

Estudio de la nanoindentación de recubrimientos delgados SiO₂-TiO₂

Alejandra I. Vallejo Martínez^A, Luis A. Reyes Osorio^B, Iván Eleazar Moreno Cortéz^A, Luis López Pavón^A

^AUniversidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

^BUniversidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, Apodaca, Nuevo León, México.

luis.reyessr@uanl.edu.mx, ivan.morenocr@uanl.edu.mx, luis.lopezpv@uanl.edu.mx,

Autor de correspondencia: alejandra.vallejom@uanl.edu.mx,

RESUMEN

Las aleaciones de aluminio son ampliamente utilizadas en aplicaciones estructurales debido a sus buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, presentan limitaciones en resistencia al desgaste y a la corrosión. En este trabajo, se propone el uso de recubrimientos de SiO₂-TiO₂ aplicados mediante la técnica sol-gel para mejorar el comportamiento mecánico y electroquímico de la aleación Al 6061-T6. Se realizaron ensayos de nanoindentación sobre películas depositadas, obteniéndose un incremento del 15.49% en el módulo de elasticidad respecto al sustrato sin recubrimiento. Paralelamente, se desarrolló un modelo numérico basado en elementos finitos (FEM) con geometría axisimétrica 2D para la predicción del proceso de nanoindentación y su distribución de esfuerzos y deformaciones. Los resultados simulados mostraron una buena aproximación con las pruebas experimentales, validando el enfoque computacional como herramienta útil para estudiar el comportamiento mecánico de recubrimientos delgados. Este enfoque integrado ofrece una metodología integral para evaluar la viabilidad de recubrimientos funcionales sobre aleaciones ligeras en aplicaciones aeronáuticas.

PALABRAS CLAVE

Nanoindentación, aluminio 6061-T6, SiO₂-TiO₂, Análisis de Elementos Finitos.

ABSTRACT

Aluminum alloys, particularly Al 6061-T6, are widely used in structural applications due to their remarkable mechanical properties. However, their relatively low hardness and corrosion resistance limit their use in aggressive environments. To address these drawbacks, this study investigates the deposition of SiO₂-TiO₂ thin films on Al 6061-T6 substrates using the sol-gel method to enhance their mechanical and electrochemical performance. Nanoindentation tests were conducted to determine hardness and elastic modulus. Additionally, a finite element model (FEM) was developed to simulate the nanoindentation process using an axisymmetric 2D geometry. The experimental results revealed an elastic modulus of 79.69 GPa for the coated system, indicating a significant improvement over the uncoated substrate. The numerical simulation successfully replicated the experimental load-displacement curves and provided insights into the stress distribution and deformation mechanisms. This combined experimental-numerical approach offers a robust methodology for analyzing the mechanical behavior of thin films and contributes to the optimization of protective coatings for lightweight structural materials.

KEYWORDS

Nanoindentation, aluminum 6061-T6, SiO₂-TiO₂, Finite Elements Analysis.

INTRODUCCIÓN

El aluminio y sus aleaciones han sido objeto de creciente interés debido a su combinación única de ligereza, alta conductividad térmica y eléctrica, así como su buena capacidad de conformado.¹⁻⁴ Sin embargo, su relativa baja dureza, resistencia al desgaste y, en algunos casos, su sensibilidad a la corrosión,⁵ han motivado el desarrollo de recubrimientos funcionales que puedan mejorar su desempeño en condiciones extremas, sobre todo durante su uso en la industria aeroespacial, automotriz y electrónica.

El titanio y sus aleaciones se han popularizado como componentes estructurales debido a sus buenas propiedades mecánicas, así como su resistencia a la corrosión.⁴ Sin embargo, los altos costos y la dificultad que presenta su manufactura suponen severas limitaciones para su uso extendido. Por estas razones, la posibilidad de realizar recubrimientos de titanio en componentes y estructuras de aluminio se presenta como una alternativa prometedora para lograr un equilibrio entre las características mencionadas anteriormente.

Como se mencionó anteriormente, uno de los principales problemas relacionados con el uso de aleaciones de aluminio es su baja resistencia a la corrosión. La deposición de materiales sobre sustratos de aluminio con el objetivo de mejorar sus propiedades electroquímicas ha sido estudiada ampliamente. En este sentido, el dióxido de titanio (TiO₂) se destaca por ser un excelente material anticorrosivo debido a su estabilidad química, resistencia térmica y baja conductividad. En la actualidad, el TiO₂ se emplea en la protección por recubrimiento contra la corrosión en metales utilizando diferentes técnicas de deposición.⁶

En este marco, la técnica de nanoindentación se presenta como una herramienta versátil y precisa para evaluar las mejoras mecánicas inducidas por este tipo de recubrimientos.⁵ Esta técnica ha adquirido relevancia como parte esencial en la caracterización de las propiedades mecánicas de este tipo de recubrimientos a micro y nanoescala, permitiendo evaluaciones precisas sin comprometer la integridad estructural. Sin embargo, esta técnica no proporciona información de los mecanismos de deformación inducidos por la indentación, ni la distribución de esfuerzos dentro del sistema recubrimiento/sustrato que, desde un punto de vista práctico, es de relevancia para evaluar el estado de esfuerzos durante el desarrollo de recubrimientos. Desde esta perspectiva, el modelado por elementos finitos (FEM) se presenta como una herramienta complementaria, no únicamente para la determinación de las propiedades mecánicas de películas delgadas, sino también para el análisis de la distribución de esfuerzos dentro del sistema y su interfaz durante el proceso de nanoindentación, algo conveniente al momento de explicar la formación de grietas y el fenómeno de delaminación.⁷

Sin embargo, la simulación del proceso de nanoindentación suele ser un proceso complejo debido a su comportamiento no lineal. Asimismo, la rugosidad superficial influye significativamente en los resultados de nanoindentación. La rugosidad puede generar errores en la estimación del área de contacto, la dispersión de resultados y el inicio de plastificación local. Recientemente, Cheng *et al.*⁸ combinaron pruebas experimentales de nanoindentación con un análisis FEM axi-simétrico en 2D. La parte experimental permitió determinar propiedades mecánicas del sistema, como el módulo de elasticidad, la dureza y las curvas de carga-desplazamiento (P-h). Por su parte, el análisis FEM se utiliza para predecir las curvas de carga-desplazamiento y dureza-profundidad.⁹ En este sentido, el presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un modelo numérico capaz de reproducir el comportamiento de carga-descarga durante el proceso de nanoindentación. Las simulaciones desarrolladas permitieron replicar con precisión las principales características observadas en los experimentos de nanoindentación, validando su viabilidad como una herramienta para estudiar la deformación mecánica de películas delgadas de SiO₂-TiO₂ depositadas sobre sustratos de aluminio Al 6061-T6. Este enfoque computacional, aporta una contribución significativa al entendimiento del comportamiento mecánico de recubrimientos nanoestructurados SiO₂-TiO₂.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se fabricaron y seccionaron muestras de Al 6061-T6 con medidas de 25 mm x 25 mm y 7 mm de espesor. Las piezas se pulieron para obtener un acabado superficial adecuado. Se utilizó espectroscopia de energía dispersa (EDS) para obtener la composición química de los principales elementos que conforman la aleación de aluminio Al 6061-T6: Al 85.45%, Mg 3.1%, Zn 6.15%, Cu 5.25%. El sustrato se caracterizó morfológicamente con un microscopio óptico ZEISS Observer Z1 y también se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6510LV para determinar la morfología a nanoescala de los recubrimientos de SiO₂-TiO₂.

Los recubrimientos se desarrollaron mediante el proceso sol-gel.¹⁰ Se utilizó tetraetoxisilano (TEOS) de Sigma Aldrich y etanol (EtOH) de Baker en una proporción de 1:1. Posteriormente, se añadió agua desionizada y ácido nítrico, como catalizador, además de 3% en peso de nanopartículas de SiO₂-TiO₂ previamente funcionalizadas. La mezcla se agitó hasta completar la hidrólisis. Para depositar el recubrimiento sobre el sustrato de aluminio 6061-T6, se utilizó la técnica de recubrimiento por inmersión con una velocidad de 0.125 mm/seg. Después de la deposición, las muestras recubiertas se secaron a 180 °C durante 10 minutos, para permitir la evaporación de los disolventes. Finalmente se sometieron a un tratamiento térmico a 300 °C durante dos horas, con el objetivo de densificar y eliminar las imperfecciones en el recubrimiento.

El análisis superficial desarrollado se basó en el valor de la rugosidad media (Ra) medida en micrómetros entre los puntos analizados. Las películas de SiO₂-TiO₂ se analizaron sobre sustratos de Al 6061-T6, registrando mediciones de espesor mediante la técnica de escalón para evaluar el espesor promedio. Las mediciones de rugosidad y espesor de las películas de SiO₂-TiO₂ se realizaron mediante un perfilómetro Brucker Contour GT, permitiendo medir el espesor para cada punto en el campo de visión, destacando las variaciones de espesor y uniformidad a lo largo de un área de hasta 50 mm². Adicionalmente, se registró la morfología tanto de la superficie de la película como del sustrato.

Los ensayos de nanoindentación se realizaron en un nanoindentador CSM Instruments NHTX S/N: 50-00191, se utilizó una punta de diamante tipo Berkovich y se seleccionó una profundidad mínima de resolución de 0.04 µm, los parámetros en los ensayos se muestran en la tabla I. Para la estimación de las propiedades de las películas delgadas de SiO₂-TiO₂ se seleccionaron aquellos valores en los que el nanoindentador no superó más del 20% del espesor del recubrimiento, evitando así la interferencia del sustrato. Se buscó que la penetración del nanoindentador en el recubrimiento estuviera entre 100 y 250 nm, tomando en consideración que la profundidad de penetración debe ser del 10% al 25% del espesor del recubrimiento para evitar la interferencia del sustrato.¹¹

Tabla I. Parámetros utilizados durante las pruebas de nanoindentación.

Parámetros Nanoindentación	
Carga máxima (mN)	5
Velocidad de carga (mN/min)	10
Velocidad de descarga (mN/min)	10
Tiempo de estancia (seg)	2

METODOLOGÍA OLIVER Y PHARR

El método de Oliver y Pharr¹¹ es una técnica ampliamente utilizada para analizar datos de nanoindentación y determinar propiedades mecánicas como dureza (H) y módulo de elasticidad reducido (Er) a partir de curvas carga-desplazamiento, ver figura 1. El método se basa en extraer H y Er de la curva de descarga en nanoindentación, asumiendo que la respuesta inicial del material durante la descarga es elástica y que la geometría del indentador puede aproximarse a un cono equivalente.

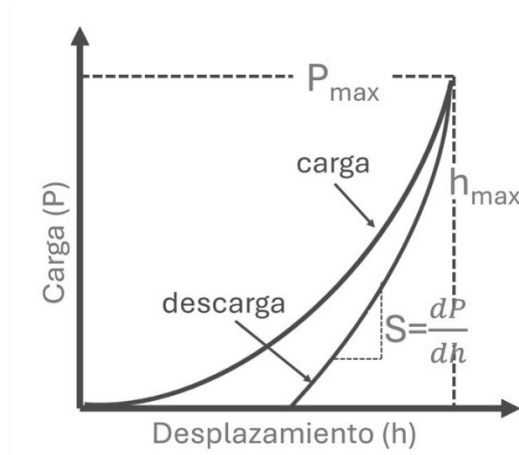


Fig. 1 ilustración de la curva de carga-desplazamiento durante nanoindentación.

Se obtuvo el módulo de elasticidad del recubrimiento de SiO₂-TiO₂ utilizando la metodología propuesta por Oliver y Pharr. Los pasos de esta metodología incluyen:

1. Obtención de la curva carga-desplazamiento. Se aplica una carga P al indentador y se registra el desplazamiento h en la muestra. Se obtiene una curva de carga y descarga (ver la figura 1). El punto más alto de la curva representa la carga máxima P_{max} y la profundidad máxima h_{max} .
2. Determinación de la pendiente de descarga inicial (rigidez del contacto). La pendiente de la curva de descarga justo al inicio del retiro de la carga (en P_{max}) se denomina rigidez S , y se obtiene como:

$$S = \left. \frac{dP}{dh} \right|_{h=h_{max}} \quad (1)$$

3. Cálculo de la profundidad de contacto h_c . Se estima usando la siguiente expresión:

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (2)$$

donde ε depende de la geometría del indentador (para indentador tipo Berkovich, $\varepsilon \approx 0.75$)

4. Cálculo del área de contacto proyectada $A(h_c)$. Se usa la geometría del indentador para relacionar h_c con el área de contacto. Para un indentador Berkovich ideal:

$$A(h_c) = 24.5h_c^2 \quad (3)$$

5. Cálculo del módulo reducido E_r . A partir de la rigidez y el área de contacto:

$$E_r = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{S}{\sqrt{A(h_c)}} \quad (4)$$

6. Obtención del módulo de elasticidad del material E . Si se conoce el módulo del indentador E_i (para diamante $E_i = 1141$ GPa) y su coeficiente de Poisson ν_i , se aplica la fórmula:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (5)$$

Despejando E , y conociendo la razón de Poisson del material, el módulo de elasticidad del material se obtiene corrigiendo el efecto del indentador.

MODELO NUMÉRICO

Se desarrolló un modelo numérico en ANSYS Mechanical APDL para investigar el comportamiento de deformación inducido por el proceso nanoindentación en películas delgadas $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ sobre el sustrato de aluminio 6061-T6. El modelo de elementos finitos incluye la interacción de la película-sustrato. La simulación no sólo permitió observar el comportamiento de las curvas carga-desplazamiento (P - h), sino que además mostró información de las zonas de esfuerzo y de deformación, así como el perfil de indentación. Con la finalidad de simular correctamente el fenómeno de nanoindentación, se realizó un análisis de contacto utilizando elementos objetivo en la superficie del recubrimiento y elementos de contacto en la superficie interna del indentador. La geometría del modelo se simplificó a un modelo 2D, y se propuso que el ancho y el espesor del sustrato de Al 6061-T6 fueran de 10,000 y 7,000 nm, respectivamente, con un grosor de la película delgada de $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ de 1,000 nm. Estos valores se especificaron de acuerdo con los parámetros de los especímenes fabricados para las pruebas experimentales de nanoindentación. Las simulaciones se realizaron con un indentador cónico axisimétrico 2D, equivalente a un indentador Berkovich. Las características del indentador simulado se consideraron con base en las propiedades del diamante y dimensiones de 2,500 nm de altura y 3,700 nm de ancho. Para definir el modelo axisimétrico, se consideró un ángulo de 68° que tuviera la misma superficie de contacto que el indentador Berkovich utilizado en las pruebas experimentales. La tabla II muestra las propiedades mecánicas del indentador, recubrimiento $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ y sustrato de Al 6061-T6.

Tabla II. Propiedades de los materiales utilizados durante las pruebas de nanoindentación.

Material	Módulo de Young (E)	Razón de Poisson (ν)
Diamante	1,141,000 MPa	0.07
$\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$	81,171 MPa	0.265
Al 6061-T6	69,000 MPa	0.33

La figura 2 presenta un esquema de las geometrías y condiciones de frontera del modelo numérico desarrollado.

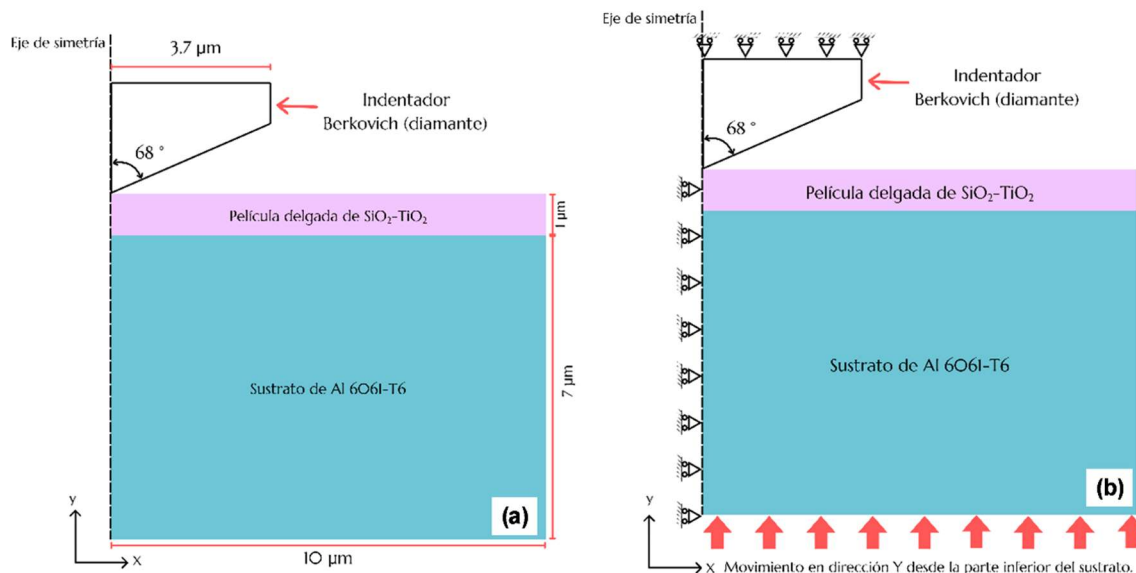


Fig. 2. (a) Representación de la geometría del modelo y (b) condiciones fronteras y de carga con un indentador tipo Berkovich.

El desarrollo del modelo numérico considera las condiciones frontera de la figura 2 (b). En este caso, se restringió el movimiento del sistema en todas las direcciones para el nanoindentador, mientras que para la superficie inferior del sustrato solo se permitió movimiento en la dirección del eje Y,

restringiendo el movimiento en el eje X y Z. Por consecuencia, la superficie de la película se presionó contra la superficie inferior del nanoindentador, que es donde se llevó a cabo la interacción entre los elementos de contacto y los elementos objetivo. Adicionalmente, no fue considerado algún efecto de fricción en esta interacción.

La simulación de nanoindentación se llevó a cabo utilizando intervalos de desplazamiento, cada uno de los cuales se generó y guardó en un archivo destinado estrictamente para contener esta información, por lo que es posible obtener datos de las fases de carga y descarga. El tamaño del intervalo para las fases de carga y descarga fue de 0.04 μm y 0.03 μm , respectivamente. Todos los materiales se modelaron utilizando elementos del tipo SOLID185. Para el discretizado del sistema se utilizó una malla cuadrangular con un total de 4859 elementos, la distribución de malla seleccionada permitió optimizar el tiempo de cálculo durante las iteraciones numéricas. Otra consideración propuesta para este modelo es el comportamiento elástico-plástico de los componentes que forman parte del sistema. En el caso de la película delgada de SiO₂-TiO₂, se especificó su comportamiento como elástico perfectamente plástico, mientras que el nanoindentador tipo Berkovich y el sustrato de Al 6061-T6 se establecieron como elásticos. Finalmente, para generar una comparativa de los resultados, se incluyó en la programación del código los datos obtenidos experimentalmente en las pruebas de nanoindentación, en particular el módulo de elasticidad promedio y un valor estimado para la razón de Poisson.

RESULTADOS

Se generó un análisis metalográfico del Al 6061-T6 en la evaluación de la influencia del sustrato en los recubrimientos nanoestructurados de SiO₂-TiO₂. La figura 3(a), tomada a 50 aumentos, muestra la superficie del Al 6061-T6 con una estructura dendrítica equiaxial. La figura 3(b), tomada a 200 aumentos, presenta zonas más claras con una mayor concentración de Al. Las regiones predominantes, circuladas en rojo, muestran los precipitados que se encuentran en los límites de grano, alrededor de los brazos dendríticos y las zonas oscuras con forma de bastones (llamados precipitados metaestables semi-coherentes). Ambos tipos de precipitados tienden a aumentar de tamaño tras el tratamiento térmico, por lo que se localizan en toda la región de la muestra, no sólo en determinadas zonas.

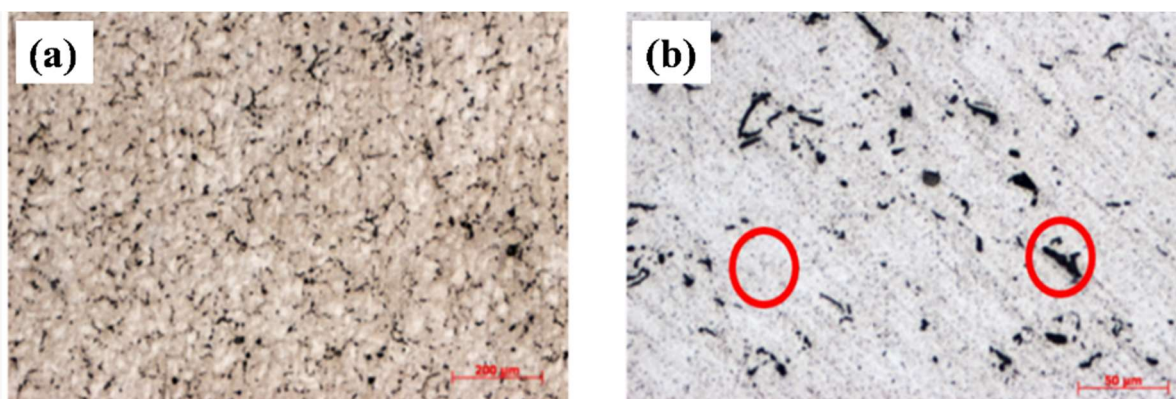


Fig. 3. Microestructura de la aleación de aluminio Al 6061-T6 (a) a 50 aumentos, (b) a 200 aumentos.

La figura 4 muestra las mediciones EDS del recubrimiento, se filtró de tal manera que sólo se observaran los componentes principales del recubrimiento y del sustrato. Se puede observar altos contenidos de Si y O debido a la base de recubrimiento SiO₂. También se puede observar una pequeña cantidad de Ti debido a las nanopartículas de TiO₂ contenidas en la matriz sol-gel de SiO₂-TiO₂.

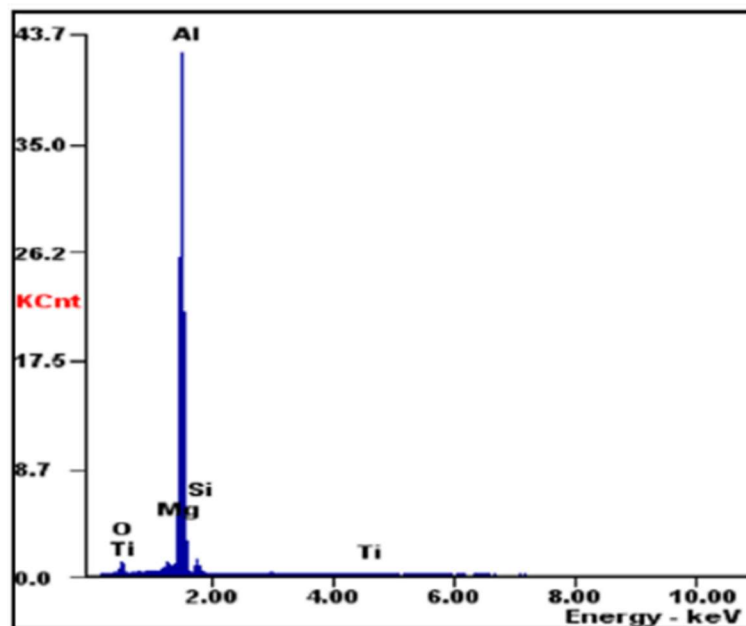


Figura 4. Mediciones EDS del $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$

El análisis superficial se realizó sobre las muestras recubiertas con $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$. La Figura 5(a) muestra el recubrimiento Al 6061-T6 con una rugosidad media de $2.198 \mu\text{m}$, ésta se determinó con base en la escala colorimétrica. La figura 5(b) presenta un espesor promedio de $1.12 \mu\text{m}$ en las muestras recubiertas.

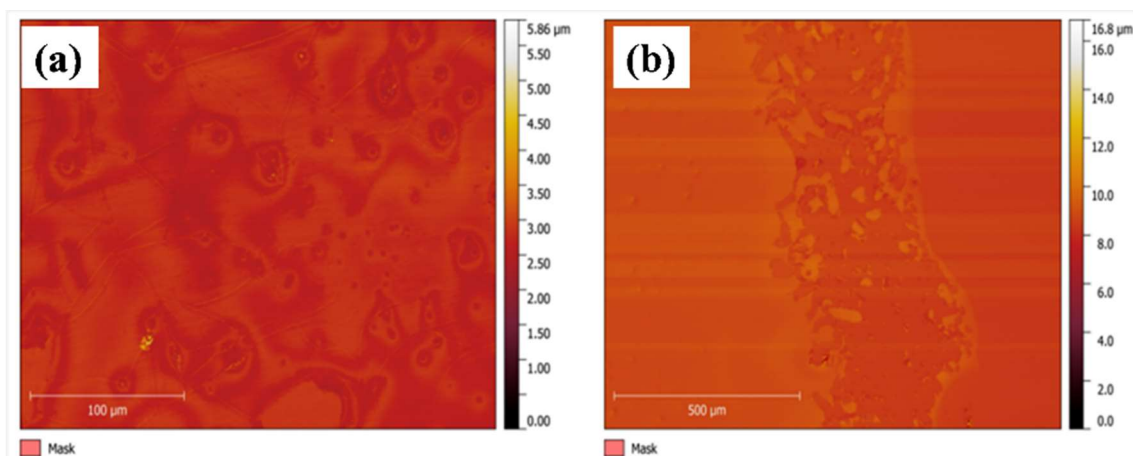


Fig. 5. (a) Rugosidad superficial y (b) espesor del recubrimiento $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ sobre sustrato de Al 6061-T6.

Los ensayos de nanoindentación se realizaron sobre las muestras recubiertas para obtener el valor de dureza y el módulo elástico. En la Figura 6 se presentan las curvas de carga-desplazamiento (P-h) de los datos que cumplieron con los criterios de penetración máxima. Considerando que el espesor del recubrimiento es de aproximadamente $1 \mu\text{m}$, la penetración en el recubrimiento se consideró entre 100 y 250 nm según el método de Oliver y Pharr.¹¹ En este caso, se restringió la penetración máxima a 200 nm, para la selección de datos a partir de las pruebas de nanoindentación. Se puede observar en la curva de carga-descarga del recubrimiento que tiene un comportamiento diferente entre sí, lo que indica que la deformación generada por la indentación es elástica-plástica sin apilamiento alrededor de la indentación. Las curvas de nanoindentación mostraron una pendiente elevada, lo que indica un incremento de dureza del material con respecto al sustrato.

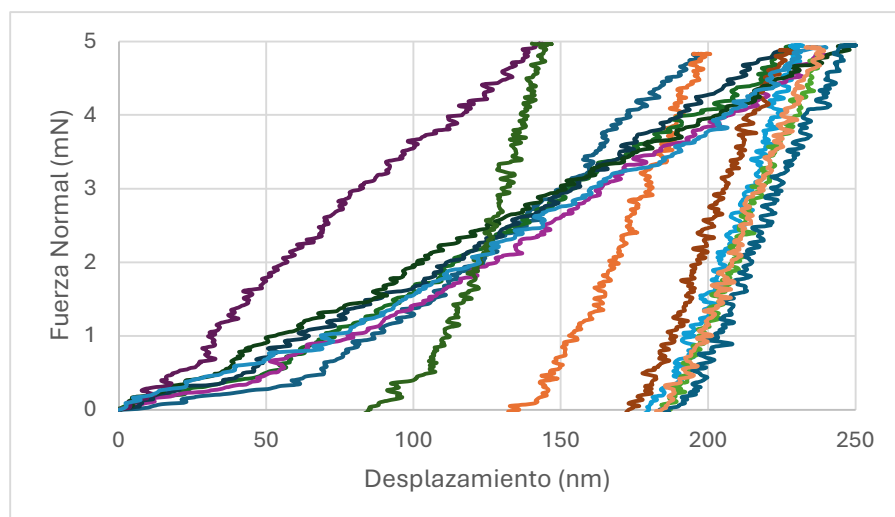


Fig. 6. Gráficas experimentales de carga vs. desplazamiento del Al 6061-T6 recubierto con SiO₂-TiO₂

La aleación 6061-T6 se ha reportado con un módulo de elasticidad de 69 GPa y una dureza de 0.124 GPa.^{12,13} De acuerdo con nuestras pruebas experimentales de nanoindentación, se registró un módulo de elasticidad promedio de 79.69 GPa y una dureza promedio de 3.31 GPa para los recubrimientos. Según Ohring,¹⁴ las películas delgadas pueden aumentar entre un 60 y un 120% el módulo de Young. En este caso, el módulo de Young del recubrimiento SiO₂-TiO₂ incrementó 15.49%. La figura 7 muestra los resultados numéricos del desplazamiento total en el eje Y durante el proceso de nanoindentación de la película nanoestructurada de SiO₂-TiO₂.

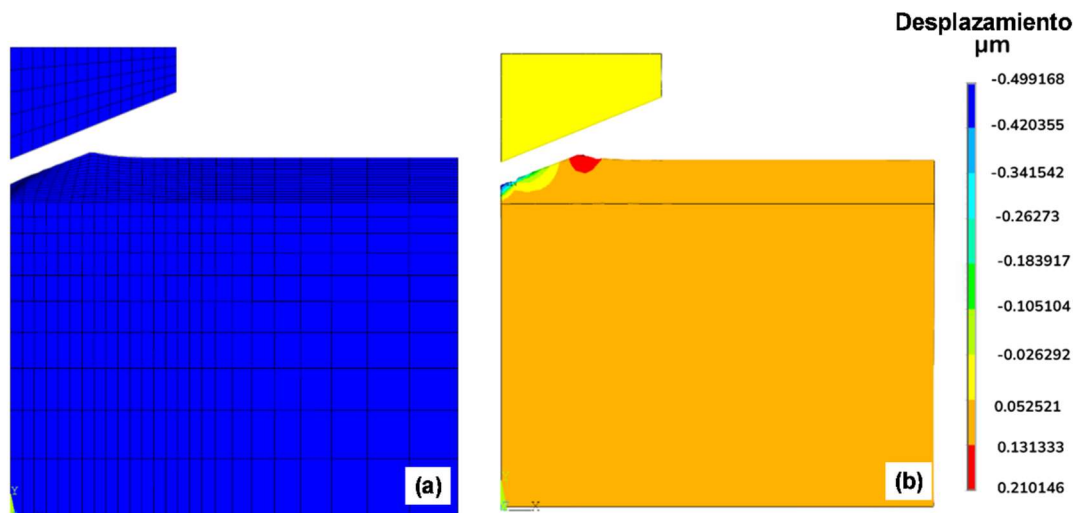


Fig. 7. Modelo de recubrimiento SiO₂-TiO₂ sobre Aluminio 6061-T6. (a) Resultados de deformación y (b) desplazamiento total en el eje Y.

Un primer aspecto por destacar en los resultados es la acumulación de material alrededor de la huella de indentación, que se manifiesta en forma de un pico o abultamiento. Este fenómeno, conocido como apilamiento, es común en ensayos de nanoindentación, particularmente cuando el material presenta una relación alta entre el módulo de elasticidad y la dureza (E/H), o cuando existe una limitada capacidad de deformación plástica. En este caso, el recubrimiento de SiO₂-TiO₂ exhibe una dureza experimental promedio de 3.31 GPa, considerada intermedia para películas delgadas, lo que favorece este tipo de deformaciones superficiales. La formación de apilamiento puede afectar

significativamente la precisión de los parámetros extraídos, ya que incrementa el área de contacto real entre el indentador y la muestra, lo que debe tenerse en cuenta en futuros experimentos al estimar la dureza y el módulo de elasticidad.

Además, en los perfiles de desplazamiento se identifican claramente los valores máximos y mínimos de penetración del indentador durante los ciclos de carga y descarga. Esta información es esencial para la aplicación del método de Oliver y Pharr, ya que permite determinar la profundidad de contacto efectiva y, con ello, calcular con mayor precisión propiedades mecánicas como la dureza (H) y el módulo de elasticidad reducido (Er).

La simulación se llevó a cabo mediante intervalos de desplazamiento, permitiendo generar gráficos de carga-descarga y posteriormente obtener el módulo de elasticidad del recubrimiento de SiO₂-TiO₂ por medio de la metodología propuesta por Oliver y Pharr.¹¹

La figura 8 muestra las curvas de carga-descarga obtenidas por medio del análisis de elementos finitos. A partir de estos datos y siguiendo la metodología descrita en la sección 2.1, se determinó el módulo de elasticidad del SiO₂-TiO₂, obteniendo un valor de 71.85 GPa. Se observó una desviación del 9.84% en comparación con el valor obtenido en las pruebas experimentales. En comparación con el módulo de elasticidad reportado de 69 GPa para el Al 6061-T6 sin recubrir, se observa una mejora en las propiedades mecánicas del sistema sustrato-recubrimiento.

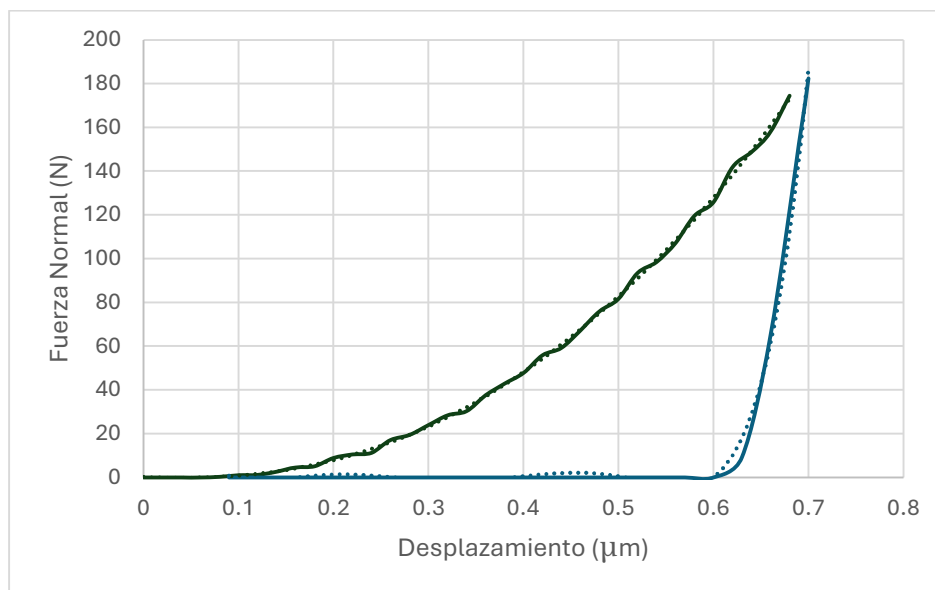


Fig. 8. Simulación de carga vs. desplazamiento de Al 6061-T6 recubierto con SiO₂-TiO₂.

Además de reproducir el comportamiento de carga-descarga experimental, esta estrategia también permite obtener información complementaria sobre el comportamiento mecánico del sistema, la cual no puede ser observada directamente a través del experimento físico. Entre los datos adicionales que se pueden extraer del modelo numérico se incluyen perfiles de distribución de esfuerzos en la dirección Y, esfuerzo Von Mises, así como componentes de esfuerzo cortante en el plano XY. Esta información resulta fundamental para comprender a mayor profundidad los mecanismos de deformación y daño en el recubrimiento bajo condiciones de carga localizada. La figura 9 muestra los perfiles de distribución de esfuerzo Von Mises, así como los valores máximos y mínimos evaluados durante el tiempo de simulación. Se puede observar que el valor máximo alcanzado es de aproximadamente 715 MPa, que podría considerarse cuando el material puede comenzar a ceder o fallar plásticamente bajo un estado de carga complejo.

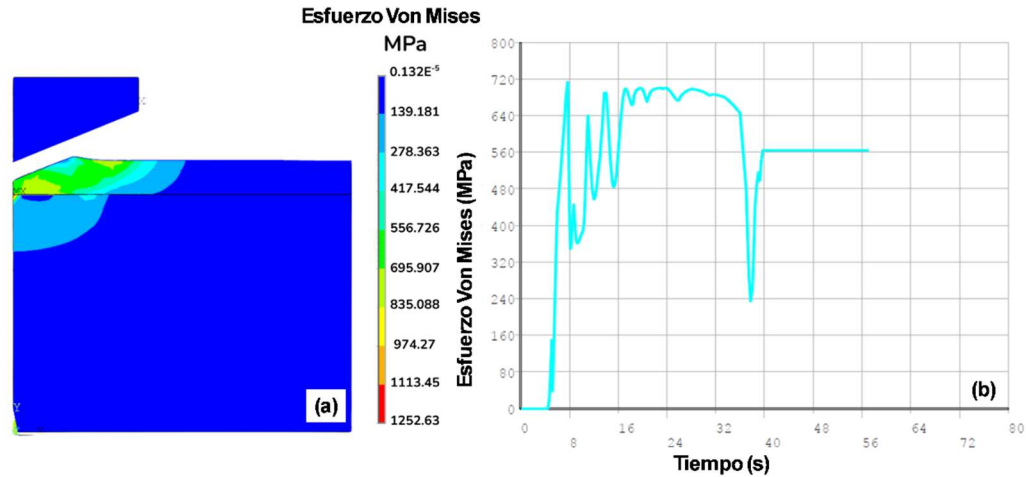


Fig. 9. (a) Distribución de esfuerzo Von Mises y (b) fluctuación del esfuerzo en el tiempo.

La figura 10(a) muestra los perfiles de esfuerzo en la dirección Y (dirección de movimiento del indentador), clave para entender cómo el material responde en términos de compresión o tensión vertical bajo la acción del indentador. La figura 10(b) presenta resultados del esfuerzo cortante en el plano XY, estos describen la intensidad y distribución de las fuerzas internas que tienden a distorsionar el material en el plano horizontal XY, es decir, paralelo a la superficie del recubrimiento y del sustrato. El esfuerzo cortante presenta una distribución heterogénea con zonas de concentración de esfuerzos próximas al borde de indentación. El componente XY del esfuerzo cortante resulta crítico para evaluar la resistencia al deslizamiento interfacial y la posible formación de defectos estructurales.

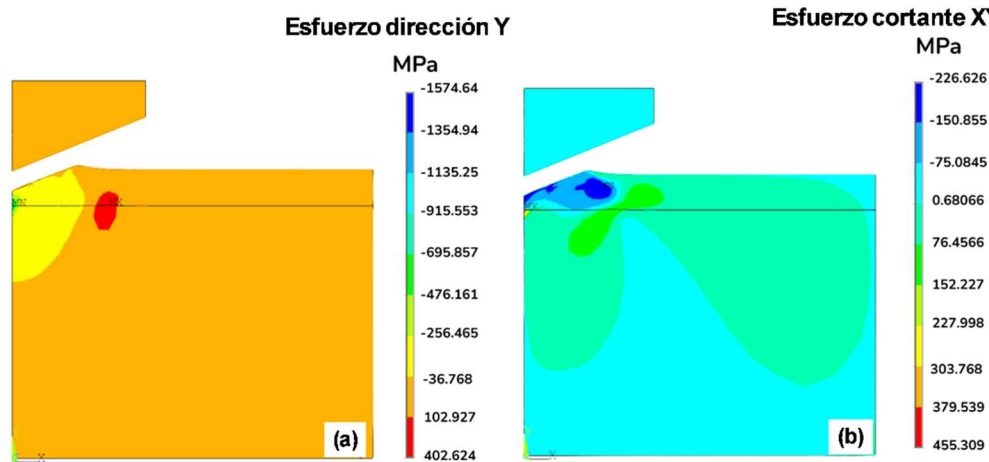


Fig. 10. (a) Distribución de esfuerzos en la dirección Y y (b) componentes de esfuerzo cortante en el plano XY.

CONCLUSIONES

Se generó un modelo numérico en la predicción del proceso de nanoindentación de recubrimientos nanoestructurados SiO₂-TiO₂ en sustrato de Al 6061-T6. El método de elementos finitos se presenta como una herramienta complementaria de alto valor para el análisis mecánico de recubrimientos delgados. Además de permitir la validación de resultados experimentales y la reducción de pruebas físicas, este enfoque posibilita el acceso a información detallada que no se obtiene en las pruebas físicas tales como los perfiles de esfuerzo en diferentes direcciones y la distribución del esfuerzo cortante en regiones críticas.

El módulo de elasticidad del recubrimiento de SiO₂-TiO₂ obtenido a través de simulación fue de 71.85 GPa, presentando una variación del 9.84 % con respecto al valor experimental promedio de 79.69 GPa. Esta diferencia indica una buena correlación entre el modelo numérico y los datos experimentales, lo cual refuerza la fiabilidad del análisis computacional. En conjunto, la implementación de modelos numéricos contribuye a optimizar el diseño de recubrimientos funcionales y predecir su comportamiento mecánico bajo condiciones de carga localizada, lo cual es particularmente relevante en aplicaciones de alta exigencia como la industria aeroespacial, electrónica y biomédica.

REFERENCIAS

1. Gamez, J., Reyes-Osorio, L., Zapata, O., Cabriales, R., Lopez, L., & Delgado-Pamanes, M. (2024). Study of protective hard coatings of SiO₂-TiO₂ on aluminum substrates. *AIMS Materials Science*, 11(2), 200-215. <https://doi.org/10.3934/matersci.2024011>
2. Musza, A., Ugi, D., Vida, Á., & Chinh, N. Q. (2022). Study of Anodic Film's Surface and Hardness on A356 Aluminum Alloys, Using Scanning Electron Microscope and In-Situ Nanoindentation. *Coatings*, 12(10), 1528. <https://doi.org/10.3390/coatings12101528>
3. Filippov, P., Kiderlen, S., & Koch, U. (2020). Preparation of the Surfaces of High-Purity Polycrystalline Aluminum for the Mechanical Analysis by Means of Nanoindentation. *Practical Metallography*, 57(6), 397-414. <https://doi.org/10.3139/147.110633>
4. Liberini, M., De Falco, G., Scherillo, F., Astarita, A., Commode, M., Minutolo, P., D'Anna, A., & Squillace, A. (2016). Nano-TiO₂ coatings on aluminum surfaces by aerosol flame synthesis. *Thin Solid Films*, 609, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.04.025>
5. Gutiérrez, M., Reyes, L., Bermúdez-Reyes, B., Guerra-Fuentes, L., & Robledo, P. C. Z. (2019). Recubrimientos nanoestructurados SiO₂-TiO₂ en aleaciones de aluminio 6061-T6. *Revista Ciencia UANL*, 22(96), 48-53. <https://doi.org/10.29105/cienciauanl22.96-3>
6. Zhang, W., Li, J., Xing, Y., Nie, X., Lang, F., Yang, S., Hou, X., & Zhao, C. (2020). Experimental Study on the Thickness-Dependent Hardness of SiO₂ Thin Films Using Nanoindentation. *Coatings*, 11(1), 23. <https://doi.org/10.3390/coatings11010023>
7. Alaboodi, A. S., & Hussain, Z. (2017). Finite element modeling of nano-indentation technique to characterize thin film coatings. *Journal Of King Saud University - Engineering Sciences*, 31(1), 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.02.001>
8. Cheng, S., Chen, B., Jian, S., Hu, Y., Le, P. H., Tuyen, L. T. C., Lee, J., & Juang, J. (2022). Finite Element Analysis of Nanoindentation Responses in Bi₂Se₃ Thin Films. *Coatings*, 12(10), 1554. <https://doi.org/10.3390/coatings12101554>
9. Abdulaziz S. Alaboodi, Zahid Hussain, Finite element modeling of nano-indentation technique to characterize thin film coatings. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* 31 (2019) 61–69 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2017.02.001>
10. Ilona Pavlovska et al. Hard TiO₂-SiO₂ sol-gel coatings for enamel against chemical corrosion. *Surface & Coatings Technology* 258 (2014) 206–210 <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.027>
11. G. M. Pharr, W. C. Oliver, "Measurement of Thin Film Mechanical Properties Using Nanoindentation", *MRS Bull.*, Vol. 17, No. 7, 1992, pp. 28–33.
12. ASM Handbook Committee (1991). "Heat Treating of Aluminum Alloys". Volume 4: Heat Treating. ASM. pp. 871. doi:10.1361/asmhba0001205. <https://dx.doi.org/10.1361%2Fasmhba0001205>
13. Hatch, John (1984). "Microstructure of Alloys". *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. ASM International. pp. 54–104. ISBN 9780871701763.
14. Milton Ohring, "Materials Science of thin films Deposition and Structure", Rev. Academic Press, Second edition, London, UK, 2002, pp. 718-720.