y un indentador esférico para la indentación, el cual aplica una carga normal de 50N.

Los resultados permitieron observar que los valores de esfuerzos radiales en el borde del contacto no presentaron grandes diferencias a pesar de aumentar el número de ciclos de indentación, lo que sugiere que, después de la primera indentación el sistema conserva un comportamiento elástico haciendo necesario altos ciclos de carga para la falla del sistema.

PALABRAS CLAVES: Método de los elementos finitos FEM, Esfuerzos de Contacto, Sistemas recubiertos, repetidas indentaciones

ABSTRACT

The aim of this work, is to study the stress fields obtained when repeated indentations are conducted on a coated system (elasto-plastic substrate an rigid coated). The finite element method (FEM), through the ABAQUS software, was used considering an axisymmetric bidimensional mesh and a spherical indenter with a normal load of 50 N applied on the system.

The results have also considered the analyses of the effects of the radial stress distributions at the edge contact as a function of the number of cycle indentations carried out. This result suggests an elastic behavior for this load condition and the high number of the indentation cycles to obtain the failure of the system.

KEYWORDS: Finte Elements Method FEM, Contact stresses, Coated systems, Repeated Indentations

1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de mejorar el comportamiento tribológico (fricción, desgaste, lubricación) de algunos elementos de máquinas, comúnmente es realizada la deposición de un material rígido en forma de recubrimiento sobre materiales dúctiles.

Un ejemplo de esto, son los recubrimientos duros, principalmente cerámicos, los cuales son utilizados como capas protectoras en algunas piezas, entre las que se destacan las herramientas de corte. Sin embargo, tales recubrimientos presentan comportamiento frágil y por ende una alta tendencia a la falla o fractura a lo largo de la interfase que forma con el material base, llamado sustrato, el cual presenta características mecánicas inferiores [1].

Un método comúnmente utilizado para evaluar las propiedades mecánicas de los recubrimientos y los sistemas recubiertos es el ensayo de indentación, el cual utiliza indentadores con diferentes geometrías tales como

cónicas, esféricas y piramidales [2-4] con el objetivo de desarrollar campos de esfuerzos, los cuales son los responsables por la fractura en forma de grietas cohesivas como radiales y circulares [2,3,5] y/o adhesivas que conllevan a la falla y desprendimiento del recubrimiento respecto al sustrato.

De forma paralela, el método de los elementos finitos MEF ha sido utilizado en la evaluación y estudio de los esfuerzos de contacto desarrollados durante la indentación de sistemas recubiertos [2-15].

Tradicionalmente estos análisis han sido utilizados para el estudio de la distribución de esfuerzos durante una única indentación y bajo diferentes condiciones de fricción. De la misma forma, ha posibilitado el análisis de la propagación de defectos al contemplar de forma inicial patrones de agrietamiento distribuidos sobre la superficie del recubrimiento [13-15].

Sin embargo, el estudio de los efectos en la distribución de esfuerzos en el recubrimiento generados durante

EDUARDO A. PÉREZ RUIZ

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

IVAN NEGRIN HERNANDEZ

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

repetidas indentaciones en el mismo punto de contacto parece no haber sido tratado.

Por lo anterior, en este estudio es analizado el efecto que conlleva la realización de repetidas indentaciones en el mismo punto del sistema recubierto sobre la distribución de los esfuerzos, los cuales, como mencionado anteriormente son la causa de la aparición de las grietas y posterior falla del sistema.

2. MODELO DE SIMULACIÓN

Para el respectivo estudio fue utilizado el software de elementos finitos ABAQUS® con el cual fue desarrollada la malla de simulación que se presenta en la figura 1, en donde fueron considerados 13.545 elementos de cuatro nodos, que permitieron la simulación del sistema recubierto.

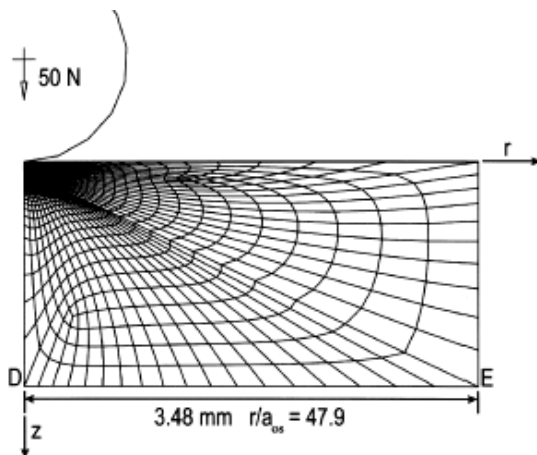


Figura 1. Malla desarrollada para la simulación de elementos finitos

El indentador mostrado en la misma figura fue asumido totalmente como rígido, con geometría esférica y un diámetro característico de los ensayos de indentación en escalas Rockwell B y F (1,59 mm - 1/16 in) y aplicando una carga normal de 50N en cada ciclo de indentación realizado.

En el modelo utilizado fue considerada una película de material con espesor de 4,6 μm y un comportamiento elástico con módulo de expansión volumétrico $\nu=0,3$ y un módulo elástico $E=280$ GPa, así como un módulo de expansión térmica de $9,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. De la misma forma, el sustrato considerado presentó las características de una aleación de aluminio de la serie 6061 con comportamiento elasto-plástico, en donde las características elásticas y térmicas del aluminio como son: $E=68,9$ GPa, $\nu=0,33$ y $\alpha=23,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, fueron obtenidas directamente de la literatura [16] y el valor de resistencia a la fluencia ($\sigma_y=295$ MPa) fue obtenido directamente por Souza en ensayos experimentales anteriores.

De la misma forma, el cálculo del coeficiente de endurecimiento (n) no es considerado, debido a que el software ABAQUS no requiere de este valor para definir el comportamiento plástico del material.

Por otro lado, durante la simulación numérica fueron considerados diferentes pasos de análisis para la aplicación inicial de la carga, así como un valor de esfuerzo biaxial sobre la película depositada, con el objetivo de considerar los esfuerzos residuales generados durante el proceso de deposición del recubrimiento sobre el sustrato.

En primera instancia fue seleccionado el valor de 0,74 GPa como valor para el esfuerzo biaxial, este valor ha sido reportado como un valor característico en algunos de los procesos de deposición PVD [17]. En segundo paso de simulación fue considerada una temperatura máxima de 498 K como resultado del proceso de deposición de la película, lo que permite calcular los esfuerzos residuales obtenidos al enfriar el sistema hasta la temperatura ambiente (298 K).

En el tercer paso de análisis fue considerada la aplicación de una carga normal sobre el nodo de referencia durante la indentación. De esta forma, los esfuerzos de contacto fueron calculados considerando la máxima carga de indentación y después de la descarga del indentador sobre la superficie del sistema.

Finalmente, el último paso de simulación fue repetido sobre el mismo punto, en cinco oportunidades para considerar varios ciclos de indentación.

3. RESULTADOS

La figura 2, presenta los esfuerzos radiales obtenidos y calculados a la máxima carga de contacto (50 N) durante la primer indentación. Como puede observarse la figura 2a muestra los esfuerzos radiales (σ_r) a lo largo de la superficie del recubrimiento, mientras que la figura 2b muestra la variación de los esfuerzos tangenciales (σ_θ) a lo largo de la misma.

Las figuras 2c y 2d muestran la variación de los esfuerzos radiales y tangenciales respectivamente, a lo largo de la cara interna del recubrimiento en la interfase del sistema. Así mismo, la figura 3 muestra los esfuerzos obtenidos después de la descarga del indentador sobre el sistema recubierto.

El efecto del proceso de descarga sobre la distribución de esfuerzos ha sido discutido por Souza 2001 [14] y Montmitonnet 1993 [18], en donde se ha verificado que la descarga da lugar a un incremento en los valores tensión de los esfuerzos radiales (σ_r) y tangenciales (σ_θ) en el punto del contacto ($r=0$), lo cual se entiende como el efecto de la deformación plástica del sustrato sobre el

material del recubrimiento, lo cual conlleva a la aparición de esfuerzos adicionales sobre este último.

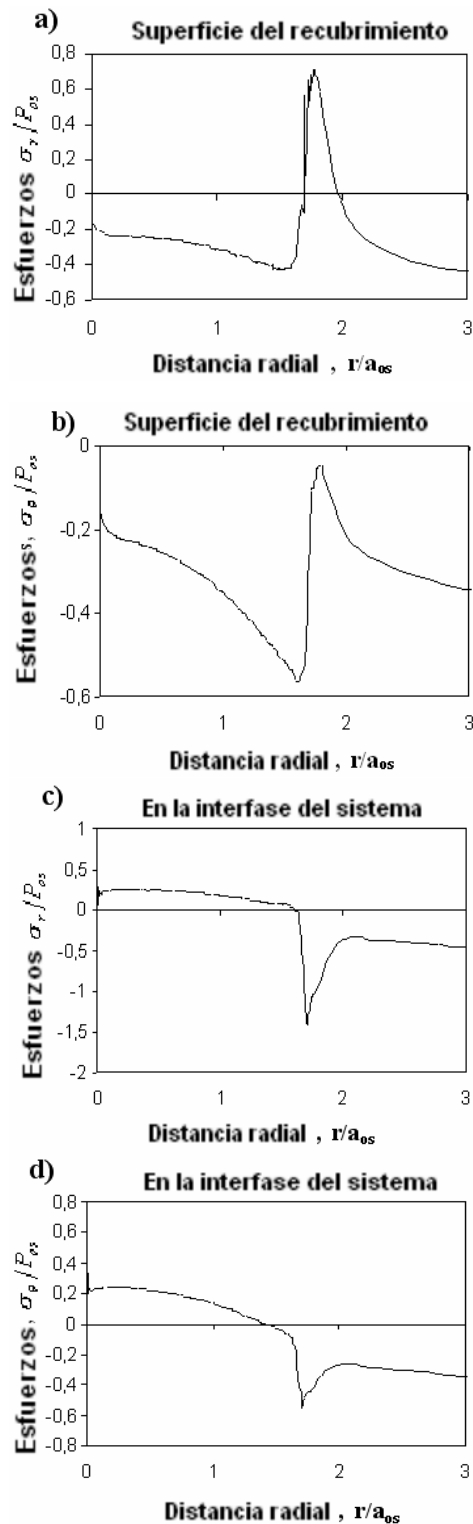


Figura 2 Esfuerzos calculados durante la primer indentación y a la máxima carga (50 N). a) Esfuerzos radiales en la superficie de la película, b) Esfuerzos tangenciales en la superficie de la película, c) Esfuerzos radiales en la interfase, d) Esfuerzos tangenciales en la interfase

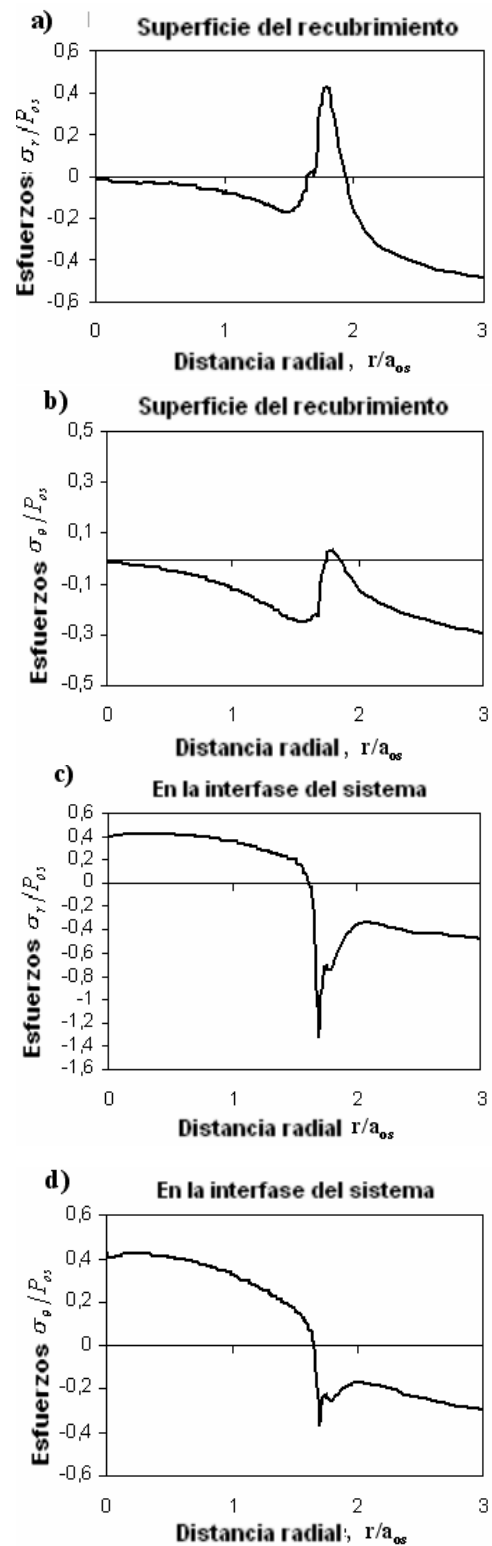


Figura 3 Esfuerzos calculados después de la descarga de la primera indentación. a) Esfuerzos radiales en la superficie de la película, b) Esfuerzos tangenciales en la superficie de la película, c) Esfuerzos radiales en la interfase, d) Esfuerzos tangenciales en la interfase

En cuanto a la condición de repetidas indentaciones, la figura 4 presenta el comportamiento de los esfuerzos radiales y tangenciales después de la descarga considerando uno, dos y cinco ciclos de indentación.

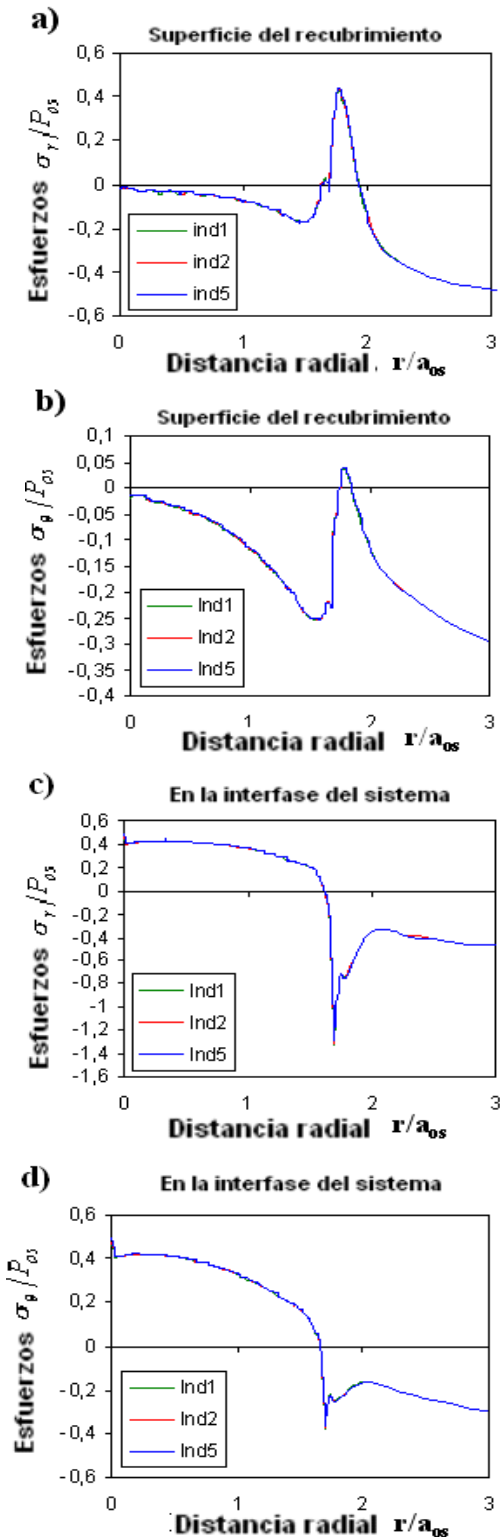


Figura 4 Esfuerzos obtenidos después de la descarga. a) Esfuerzos radiales en la superficie de la película, b) Esfuerzos

tangenciales en la superficie de la película, c) Esfuerzos radiales en la interfase, d) Esfuerzos tangenciales en la interfase

La figura 4a es reproducida y detallada en la figura 5, en donde es observado el incremento en los valores de esfuerzos para cada uno de los ciclos de indentación.

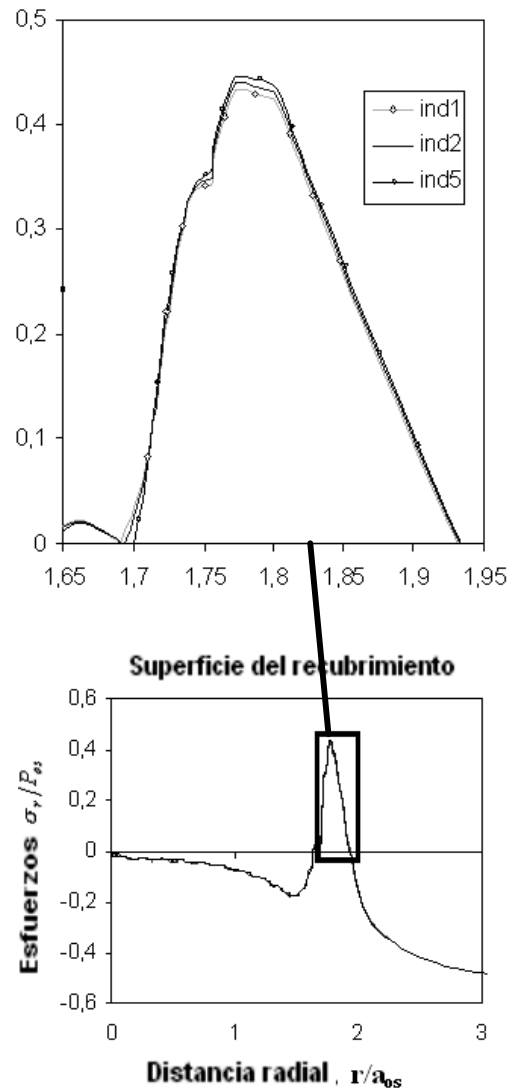


Figura 5 Variación en la distribución de esfuerzos radiales en cada ciclo de indentación.

Las figuras 4 y 5 muestran pequeñas variaciones en los valores de esfuerzos radiales entre ciclos de indentación.

Así mismo, la figura 6 presenta la evolución de los valores de esfuerzos radiales y tangenciales obtenidos en un mismo punto para cada una de las indentaciones.

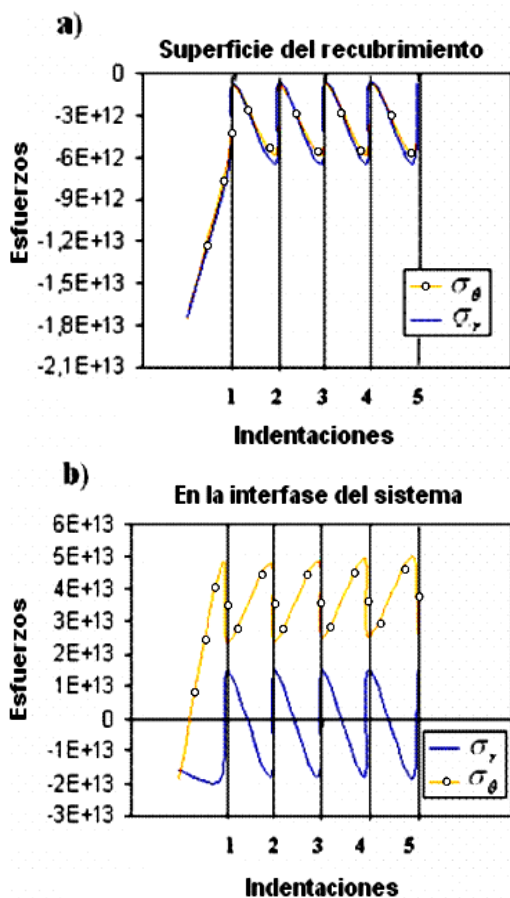


Figura 6 Comportamiento de los esfuerzos radiales y tangenciales en la superficie e interfase de la película en el punto central de contacto con el indentador. a) Elemento de contacto en la superficie, b) Elemento de contacto en la interfase

La figura indica que desde el inicio de la segunda indentación la película presenta un comportamiento totalmente elástico durante los pasos de carga y descarga.

Igualmente, puede observarse que en la interfase se hacen predominantes los esfuerzos de carácter tangencial, a diferencia del comportamiento presentado en la superficie. Este comportamiento puede asociarse a la deformación plástica del sustrato, el cual se encarga de retener la película durante el proceso de descarga.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, fue utilizado el método de los elementos finitos para estudiar el comportamiento de los esfuerzos de contacto durante varios ciclos de indentación en un mismo punto. De esta forma se profundiza en el entendimiento del comportamiento de los esfuerzos generados en la superficie del recubrimiento como en la interfase del sistema recubierto.

Los resultados permiten demostrar que durante la primer indentación (en la condición de máxima carga) se producen los mayores valores de esfuerzos radiales como consecuencia del doblamiento que se realiza del recubrimiento durante la deformación plástica del sustrato, el cual busca, durante el aumento de la carga, generar un contacto cada vez más conforme, lo que permite entender que las grietas de carácter circular (debidas a los esfuerzos radiales) presentes en la superficie del recubrimiento, son obtenidas durante el primer contacto.

Similar comportamiento se evidenció en la interfase, en donde los esfuerzos tangenciales, los cuales son los responsables por la aparición de las grietas radiales y estas por el levantamiento y pérdida del recubrimiento, presentan altos valores durante la descarga del sistema en el punto de contacto. Lo anterior puede entenderse y justificarse como la liberación de energía para el remanente elástico que presenta el sustrato, el cual presenta comportamiento elasto-plástico, y que conlleva a comprender y ratificar que la falla adhesiva del recubrimiento en el sistema se presenta durante la descarga de este.

En cuanto a las indentaciones repetidas, el estudio revela que los valores de esfuerzos radiales en el borde del contacto no presentan grandes diferencias entre ciclos de indentación, lo que sugiere un comportamiento elástico en donde la falla del sistema se genera durante la primera indentación pero, haciendo necesario un elevado número de indentaciones para lograr una posible propagación de las grietas obtenidas como consecuencia del primer contacto.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. A. Abdul-Baqi, E. Van der Giessen. "Numerical analysis of indentation-induced cracking of brittle coatings on ductile substrate" *International Journal of Solids and Structures*. Vol.39. 2002. pp. 1427-1442.
- [2]. N. Thomsen, A. Fisher-cripps, M. Swain. "Crack formation mechanisms during micro and macro indentation of diamond-like carbon coatings on elasticplastic substrates". *Thin Solid Films*. Vol. 332. 1998. pp. 180-184.
- [3]. K. Ma, K. Bloyce, A. Bell. "Examination of mechanical properties and failure mechanisms of tin and ti-tin multiplayer coatings". *Surface and Coatings Technology*. Vol. 76-77. 1995. pp. 297-302.
- [4]. R. Souza, G. Mustoe, J.J. Moore. "Finite element modeling of the stresses, fracture and delamination during the indentation of hard elastic films on elastic-plastic soft substrates". *Thin Solid Films*. Vol. 392. 2001. pp. 65-74.

- [5]. A. Karimi, A. Wang, T. Cselle, M. Morstein. "Fracture mechanisms in nanoscale layered hard thin films". *Thin Solid Films*. Vol. 420-421. 2002. pp. 275-280.
- [6]. E. Kral, K. Komvopoulos, D. Bogy. "Finite element analysis of repeated indentation of an elastic-plastic layered medium by a rigid sphere, part i: surface results". *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 62. 1995. pp. 20-28.
- [7]. N. Schwarzer, H. Djabella, F. Richter, R. Arnell. "Comparison between analytical and fem calculations for the contact problem of spherical indenters on layered materials". *Thin Solid Films*. Vol. 270. 1995. pp. 279-282.
- [8]. L. Gan, B. Ben-nissan, A. Ben-david. "Modelling and finite element analysis of ultra-microhardness indentation of thin films". *Thin Solid Films*. Vol. 290-291. 1996. pp. 362-366.
- [9]. E. Weppelmann, M. Swain. "Investigation of the stresses and stress intensity factors responsible for fracture of thin protective films during ultra-micro indentation test with spherical indenters" *Thin Solid Films*. Vol. 286. 1996. pp. 111-121.
- [10]. N. Huber, CH. Tsakmakis. "A finite element analysis of the effect of hardening rules on the indentation test". *Journal of Engineering Materials and Technology*. Vol. 120. 1998. pp. 143-148.
- [11]. A. Bolshakov, G. Pharr. "Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques" *Journal of Materials Research*. Vol. 13. 1998. pp. 1049-1058.
- [12]. M. Begley, A. Evans, J. Hutchinson. "Spherical impression of thin elastic films on elastic-plastic substrates". *International Journal of Solids and Structure*. Vol. 36. 1999. pp. 2773-2788.
- [13]. R. 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*. Vol. 251. 2001. pp. 1337-1346.
- [14]. R. Souza, A. Sinatora. "study on the effects of mode i and mode ii stress intensity factors on the propagation of cracks located at the surface of coated systems subjected to indentation with normal loads" *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. Vol. 3. Tribology. 2001. pp. 178-186.
- [15]. R. Souza, G.W Mustoe, J. Moore. "Finite element modeling of the stresses and fracture during the indentation of hard elastic films on elastic-plastic aluminum substrates" *Thin Solid Films*. Vol. 355-356. 1999. pp. 303-310.
- [16]. ASM Committee on Aluminium Alloys, ASM Handbook Committee, Metals Handbook, Vol. 2, ASM International, Materials Park, 1970.
- [17]. R.M. Souza, PhD thesis, Finite Element Modeling of Contact Stresses During the Indentation of Wear Resistant Coatings on Soft Substrate, Colorado School Mines, 1999.
- [18]. P. Montmitonnet, M. Edlinger, E. Felder. "Finite element analysis of elastoplastic indentation: part ii application to hard coatings" *Trans. of the ASME - J. of Tribology*. Vol. 115. 1993. pp. 15-19.