

Simulación de esfuerzos Sxx durante repetidos ciclos de rayado sobre un sistema recubierto

Simulation of Sxx stresses in successive scratch cycles on a coated system

Eduardo A. Pérez-Ruiz, Luis Iván Negrín-Hernández, Roberto Martins-de-Souza

I. Universidad de Ibagué, Programa de Ingeniería Mecánica. Ibagué, Colombia

II. Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Facultad de Ingeniería Mecánica. Santa Clara. Cuba

III. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Engenharia Mecânica. São Paulo. Brasil

Correo electrónico: eduardo.perez@unibague.edu.co

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 4 de octubre de 2016

Aceptado: 17 de febrero de 2017

Resumen

El principal objetivo de este estudio se centró en analizar por elementos finitos el efecto que tiene la repetición de varios ciclos de rayado en el mismo surco sobre la superficie de un sistema recubierto, en el comportamiento del esfuerzo normal Sxx. Para esto, se desarrolló un modelo de simulación que reproduce el contacto y deslizamiento de una partícula rígida sobre la superficie de un sistema recubierto y que permite la imposición de esfuerzos residuales, aumento de carga de contacto y aumento del

coeficiente de fricción. Los resultados demuestran que el valor de esfuerzo obtenido en la superficie puede sobrepasar el valor de resistencia del recubrimiento en el primer ciclo de rayado, así como demuestran el papel protector que tienen los esfuerzos residuales en el recubrimiento.

Palabras claves: simulación MEF, ensayo de rayado, repetidos ciclos, esfuerzos.

Abstract

The main objective of this study is to analyze by finite elements simulation, the effect in the normal stress Sxx behavior, due the several scratching cycles development in the same groove at the surface of a coated system. For this reason, a simulation model was development to reproducing the contact and slip of a rigid particle on the surface of a coated system, allowing the imposition of residual stresses, increase of contact load and increase of the coefficient of friction. The results demonstrate the protective role of

the residual stresses in the coating, and demonstrate the importance of the increase of the normal load and the friction coefficient, which lead to obtain high level stresses along the scratch test.

Key words: FEM simulation, scratch test, successive cycles, stresses.

Introducción

Los métodos (existen más de 20 métodos) para evaluar la adhesión y las propiedades en sistemas recubiertos incluyen el ensayo de indentación, el cual ha demostrado ser más versátil que métodos como el ensayo de tracción, debido a su rapidez de respuesta y a los pocos requisitos requeridos para la elaboración de cuerpos de prueba. A través de este ensayo se pueden identificar propiedades como módulo elástico (E), esfuerzo de fluencia (σ_y), hasta la identificación y caracterización de modos de agrietamiento, dureza, y comportamiento mecánico en sistemas recubiertos multicapas [1].

Otro ensayo es el ensayo de rayado, el cual es realizado de forma experimental [2-4] y por simulación numérica [5,6] para analizar la resistencia a la adhesión y los modos de falla de recubrimientos duros ($HV \geq 5$ GPa) y finos (≤ 30 μ m), depositados sobre sustratos metálicos [7]. El ensayo permite establecer la relación de valores de carga normal con la generación de fallas en el sistema recubierto y entrega una medición cuantitativa de la carga necesaria para la falla de un recubrimiento depositado sobre un sustrato dúctil [4] o frágil [8,9]. Igualmente, es posible establecer la relación de falla con parámetros tradicionales de ensayo como geometría de indentador, tasa de carga, tasa de desplazamiento, propiedades mecánicas (elasto-plásticas) de los materiales, así como recientemente con el espesor del recubrimiento, rugosidad [10] entre otras.

De acuerdo con Bull [4], las fallas que se presentan en un recubrimiento duro pueden ser organizadas en tres categorías. La primera categoría se relaciona con el agrietamiento a lo largo del espesor de recubrimiento. Este modo de falla se presenta en el interior del surco e incluye agrietamiento por esfuerzos de tracción en la parte trasera del indentador, agrietamiento consecuencia del doblamiento de recubrimiento durante el rayado y el agrietamiento Hertziano. La segunda categoría se relaciona con la fragmentación, la cual puede ser por compresión o por pandeo del recubrimiento, fragmentación al frente del contacto con el indentador o fragmentación en la parte trasera del contacto con el indentador como consecuencia de la recuperación

elástica del recubrimiento. La última categoría se relaciona con el astillamiento y desprendimiento del recubrimiento. Este tipo de falla es observado en recubrimientos duros y gruesos depositados sobre sustratos duros.

El estudio de los modos de falla han sido abordados desde la realización de un único rayado, sin embargo, en la literatura se desconoce el efecto que representa la realización de varios ciclos de rayado en un único surco, sobre el agrietamiento superficial y posible propagación de grietas. De esta forma, el principal objetivo de este estudio se centró en analizar, vía simulación por elementos finitos, la influencia que tiene la realización de cinco ciclos de rayado en el mismo surco, en el comportamiento del esfuerzo Sxx a lo largo de la superficie del recubrimiento y la correspondencia con la falla superficial de un sistema recubierto.

Métodos y Materiales

El modelo de simulación desarrollado para el análisis por elementos finitos (ver Figura 1), considera un sistema recubierto, compuesto por un recubrimiento idealmente liso con características de TiN, espesor de 2 μm y propiedades elastoplásticas ($E = 500 \text{ GPa}$, $\nu = 0,25$, $\sigma_y = 6000 \text{ MPa}$), depositado sobre un sustrato con comportamiento elastoplástico ($E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$, $\sigma_y = 600 \text{ MPa}$). La totalidad de valores de las propiedades mecánicas presentadas anteriormente fueron tomados de la literatura expuesta en trabajos anteriores [11,12].

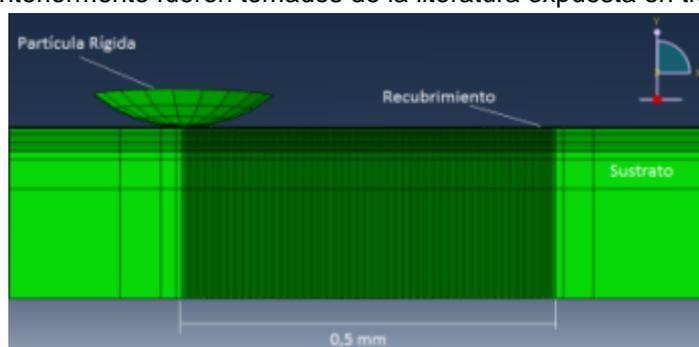


Fig. 1. Modelo de simulación del rayado de una partícula rígida sobre un sistema recubierto

El modelo considera el contacto de una partícula idealmente rígida con la geometría característica de un indentador Rockwell C (cono de 120° de apertura y radio de curvatura de 200 μm en la punta), sobre la cual se aplica una fuerza progresiva a lo largo de una distancia de rayado de 0,5 mm en la superficie del sistema recubierto. El modelo de simulación está conformado por 107136 elementos hexagonales de ocho (8) nodos para integración reducida (C3D8R) que permiten la simulación a través del software para análisis de elementos finitos ABAQUS. Igualmente el modelo desarrollado permite la imposición de valores de esfuerzo residual en el recubrimiento de -2GPa y -4GPa, así como carga normal de contacto de 2N y 5N y de coeficiente de fricción durante el rayado de 0 y 0,3.

Resultados y Discusión

De forma general, las fallas (grietas) que se presentan en los sistemas recubiertos, compuestos por recubrimiento frágil y por sustrato dúctil, son pequeñas y se concentran en el interior del surco generado durante el contacto [4,10]. De esta forma, por la naturaleza dúctil del sustrato simulado, es de importancia analizar el comportamiento del esfuerzo Sxx en la dirección del deslizamiento y a lo largo de la línea de contacto (ver Fig. 2), ya que este esfuerzo es el encargado principalmente del surgimiento de las grietas en el interior del surco de rayado. Por esta razón, en este estudio se considera el surgimiento de una grieta, cuando es alcanzado y sobrepasado el valor de resistencia de fluencia establecido para el recubrimiento (teoría de Falla del Esfuerzo Normal Máximo).

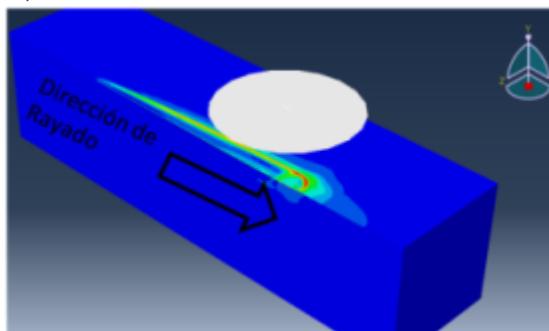


Fig. 2. Dirección de rayado para la obtención del esfuerzo Sxx

La figura 3, presenta la influencia que tiene el esfuerzo residual impuesto en el recubrimiento, sobre la distribución del esfuerzo S_{xx} en la superficie del sistema recubierto. En la figura 3a, se observa cómo, para el caso de rayado sin imposición de esfuerzo residual en el recubrimiento, el pico máximo de esfuerzo en la dirección S_{xx} alcanzó el valor de resistencia de fluencia impuesto al recubrimiento (6000 MPa), así mismo, en el caso de esfuerzo residual compresivo de 2GPa (Figura 3b) el pico máximo de esfuerzo alcanzó un valor de 5000 MPa y finalmente en el caso del esfuerzo residual de -4 GPa (Figura 3c), el pico máximo alcanzado en la superficie del sistema fue de 3500 MPa.

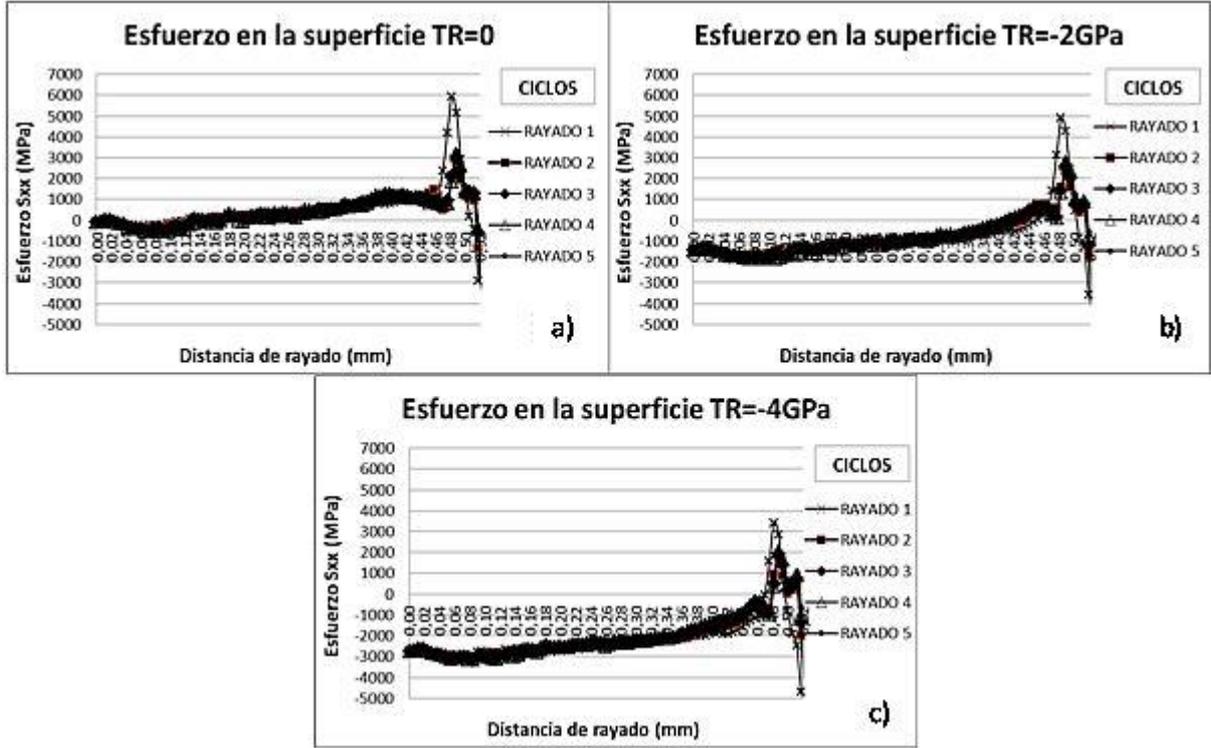


Fig. 3. Influencia del esfuerzo residual del recubrimiento en la distribución del esfuerzo S_{xx} en la superficie

En la figura 4, se presentan en detalle cada uno de los picos de esfuerzo S_{xx} obtenidos en cada ciclo de rayado. En todos los casos de las figuras 4a, 4b y 4c se observa que el máximo valor de esfuerzo S_{xx} es obtenido en el primer ciclo de rayado y los restantes ciclos alcanzan valores próximos entre ellos.

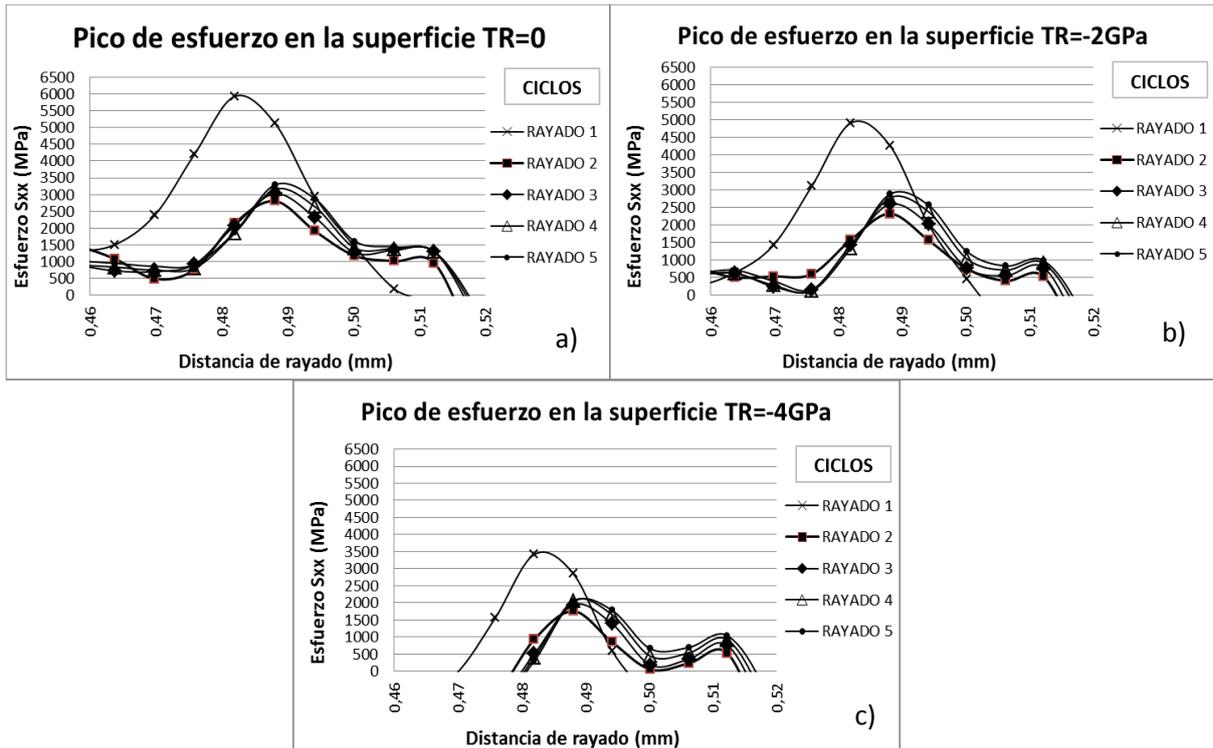


Fig. 4. Detalle del pico máximo de esfuerzo S_{xx} en la superficie, en función del valor del esfuerzo residual

La figura 5, presenta la distribución del esfuerzo Sxx en función del aumento de la carga de rayado. En la figura se identifica que con el aumento de la carga normal aumenta el valor del pico máximo de esfuerzo alcanzado, pasando de un valor de 6000 MPa en el caso de la fuerza progresiva de 2N, hasta el valor de 7000 MPa para el caso de la fuerza progresiva de 5N.

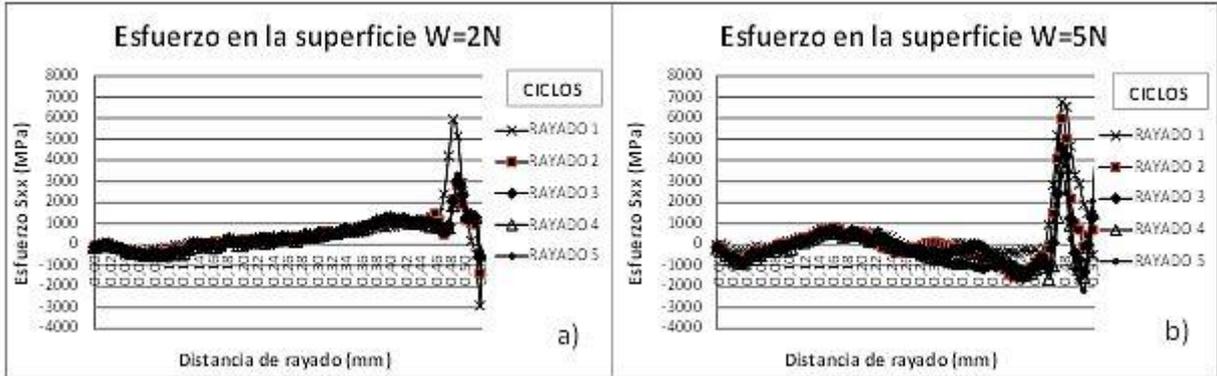


Fig. 5. Distribución de esfuerzo Sxx en la superficie, en función de la carga de rayado

La figura 6 presenta en detalle, el pico de esfuerzo alcanzando con el aumento de la carga normal de rayado. En la figura se observa que para el caso de carga normal de 2N, existe una diferencia aproximada de 3000 MPa entre el valor del primer ciclo y el valor alcanzado en los restantes ciclos (Figura 6a), mientras que en el caso de carga normal de rayado de 5N, se observa que la diferencia entre el valor máximo alcanzado en el primer ciclo y el valor alcanzado en el segundo ciclo es de 1000 MPa. Igualmente, y en comparación con la figura 6a, en la figura 6b se observa que existe diferencia en los valores obtenidos entre el segundo y el quinto ciclo de rayado.

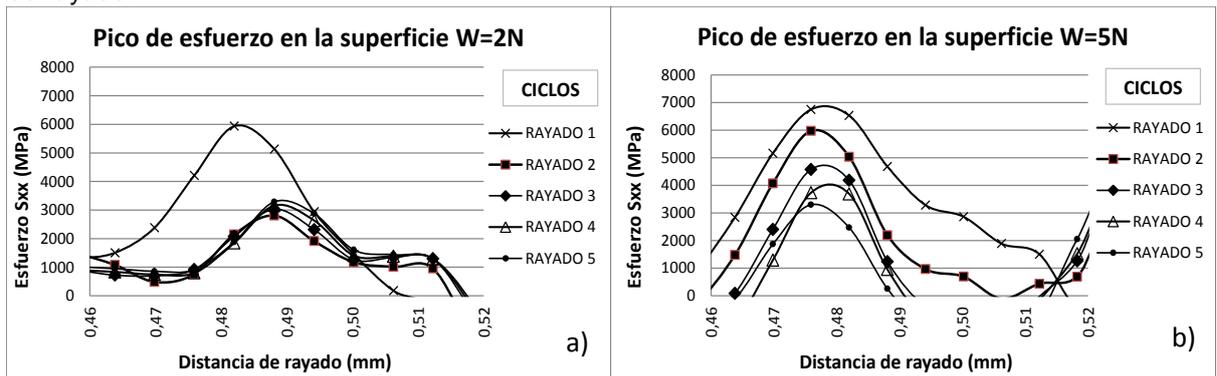


Fig. 6. Detalle del pico máximo de esfuerzo Sxx en la superficie, en función del aumento de carga

La figura 7 presenta la distribución de esfuerzo Sxx en función del coeficiente de fricción que actúa entre la superficie del indentador y la superficie del sistema recubierto. En la figura 7 se observa que el incremento en el coeficiente de fricción lleva al aumento en los valores de esfuerzo obtenidos en cada uno de los ciclos de rayado. De esta forma, en conjunto con la figura 8, se observa que, en el caso del coeficiente de fricción de 0,1 existe gran diferencia entre los picos de esfuerzo obtenidos en el primer (6000 MPa) y segundo ciclo de rayado (3300 MPa aproximadamente), mientras que en el caso del coeficiente de fricción 0,3 el máximo valor de esfuerzo Sxx es alcanzado en el primer y en el segundo ciclo de rayado con valor de 6800 MPa aproximadamente, existiendo una diferencia de 800 MPa con respecto al valor alcanzado en el tercer ciclo de rayado.

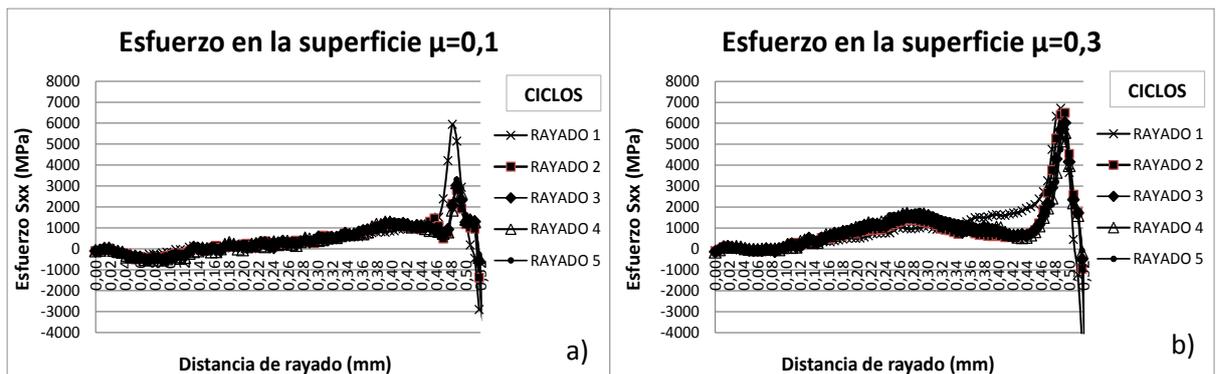


Fig. 7. Distribución de esfuerzo Sxx en la superficie en función del coeficiente de fricción

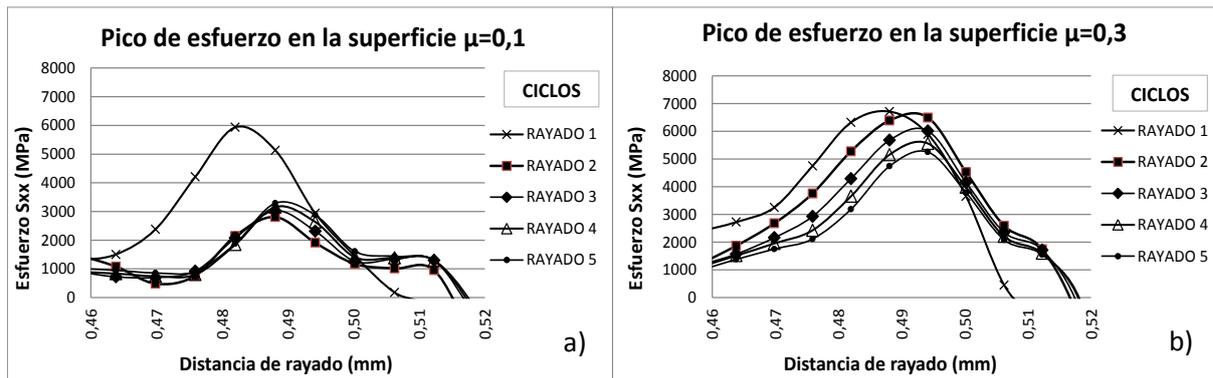


Fig. 8. Detalle del pico máximo de esfuerzo S_{xx} en la superficie, en función del coeficiente de fricción

Como ha sido presentado en cada una de las figuras anteriores, es posible identificar que el comportamiento de la distribución del esfuerzo S_{xx} a lo largo de la distancia de rayado, corresponde con el comportamiento de esfuerzos reportado mediante las simulaciones por elementos finitos, en donde debido a la carga aplicada y la formación del surco, son generados esfuerzos compresivos en la parte delantera del contacto del indentador con el sistema, así como esfuerzos de tensión en la parte trasera del contacto [11].

En el caso simulado bajo la menor carga de contacto, menor coeficiente de fricción y cero esfuerzo residual se observan valores compresivos del orden de 3000 MPa en la parte frontal del contacto y un pico de esfuerzo del orden de 6000 MPa en la región trasera del contacto con el indentador. Este pico es obtenido en el primer ciclo de rayado y alcanza el valor del esfuerzo de fluencia incorporado en el modelo para indicar la resistencia del recubrimiento, lo que sugiere alta posibilidad de surgimiento de fallas en la superficie del sistema recubierto.

De otro lado, cada una de las variables analizadas tiene relación con los esfuerzos alcanzados. De los resultados se evidencia la importancia que tiene el esfuerzo residual que se crea durante el proceso de deposición del recubrimiento al sustrato. Estos esfuerzos por su carácter compresivo ayudan a reducir el valor de esfuerzo de tracción sobre la superficie del sistema. Es así como, con el incremento del esfuerzo residual a -2GPa y -4GPa no es alcanzado el valor de esfuerzo de resistencia impuesto. Es importante detallar que en la figura 4, el primer ciclo condujo a la obtención del mayor valor de esfuerzo S_{xx} y que solo hasta el quinto ciclo fue obtenido el segundo mayor valor, lo que sugiere la necesidad de altos ciclos de rayado en el mismo surcopara la obtención y/o propagación de fallas.

En coincidencia de los resultados reportados por Holmberg [12], los resultados de las presentes simulaciones permiten ratificar la importancia de los esfuerzos residuales compresivos en el recubrimiento, ya que permiten la reducción de los valores de esfuerzos de tracción originados en la superficie. Sin embargo, al contrario de lo concluido por Holmberg et al [12], quienes sostienen que el efecto protector del esfuerzo residual es imperceptible en la región posterior al contacto con el indentador, sugiriendo una relajación y pérdida del esfuerzo compresivo durante el contacto, los resultados aquí demostrados sugieren un claro efecto permanente de los esfuerzos compresivos en la superficie después del contacto. Es así como en la figura 3, aunque parece existir una relajación del esfuerzo entre el primer y el segundo ciclo de carga en el pico de esfuerzo máximo, la superficie que estuvo en contacto retiene parte del valor compresivo impuesto.

Así mismo, se observa que el incremento en la carga de rayado lleva no solo al incremento del valor de esfuerzo alcanzado (7000 MPa) durante el primer ciclo de rayado, sino al posible surgimiento de nuevas fallas en el segundo ciclo. En la figura 8 (influencia del coeficiente de fricción) se identifica que en los tres primeros ciclos de rayado se obtienen valores de esfuerzo S_{xx} que sobrepasan el valor del esfuerzo del sistema en la superficie del recubrimiento. Estos resultados demuestran el efecto que tiene el incremento del coeficiente de fricción, estableciendo que este parámetro es el más crítico durante la obtención de esfuerzos S_{xx} en la superficie del sistema recubierto.

Finalmente, la existencia de limitaciones en la simulación numérica del ensayo de rayado, tales como la no inclusión de fenómenos presentes en los materiales, tales como anisotropía, defectos microestructurales, rugosidades interfaciales, entre otros, así como la inexistencia de reportes experimentales de modos de falla en función de ensayos cíclicos, impiden un acercamiento cuantitativo en el estudio de los fenómenos de contacto y falla de los sistemas recubiertos.

Una de las limitaciones de este trabajo es no tener referencias de simulaciones ni ensayos experimentales asociados con el efecto de la repetición de los ciclos de rayado en el mismo surco, sin embargo, es posible entender de forma cualitativa el efecto perjudicial que sugiere el aumento de la carga de rayado, al igual que el incremento en el coeficiente de fricción durante la evaluación de los sistemas recubiertos.

Conclusiones

Para los cinco ciclos de rayado considerados, únicamente los tres primeros llevaron al incremento de esfuerzos, lo que puede sugerir surgimiento y propagación de defectos.

Es posible concluir que el uso de altos valores de esfuerzo residual en el recubrimiento, llevan a la protección del sistema durante la acción de repetidos ciclos de rayado. Estos esfuerzos por su carácter compresivo permiten reducir la magnitud de los esfuerzos de tracción que se generan en la superficie del recubrimiento como consecuencia del contacto con el indentador. Sin embargo, el incremento de los ciclos de rayado no lleva al incremento en los valores de esfuerzo Sxx obtenidos en la superficie. Igualmente se evidencia que a diferencia de los reportes en la literatura no existe una total relajación del esfuerzo residual y por el contrario, la superficie conserva parte del esfuerzo residual impuesto.

Referencias

1. Zhou D, Peng H, Zhu L, et al. Microstructure, hardness and corrosion behaviour of Ti/TiN multilayer coatings produced by plasma activated EB-PVD. *Surf Coat Technol.* 2014;258:102-7.
2. Bull S, Berasetegui E. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing. *Tribology International.* 2006;39:99-114.
3. Lu P, Xiao X, Lukitsch M, et al. Interface characterizations of diamond-coated tools by scratch testing and simulations. *Surface & Coatings Technology.* 2011;206:1860-6.
4. Pagnoux G, Fouvry S, Peigney M, et al. Influence of scratches on the wear behavior of DLC coatings. *Wear.* 2015;330-331:380-9.
5. Fukumasu N, Souza R. Numerical evaluation of cohesive and adhesive failure modes during the indentation of coated systems with compliant substrates. *Surf Coat Technol.* 2014;260:266-71.
6. Meneses-Amador A, Jiménez-Tinoco L, Reséndiz-Calderon C, et al. Numerical evaluation of scratch tests on boride layers. *Surface & Coatings Technology.* 2015;284:182-91.
7. ASTM. Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing. ASTM C1624/05. USA: ASTM. 2012.
8. Favache A, Charles-Henry S, Coulombier M, et al. Fracture mechanics based analysis of the scratch resistance of thin brittle coatings on a soft interlayer. *Wear.* 2015;461-468:380-9.
9. Ghabchi A, Sampath S, Holmberg K, et al. Damage mechanisms and cracking behavior of thermal sprayed WC-CoCr coating under scratch testing. *Wear.* 2014;313:97-105.
10. Pérez E, Negrin L, Souza R. Influencia del espesor y la rugosidad interfacial en los esfuerzos longitudinales en un sistema recubierto. *Ingeniería Mecánica.* 2016;19(3):103-9.
11. Holmberg K, Laukkanen A, Ronkainen H, et al. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface Part II: Material deformations, influence of coating thickness and Young's modulus. *Surface & Coatings Technology.* 2006;200:3810-23.
12. Holmberg K, Ronkainen H, Laukkanen A, et al. Residual stresses in TiN, DLC and MoS₂ coated surfaces with regard to their tribological fracture behavior. *Wear.* 2009;267:2142-56.