

## ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS CIRCULARES DURANTE LA INDENTACIÓN DE SISTEMAS RECUBIERTOS

### RESUMEN

Al someter un sistema recubierto al ensayo de indentación, frecuentemente se desarrollan esfuerzos y campos de deformación en las películas finas depositadas.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar los campos de esfuerzos que se desarrollan durante la indentación de los sistemas metálicos recubiertos con películas finas. Durante el proceso de indentación se consideró un indentador esférico, el cual aplica una carga de 50N sobre el sistema recubierto.

Los resultados fueron obtenidos utilizando el método de los elementos finitos (MEF) a través del software ABAQUS<sup>®</sup>, con una malla bidimensional axi-simétrica. Los resultados permitieron analizar la propagación de las grietas circulares en función de los esfuerzos desarrollados en la superficie de la película.

**PALABRAS CLAVES:** Método de los Elementos Finitos (MEF), películas Finas, Sistemas Recubiertos, Grietas Circulares.

### ABSTRACT

*High stresses and complex stress fields are usually developed in thin films deposited on the coated systems when they are submitted to indentation test.*

*This work was developed to study the stress fields obtained when the indentation test is conducted on coated materials systems. During the indentation, a spherical indenter was considered and applied normal load of 50 N on a system. The results were obtained using the finite element method (FEM), through the software ABAQUS<sup>a</sup>, using a axisymmetric bidimensional mesh.*

*The results allowed an analysis of the propagation of the circular cracks as a function of the stresses developed on the film surface.*

**KEYWORDS:** Finite Element Method (FEM); Thin Films; Coated Systems; Circular Cracks.

### 1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento mecánico de las películas finas depositadas sobre diferentes materiales, juega un papel muy importante en la durabilidad de los sistemas recubiertos. Frecuentemente la deposición de películas finas duras favorece el comportamiento tribológico de estos sistemas. Por ejemplo, películas finas y duras de material cerámico se usan como capas protectoras en aplicaciones mecánicas tales como en las herramientas de corte en los procesos de maquinado. Sin embargo, estas películas presentan un comportamiento frágil y una alta tendencia a la fractura o a las fallas en la interface película/substrato [1]

Un método simple para evaluar las propiedades mecánicas de estos sistemas es el ensayo de indentación. Este tipo de ensayo, utilizando diferentes tipos de indentador (esférico, cónico o piramidal), permite la evaluación de las características mecánicas de las películas y el comportamiento del sustrato [2-4]. Durante el ensayo de indentación se desarrollan esfuerzos de contacto, los cuales son un factor muy importante en el estudio del comportamiento tribológico de los sistemas recubiertos. Estos esfuerzos son los responsables de la fractura de la película depositada, la cual puede ser caracterizada por su morfología radial o circular [3-5].

El método de los elementos finitos (MEF) ha sido ampliamente utilizado para estudiar y evaluar los esfuerzos que se desarrollan durante la indentación de

### EDUARDO A. PÉREZ RUIZ

Ingeniero Mecánico, MSc  
Prof. del Depto de Ing. Mecánica  
Universidad de Ibagué (Colombia)  
epr@nevado.cui.edu.co

### ROBERTO MARTINS DE SOUZA

Ingeniero Mecánico, PhD  
Prof. del Depto de Ing. Mecánica  
Laboratório de Fenômenos de Superfície – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Brasil)  
robertosouza@poli.usp.br

sistemas recubiertos conteniendo películas finas [6-16]. Tradicionalmente los análisis son restringidos a la distribución de los esfuerzos durante la indentación, pero recientemente se estudia, con métodos propios del análisis numérico la presencia y propagación de grietas inicialmente distribuidas a lo largo de la superficie de la película [13,14].

En este trabajo, el número de grietas y la cantidad de propagación de las mismas se asoció a los picos de esfuerzos generados en la superficie del recubrimiento como resultado de la indentación realizada en estudio de los fenómenos de contacto.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En la figura 1, se presenta la malla del modelo utilizado en la simulación por el método de los elementos finitos (MEF). Para el análisis se utilizó el software para simulación ABAQUS®.

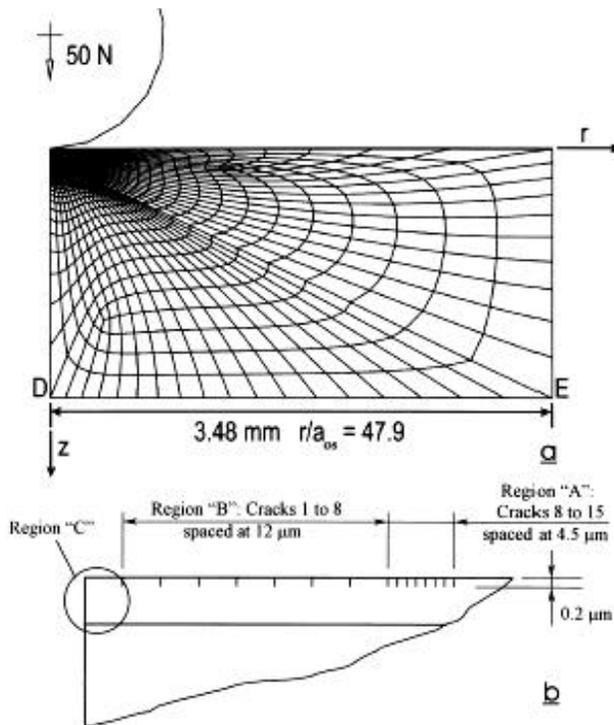


Figura 1. Malla utilizada durante los análisis usando el método de los elementos finitos: a) Vista general, b) Características de la región refinada [13]

En el estudio, se considera como rígido al indentador, mostrado en la figura 1.a, el cual aplica una carga normal de 50 N al sistema recubierto. Se seleccionó un diámetro de 1,59 mm (1/16 in.), el cual es el diámetro característico de los indentadores para ensayo de dureza Rockwell B y F.

La figura 1.b, muestra la región de la malla que fue refinada y en la cual se consideran grietas circulares.

En este modelo se asume al substrato con las características de una aleación de aluminio 6061 T6 con comportamiento elasto plástico.

Las propiedades elásticas y térmicas del aluminio (modulo elástico  $E=68,9\text{GPa}$ , modulo de Poisson  $\nu=0,33$ , coeficiente de expansión térmica  $\alpha=23,6\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ ) fueron obtenidas de trabajos anteriores [13-16]. La resistencia a la fluencia del material ( $\sigma_y=295\text{MPa}$ ) fue obtenida directamente de ensayos de tracción realizados en cuerpos de prueba de este tipo de aluminio [13]. Una consideración importante es que el software ABAQUS no requiere de cálculos previos del exponente de endurecimiento ( $n$ ) para definir el comportamiento plástico del material [17]

Se considera que la película fina resistente al desgaste tiene un comportamiento elástico y su espesor es de 4.6  $\mu\text{m}$ . El modulo de Poisson  $\nu=0,3$ , el modulo elástico  $E=280\text{GPa}$  y el coeficiente de expansión térmica  $\alpha=9,8\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ , los cuales han sido reportados como valores adecuados para el nitrato de titanio (TiN) [13], y han sido ampliamente utilizados en otros estudios [13-16]. El valor seleccionado para la tenacidad a la fractura ( $K_{IC}=4,0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ), es un poco mayor que el valor utilizado en trabajos anteriores [13], pero permanece en el intervalo de valores de tenacidad a la fractura de películas finas resistentes al desgaste.

El proceso de simulación se realizó en diferentes pasos de análisis. Inicialmente se induce un valor de esfuerzos biaxiales en los elementos de la película para considerar los esfuerzos resultantes del proceso de deposición, para esto, se seleccionó un valor de esfuerzo de compresión de 0,74GPa. El segundo paso realizado para cargar el sistema, considera los esfuerzos residuales que se generan en el proceso de enfriamiento del sistema. En el tercer paso se aplicó gradualmente la carga normal sobre un nodo de referencia del indentador.

En términos de los defectos, figura 1.b, se adoptó en este y en anteriores estudios [13,14], por considerarlo razonable, un tamaño inicial de grieta ( $c_0=0,2\mu\text{m}$ ). Durante la indentación, las grietas distribuidas en la superficie de la película tuvieron la libertad de propagarse en modo I en sentido perpendicular a la superficie y a la interface. El criterio de propagación de grietas establecido por el software ABAQUS fue el esfuerzo máximo, de acuerdo al cual, las grietas se propagan cuando es alcanzado un valor de esfuerzo máximo en la punta de éstas. Estudios anteriores [9], demuestran que el modo II de propagación de defectos tiene una gran influencia cuando el tamaño de la grieta excede 1/3 del espesor de la película. Sin embargo, para el tamaño inicial de grietas establecido, el modo II no

tiene ningún efecto sobre las 15 grietas inicialmente distribuidas sobre la superficie de la película.

Se realizó un análisis por medio de elementos finitos para obtener resultados de la cantidad de propagación de grietas y de la distribución de esfuerzos a lo largo de la superficie de la película.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 2 presenta la cantidad de grietas circulares que se propagaron durante la indentación del sistema recubierto.

Los resultados indican que para el valor seleccionado de tenacidad a la fractura ( $K_{IC}=4 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ ) el número de grietas que se propagó fue mínimo. Solamente las grietas ubicadas en la región cercana al borde de la indentación presentaron un incremento en la longitud establecida inicialmente.

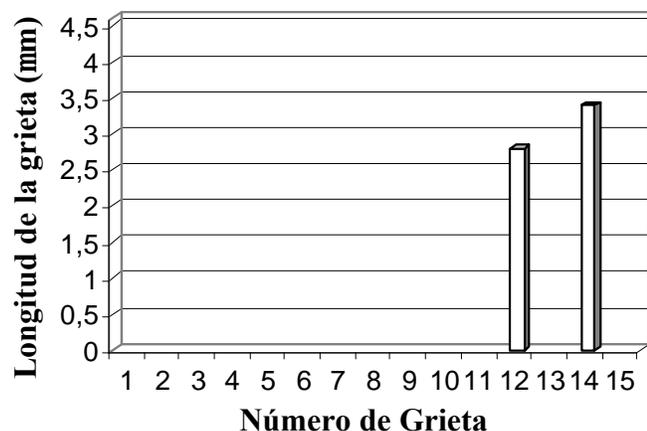


Figura 2. Número y longitud de grietas circulares que propagaron en la superficie de la película durante la indentación del sistema recubierto. Resultados obtenidos por simulación de elementos finitos.

La figura 3, presenta la distribución de esfuerzos radiales ( $\sigma_r$ ) causantes de la propagación de las grietas circulares, calculados en la superficie de la película durante el proceso de indentación.

La figura 3.a, muestra la distribución de esfuerzos radiales calculados a máxima carga (50 N). La figura 3.b, muestra la distribución de esfuerzos radiales calculados en el instante de liberar al sistema de la carga aplicada durante el proceso de indentación.

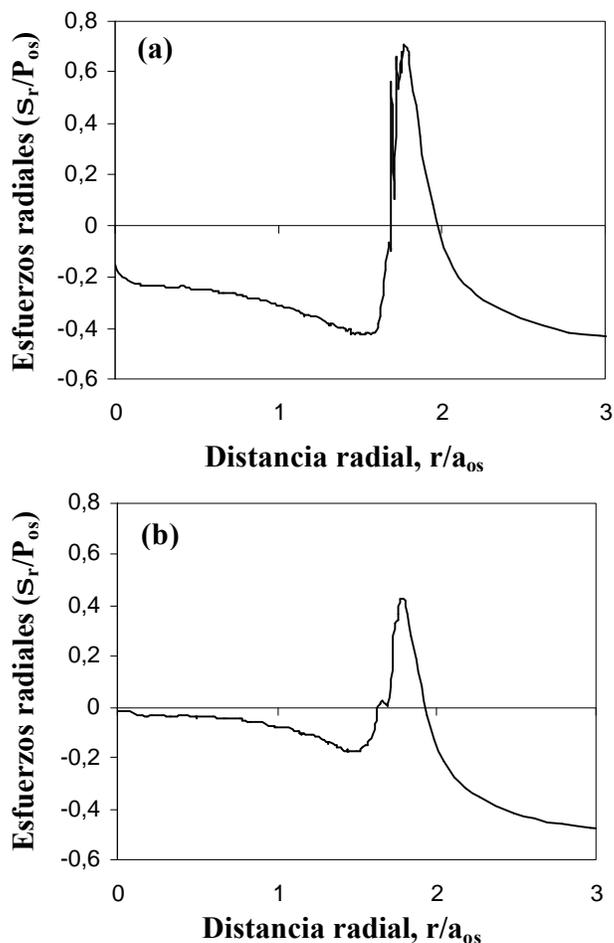


Figura 3. Esfuerzos radiales calculados en la superficie de la película durante la indentación del sistema recubierto: (a) Esfuerzos calculados a máxima carga, (b) Esfuerzos calculados en la descarga.

En todos los resultados, la distancia radial y los esfuerzos fueron normalizados, respectivamente por el valor del radio de contacto ( $a_{os}=72,7 \mu\text{m}$ ) y la máxima presión ( $p_{os}=4,51 \text{ GPa}$ ), obtenidos cuando un indentador esférico aplica una carga normal de 50 N sobre un sustrato de aluminio totalmente elástico [13,14].

La figura 4, muestra la distribución de esfuerzos tangenciales ( $\sigma_\theta$ ) calculados en la superficie de la película durante el proceso de indentación. Los esfuerzos tangenciales son los responsables por la propagación de las grietas radiales.

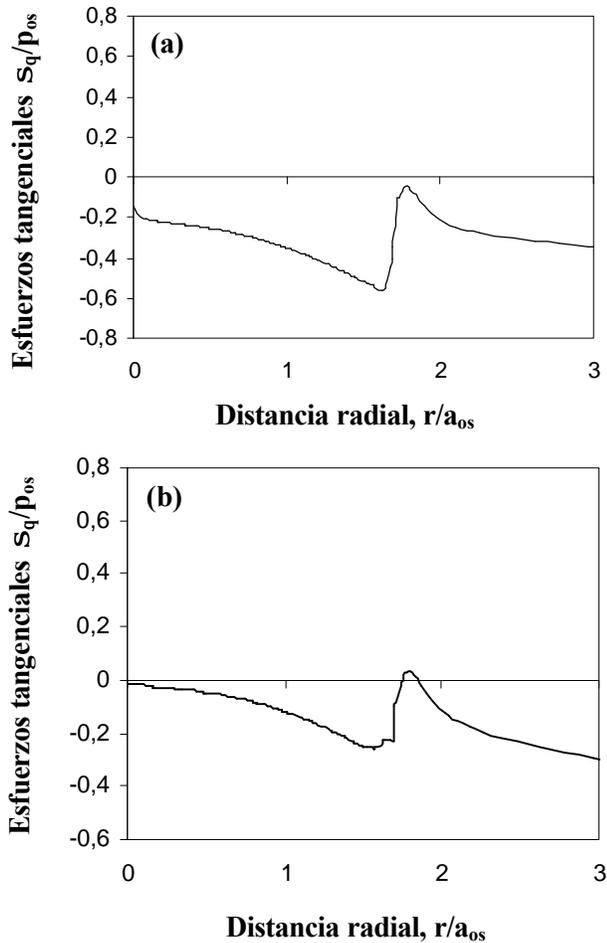


Figura 4. Esfuerzos tangenciales calculados en la superficie de la película durante la indentación del sistema: (a) Esfuerzos calculados a máxima carga; (b) Esfuerzos calculados durante la descarga.

La figura 4.a, muestra la distribución de esfuerzos tangenciales a lo largo de la superficie de la película a la máxima carga (50 N), alcanzada durante la indentación. La figura 4.b, muestra la distribución de esfuerzos tangenciales calculados en la superficie del película durante la liberación de la carga aplica al sistema recubierto.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa un valor pico en la distribución de esfuerzos radiales en la región cercana al borde de la indentación, esto lleva a establecer que la propagación de grietas de carácter circular, debe presentarse en esta zona, la cual se encuentra delimitando la curvatura de la cavidad generada por la indentación y el material que no sufrió deformación, tal como se observa en la figura 5. Según los resultados de esta figura, la región con el pico de esfuerzos radiales se encuentra gobernada por el fenómeno conocido como “sink-in”, el cual está fuertemente influenciado por las características elasto-plásticas del sustrato [8].

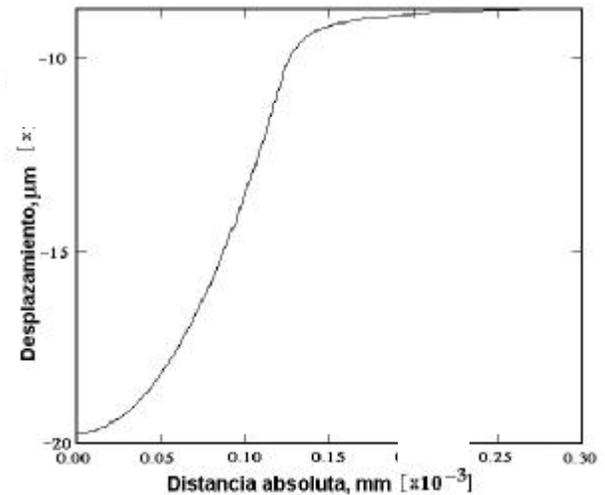


Figura 5. Profundidad de indentación producida en el sistema recubierto.

Al observarse las figuras 2 y 3 se puede deducir que los picos de esfuerzos radiales generados en la superficie de la película son en efecto los responsables de la propagación de las grietas cohesivas de carácter circular. Así mismo es interesante observar en la figura 4, el incremento del pico de esfuerzos tangenciales en la región cercana al borde de la indentación, cuando se descarga al sistema. Este resultado parece indicar que las grietas cohesivas de carácter radial tienen alta tendencia para su formación y posterior propagación durante la liberación de la carga normal aplicada en el proceso de indentación.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se utilizó el método de los elementos finitos para estudiar la correlación entre la distribución de esfuerzos radiales y la propagación de grietas circulares generadas en la superficie de una película fina durante la indentación de un sistema recubierto.

Los resultados demuestran la relación directa del número de grietas que se propagan durante la indentación con el pico de esfuerzos radiales que se presenta en la superficie de la película durante la deformación; también muestra que las grietas se localizan en la región más próxima al borde de la indentación.

Así mismo, los resultados obtenidos permiten ratificar que en la caracterización mecánica de las películas finas, Durante la indentación, la primera falla de carácter cohesivo que se genera es la grieta circular, mientras que las grietas del tipo radial son desarrolladas durante la descarga del sistema en el proceso de indentación.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABDUL-BAQI, A., VAN DER GIESSEN E., 2002, "Numerical analysis of indentation-induced cracking of brittle coatings on ductile substrate", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 1427-1442.
- [2] THOMSEN, N.B., FISCHER-CRIPPS, A.C., SWAIN, M.V., 1998, "Crack formation mechanisms during micro and macro indentation of diamond-like carbon coatings on elastic-plastic substrates", *Thin Solid Films*, Vol. 332, pp. 180-184.
- [3] MA, K.J., BLOYCE, A., BELL, T., 1995, "Examination of mechanical properties and failure mechanisms of TiN and Ti-TiN multiplayer coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 76-77, pp. 297-302.
- [4] SOUZA, R.M., MUSTOE, G.G.W., MOORE, J.J., 2001, "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, pp. 65-74.
- [5] KARIMI, A., WANG, Y., CSELLE, T., MORSTEIN, M., 2002, "Fracture mechanisms in nanoscale layered hard thin films", *Thin Solid Films*, Vol. 420-421, pp. 275-280.
- [6] KRAL, E.R., KOMVOPOULOS, K., BOGY, D.B., 1995, "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, pp. 20-28.
- [7] SCHWARZER, N., DJABELLA, H., RICHTER, F., ARNELL, R.D., 1995, "Comparison between analytical and FEM calculations for the contact problem of spherical indenters on layered materials", *Thin Solid Films*, Vol. 270, pp. 279-282.
- [8] GAN, L., BEN-NISSAN, B., BEN-DAVID, A., 1996, "Modelling and finite element analysis of ultra-microhardness indentation of thin films", *Thin Solid Films*, Vol. 290-291, pp. 362-366.
- [9] WEPPELMANN, E., SWAIN, M.V., 1996, "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, pp. 111-121.
- [10] HUBER, N., TSAKMAKIS, CH., 1998, "A Finite Element Analysis of the Effect of Hardening Rules on the Indentation Test", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 120, pp. 143-148
- [11] BOLSHAKOV, A., PHARR, G.M., 1998, "Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques", *Journal of Materials Research*, Vol. 13, pp. 1049-1058.
- [12] BEGLEY, M.R., EVANS, A.G., HUTCHINSON, J.W., 1999, "Spherical impression of thin elastic films on elastic-plastic substrates", *International Journal of Solids and Structure*, Vol. 36, pp. 2773-2788.
- [13] SOUZA, R.M., 1999, "Finite Element Modeling of Contact Stresses During the Indentation of Wear Resistant Coatings in Soft Substrates" PhD Thesis, Colorado School of Mines.
- [14] SOUZA, R.M., MUSTOE, G.G.W., MOORE, J.J., 1999, "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, pp. 303-310.
- [15] SOUZA, R.M., SINATORA, A., 2001, "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", 16<sup>th</sup> Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol. 3, Tribology, pp. 178-186.
- [16] PÉREZ R, E.A., SOUZA, R.M., 2003, "Finite element analysis on the effect of indenter diameter and load on the contact stresses during indentation of coated systems", *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, Vol. 20-21, pp. 763-768
- [17] ABAQUS Standard Version 5.7, Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, 1997.