

# Determinación de la dureza de un recubrimiento doble capa de níquel-fosforo utilizando el método de elementos finitos

Manuel J Martínez<sup>1</sup>, Pedro J. Hernández V<sup>2</sup>, José D Vargas S<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: mjmartin@uis.edu.co

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: pedrosvalingemec@gmail.com

<sup>3</sup>Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: danielsuta37@gmail.com

## Resumen

Los recubrimientos de níquel-fosforo depositados por el método de niquelado químico "ENP" son muy utilizados en diversas industrias, por sus características deseables como lo son: su alta dureza, sus propiedades magnéticas y excelente resistencia a la corrosión. La selección de los recubrimientos multicapas siempre ha representado un desafío debido a la naturaleza de los esfuerzos y deformaciones los cuales influyen en los diferentes sistemas de materiales estratificados. El objetivo del presente estudio es analizar las tensiones de contacto y deformaciones causadas por la indentación en un recubrimiento de dos capas Níquel-Fosforo sobre acero AISI 1045 en un régimen elástico-plástico, por medio de un modelado computacional usando el método de elementos finitos (MEF). Los resultados de la dureza del material obtenidos computacional y experimentalmente fueron comparados, observándose una diferencia entre ellos de un 8.5%. Estos resultados indican que el MEF es una buena técnica para continuar investigando, en futuros trabajos, en recubrimientos multicapas, aunque es necesario profundizar para reducir la diferencia obtenida.

**Palabras clave:** Simulación FEM, recubrimiento multicapa, dureza, indentación Vickers.

## Abstract

Nickel-phosphorous coatings deposited by the "ENP" chemical nickel-plating method are widely used in various industries, due to their desirable characteristics such as: their high hardness, their magnetic properties and excellent resistance to corrosion. The selection of multilayer coatings has always represented a challenge due to the nature of the stresses and strains which influence the different systems of layered materials. The objective of this study is to analyze the contact stresses and deformations caused by indentation in a two-layer Nickel-Phosphorus coating on AISI 1045 steel in an elastic-plastic regime, through computational modeling using the method of finite elements (FEM). The results of the hardness of the material obtained computationally and experimentally were compared, observing a difference between them of 8.5%. These results indicate that the FEM is a good technique to continue investigating, in future works, multilayer coatings, although it is necessary to go deeper to reduce the difference obtained.

**Keywords:** FEM simulation, multilayer coating, hardness, Vickers indentation.

## 1. Introducción

Actualmente existe la constante necesidad de una mejora en las propiedades mecánicas de los materiales usados en procesos industriales. Las capas y recubrimientos en superficies duras o delgadas se utilizan cada vez más en ingeniería debido a su incremento de confiabilidad sobre el material. En particular las superficies multicapa se utilizan para satisfacer diversos requisitos especiales en elementos de máquinas, por ejemplo, en donde se desea obtener un cambio en las propiedades magnéticas, altos niveles de conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión,

resistencia al desgaste y/o elevados valores de dureza. Una de las alternativas más usadas es el recubrimiento Níquel-Fosforo por el método Niquelado Químico (Electroless Nickel Plating) [1], que cuenta con propiedades como: uniformidad en el espesor depositado en la capa, elevados niveles de dureza, resistencia al desgaste y a la corrosión, entre otras. Sin embargo, la selección de recubrimientos para aplicaciones específicas es una tarea compleja, debido a muchos factores influyentes en la decisión., como lo son, el valor y la naturaleza de las cargas externas, condiciones ambientales y las relaciones entre las

propiedades mecánicas del sistema sustrato-multicapas.

La prueba de indentación [2] es el ensayo más aceptado para obtener valores de dureza de un material, el cual consiste en presionar un indentador con determinados valores de carga, dejando una huella en el material, este ensayo se destaca por su sencillez, versatilidad y economía en su aplicación, pero se debe tener en cuenta el efecto del sustrato en películas delgadas cuando las cargas superan una profundidad equivalente a un décimo del espesor de la película.

El método de elementos finitos [3] ha permitido resolver grandes problemas que antes eran imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. La implementación del MEF en el modelado de los ensayos de indentación [4] se ha venido consolidando debido a los buenos resultados obtenidos con bajos errores en comparación con las pruebas experimentales.

El objetivo del presente estudio es determinar la dureza a través del modelamiento numérico, de un proceso de indentación [5],[6] de un recubrimiento de dos capas Níquel-Fosforo sobre acero AISI 1045 en un régimen elástico-plástico, utilizando el método de elementos finitos. A fin de verificar y confiar en los resultados obtenidos computacionalmente, estos son comparados con valores experimentales.

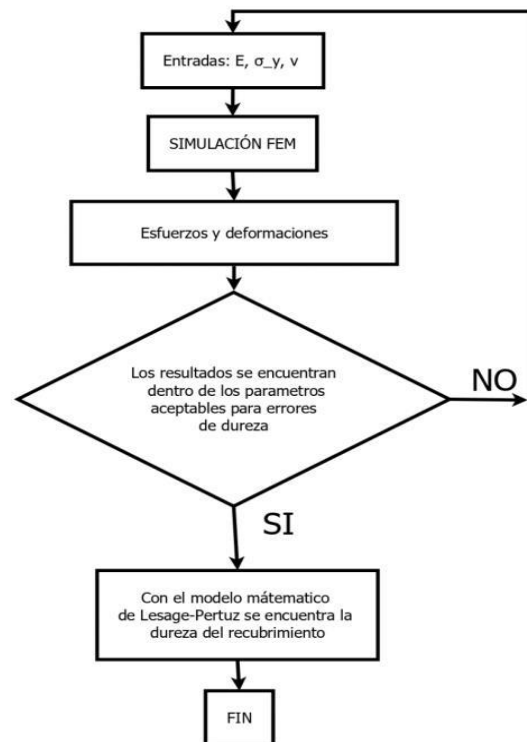
La metodología experimental del ensayo se realizó en el laboratorio de materiales ubicado en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC, bajo la supervisión del profesor Nelson Jesús Gomes Vieira y como responsable la laboratorista Karolayn Díaz, Caracas, Venezuela.

## 2. Metodología

Las simulaciones de los ensayos de microindentación Vickers, fueron realizadas en el software licencia académica ANSYS. A continuación, se presenta el desarrollo del proceso llevado a cabo en el programa.

### 2.1. Estrategia general de simulación

Se consideró el proceso de indentación como estático, y se desarrolló en la configuración *Static Structural* del programa. El proceso de solución consta de diferentes etapas, las cuales se observan en la Figura 1.



**Figura 1.** Metodología general para la simulación de los ensayos. a) Diagrama general de proceso, b) Ejemplo de discretización que muestra el cambio en la malla funcional para los dos primeros incrementos simulados. Fuente: elaboración propia.

### 2.2. Definición del material del sustrato

El programa ofrece una amplia selección de materiales para las distintas necesidades del usuario, sin embargo, solo se encuentran materiales y composiciones comercialmente bien conocidas y utilizadas en actividades industriales tales como: aleaciones de aceros, aluminios, fluidos, gases, entre otros. Además de esto, se tiene la posibilidad de crear nuevas librerías para materiales no incluidos en la lista. En la ventana *Static Structural* se encuentra la opción *Engineering Data* en la cual se pueden configurar las propiedades mecánicas creando las librerías. Todos los materiales usados en la simulación fueron creados usando un módulo del *Engineering Data* llamado *Engineering Data Sources* en la cual se pudieron configurar las propiedades de cualquier material insertando solo las propiedades requeridas en la simulación, para esto se dispuso de una revisión bibliográfica la cual proporcionó esta información [7], [8], [9]. Ver Tabla 1. El valor del coeficiente de Poisson para aceros al carbono no tiene variaciones importantes de una aleación a otra. La Cía. General de Aceros S.A. da un valor para el mismo de 0.3, valor que fue implementado en las propiedades del acero [10].

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas del Acero AISI 1045

Autor	Esfuerzo de fluencia “Sy” (MPa)	Módulo de Young “E” (GPa)
Calik (2009) [7]	510	200
Zhao (2018) [8]	507	223
Li. (2019) [9]	479.18	253.746

Fuente: Elaboración propia.

Valores considerados en la investigación:

Esfuerzo a la fluencia  $\sigma_y$ : 500 (MPa)

Módulo de Young: 220000 (MPa)

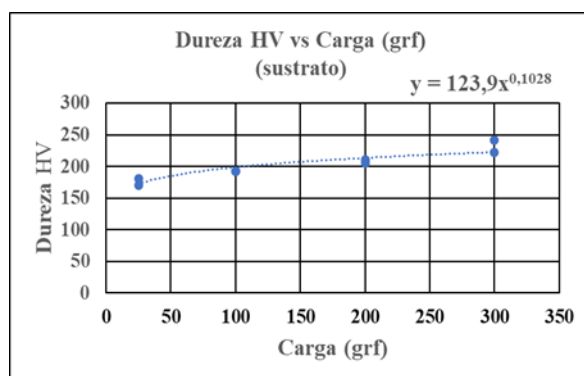
Coefficiente de Poisson: 0.3

### 2.3. Dureza Vickers (HV) experimental para el sustrato

Se utilizó una gráfica de dispersión para poder encontrar la línea de tendencia potencial de la cual se obtendrían los valores comparativos de dureza experimental. La Tabla 2 y la Figura 2 fueron construidas a partir de los datos suministrados por el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas-IVIC.

**Tabla 2.** Dureza experimental para el Acero AISI 1045

Carga (grf)	Dureza (HV)
300	232
200	207.8
100	192.9
25	175.7



**Figura 2.** Gráfica de valores de dureza (HV) vs carga (grf) para el acero AISI 1045. Elaboración propia.

### 2.4. Configuración de análisis en Ansys

La configuración de análisis se realizó en la Interfaz Mechanical, la cual consta de diferentes módulos para las distintas partes de las que está compuesta una simulación en el programa. En dichos módulos se pueden ver las opciones de materiales disponibles,

podemos aplicar las opciones de simetría en la pieza, configurar el mallado, establecer las interacciones entre las superficies del contacto, además de las condiciones de borde, el tipo de análisis de resultado que queremos obtener e información sobre los esfuerzos y deformaciones presentes a lo largo de la microindentación.

El módulo *geometry* se usó para definir el material de cada una de las figuras geométricas de las que constan los modelos. Así entonces, para el primer modelo, se distingue el indentador y el sustrato, para el segundo modelo se distinguen el indentador, el recubrimiento con tratamiento térmico y el sustrato, y finalmente el tercero está conformado por el indentador, los dos recubrimientos y el sustrato.

El módulo *symetry* es fundamental para disminuir el tiempo de cómputo de la simulación, debido que la geometría del modelo de estudio cuenta con las características necesaria para generar una simetría con respecto a dos planos, siendo el modelo compilado un cuarto del modelo real.

*Connections* es uno de los módulos del programa en el cual se definen los tipos de contacto que existen entre las geometrías presentes en la simulación, sabiendo esto, se implementó para definir los contactos entre el sustrato y el recubrimiento, entre los dos tipos de recubrimiento, y finalmente para el contacto entre el indentador de forma cónica y las diferentes muestras. Así se definió un *contact bonded* para las caras en contacto entre el sustrato y recubrimiento, igualmente para las superficies entre recubrimientos. Se configuró *contact frictionless* (contacto sin fricción), para definir la interacción de contacto entre la cara cónica del indentador y la superficie plana donde se procede a realizar la microindentación.

*Mesh* se utilizó para insertar todas las configuraciones de anteriormente mencionadas. En este módulo de trabajo se usaron configuraciones tales como *Patch Conforming Method*, esta herramienta fue utilizada para la selección de los elementos, en la solución de esta investigación, se implementó para definir el tipo de método usado en el mallado y el orden de los elementos (lineal o cuadrático). En este caso se utilizaron elementos de orden cuadrático para aumentar el nivel de precisión y exactitud de las variables a obtener. Para la refinación en las zonas de concentración de esfuerzos más importantes se utilizó el módulo *Vertex Sizing*.

*Mesh edit* es una herramienta que simuló las conexiones presentes en el mallado y la interacción al contacto entre los materiales estratificados. Debido a que los esfuerzos y deformaciones, muchas veces,

presentan influencia de elementos estratificados, es de gran importancia crear conexiones de malla entre los nodos de los elementos en estos tipos de contactos para obtener un comportamiento más cercano a la realidad de este efecto. También cabe aclarar que la herramienta únicamente permite crear estas conexiones entre los nodos y elementos del mismo tipo.

## 2.5. Importancia de la Malla

El método de elementos finitos consiste en dividir el elemento a analizar en subelementos, con el fin de hallar soluciones discretas correspondientes al análisis de los esfuerzos presentes en los mismos. Se deben tener en cuenta varios criterios para la selección de mallado, una buena selección de esta no significa únicamente resultados favorables, debido a que existen implicaciones de selección cuando hay conexiones entre subelementos de mallas donde se involucran distintos cuerpos o geometrías en contacto.

Para el mallado, la geometría de cada uno de los elementos, el refinamiento de malla y las conexiones entre los nodos fueron condiciones necesarias al momento de crear la simulación. Los elementos tetraédricos se adaptan por excelencia a geometrías curvas y ángulos agudos, además la forma de estos hace que se realice un refinamiento mejor de la malla. La creación de los tipos de contactos e interacciones entre las capas e indentador restringió a utilizar el mismo método de solución para todo el mallado.

El refinamiento de malla se realizó en la zona del modelo en donde ocurre la microindentación, el valor del campo de influencia se configuro teniendo en cuenta la huella dejada por el indentador, así se aseguró que los esfuerzos y deformaciones importantes se presentaran en las zonas en donde los elementos de la malla fueron refinados, esto, para lograr resultados más exactos con un tiempo de cómputo óptimo.

## 2.6. Análisis de convergencia

A continuación, se muestra el análisis de convergencia que se realizó para el acero AISI 1045, este se hizo, con el fin de hallar la configuración de la malla óptima en la obtención de los resultados. El ejercicio consistió en variar el tamaño de los elementos más pequeños presentes en la malla, esto con el fin de visualizar la convergencia de los valores de dureza en función del número de nodos, y así obtener el punto de configuración óptima para los resultados. Para el análisis se implementaron 4 tipos de mallados diferentes, con diferente número de nodos: 20380, 16111, 8520 y 4814, se utilizaron únicamente los datos para la carga de 100 grf.

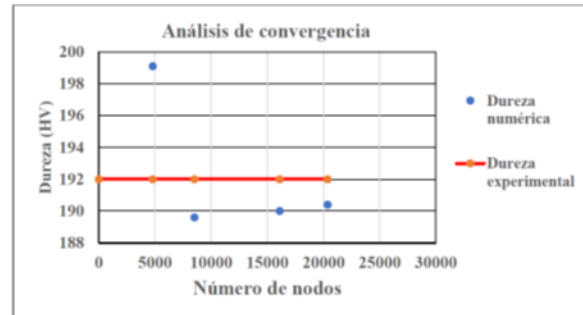


Figura 3. Gráfica de análisis de convergencia.

Por lo tanto, la gráfica de la Figura 3 representa el análisis, y corrobora la importancia del tamaño de los elementos y el número de nodos presentes en el área de interés, demostrando así una clara convergencia entre la dureza experimental y la simulada. Por este motivo se eligió el tipo de configuración en mallado de 20380 nodos, ya que solo presento un error relativo del 1.3%. Cabe aclarar que una configuración de malla con más nodos era posible, pero el coste en el tiempo de solución no justificaba su uso frente a un porcentaje de error relativo sin una disminución considerable.

## 2.7. Visualización de resultados

El programa cuenta con distintos tipos de análisis, los cuales se diferencian por las ecuaciones utilizadas para hacer los cálculos referentes a los valores de esfuerzos y deformaciones elástico-plásticas que se presentan en la simulación, o cualquier otro tipo de reacción que se podría encontrar en un material que este bajo la influencia de una fuerza externa.

ANSYS maneja una amplia variedad de teorías de falla para hallar los esfuerzos relacionados con la prueba de indentación. En este análisis se eligieron únicamente las teorías más relevantes en la búsqueda del comportamiento real del material, para ello se seleccionaron los siguientes tipos de análisis de falla:

*Directional Deformation:* la deformación direccional se usa para conocer el nivel máximo de profundidad que alcanza la huella del indentador en cada ensayo realizado y, así, determinar el diámetro de la impresión con una relación geométrica sencilla y realizar el cálculo de dureza.

*Maximum Principal Stress:* el esfuerzo principal máximo es utilizado para la construcción y análisis de la curva de esfuerzo-deformación del sustrato.

*Equivalent Stress:* el esfuerzo equivalente es un modo de análisis que compete a los esfuerzos que se presentan una vez dejada la huella, ayuda a visualizar como estos fluyen a lo largo de la dirección de la fuerza hasta interactuar directamente con la siguiente capa.

*Equivalent Elastic strain*: la deformación elástica equivalente fue utilizada para la visualización de las deformaciones en la zona de la huella.

### 3. Validación computacional

En esta parte se presentan las validaciones de las técnicas descritas en la metodología. Siguiendo el orden de ideas mencionado anteriormente, primero se realizará la simulación de indentación Vickers, y finalmente los resultados del estudio derivado del modelo computacional del mismo ensayo usando el método de elementos finitos

#### 3.1. Geometría

El software ANSYS cuenta con dos módulos para el desarrollo de geometrías, las cuales comparten la mayoría de las funciones, pero cuentan con interfaces diferentes, estas son: *DesignModeler* y *SpaceClaim*, además de esto el programa tiene la opción de importar geometrías desde cualquier software externo, para formatos guardados como “STEP”. Los modelos usados para las simulaciones fueron diseñados en el software ingenieril *SolidWorks*, después se exportaron las geometrías al *DesignModeler*.

La geometría del indentador es un cono que posee un semi-ángulo de  $70.3^\circ$  [11], como se muestra en la Figura 4. Esta forma del indentador fue usada ya que produce una huella donde la relación entre el área de contacto y la profundidad de penetración son las equivalentes a las existentes en un indentador tipo Vickers, como lo aclara Hernández [12]. Para asegurar que los bordes del sustrato no se verán afectados por los esfuerzos aplicados en el área de estudio, y así prevenir que se presenten deformaciones, se tomaron dimensiones de alrededor de 10 a 15 veces mayores que las dejadas por las del indentador en la simulación

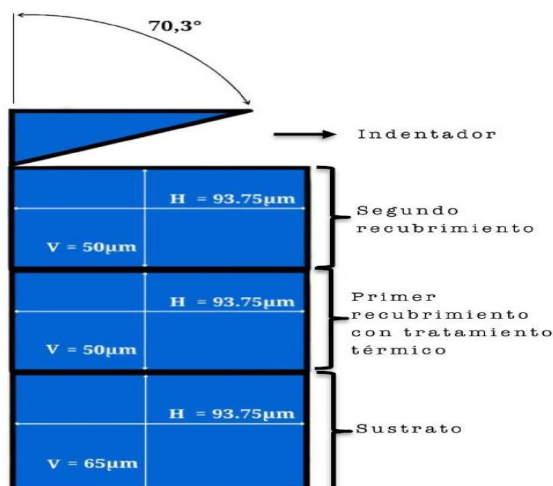


Figura 4. Croquis representativo del modelo del sobre recubrimiento. Elaboración propia.

Se construyeron tres modelos para el estudio de la dureza superficial del recubrimiento ENP y las interacciones del sistema sustrato-bicapa. Los modelos se aprecian en la Figura 5 y sus dimensiones en la Tabla 5. El primer modelo computacional se trató de la simulación del ensayo de microindentación en el sustrato, el segundo modelo fue el del mismo sustrato con un recubrimiento Ni-P al cual le fue aplicado un tratamiento térmico de  $400^\circ\text{C}$  por una hora y enfriado en el horno en el cual fue aplicado el mencionado temple, finalmente el último modelo tuvo los mismos componentes del recubrimiento con tratamiento térmico, sumándole un recubrimiento Ni-P sin tratamiento térmico de las mismas dimensiones que el primero, para tener así un recubrimiento bicapa.

Como se puede observar en la Figura 5 los modelos computacionales fueron reducidos a un cuarto del modelo real de estudio, esto se realizó gracias a la simetría en dos planos que presentan los modelos, de esta manera se aprovecha al máximo el tiempo computacional de la compilación de la simulación.

Tabla 5. Dimensiones del sustrato y capas de recubrimientos.

Geometría	Ancho ( $\mu\text{m}$ )	Largo ( $\mu\text{m}$ )	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
Sustrato	83	93.75	65
Primer recubrimiento	83	93.75	50
Segundo recubrimiento	83	93.75	50

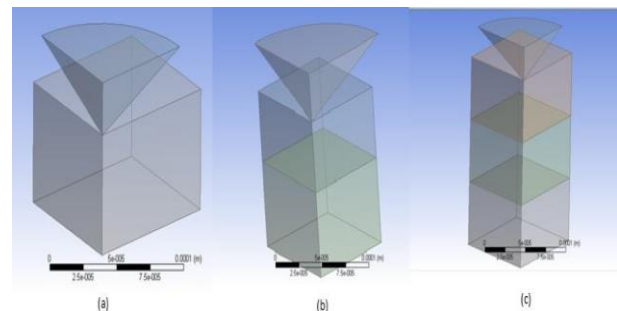


Figura 5. Modelos de simulación, (a) Sustrato e indentador, (b) sustrato con recubrimiento e indentador, (c) sustrato recubrimiento bicapa e indentador. Elaboración propia.

#### 3.2. Definición del material del recubrimiento

Para definir el material del recubrimiento se utilizó el mismo procedimiento usado para definir el material del sustrato, así, las propiedades mecánicas de ambas capas se definieron en la herramienta *Engineering Data*. Cabe mencionar que las propiedades mecánicas del primer recubrimiento son diferentes a las de la segunda capa y, además, las propiedades mecánicas de la zona de difusión entre los dos recubrimientos son distintas entre sí.



**Tabla 6.** Coeficiente de Poisson de los recubrimientos Ni-P. [13].

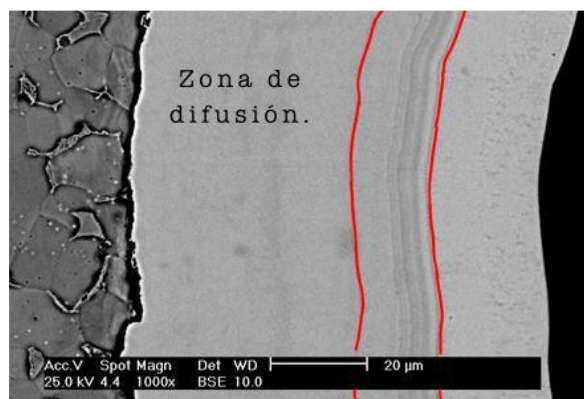
Material	Coeficiente de Poisson
Deposito de Electroles Nickel-Phosphrus	0.3

Las propiedades mecánicas del recubrimiento ENP con tratamiento térmico se encontraron basándose en las estimaciones presentadas en la *NACE - International Publication* [14] para recubrimientos por el método de niquelado químico, los cuales fueron sometidos a varios tratamientos térmicos, concluyendo que en todos los ensayos con diversos porcentajes de fosforo que se llevaron a una temperatura de 400 °C por una hora, alcanzan su máximo valor de dureza, concluyendo así que el módulo de Young de estos varía entre 120 – 180 (GPa). Ver Tablas 6 y 7.

Los valores de las propiedades para la primera capa fueron: **Módulo de Young: 180000 (MPa), Esfuerzo a la fluencia, 1100 (MPa), Coeficiente de Poisson: 0.3.**

La segunda capa del recubrimiento también fue modelada a partir de las propiedades mecánicas existentes en la literatura, que se tiene para contenido altos de fosforo en peso, pero se tuvo en cuenta la influencia del cambio propiedades en la zona de difusión de los recubrimientos. Esta zona puede ser vista claramente en la Figura 6.

También, se tuvo en consideración las propiedades mecánicas de los recubrimientos con porcentajes mayores al 11% de fosforo, los cuales son calificados como niveles altos, pero con las mismas características mecánicas.



**Figura 6.** Zona de difusión entre las capas del recubrimiento bicapa. Imagen entregada por el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC.

Con base a los datos recopilados en la Tabla 7, se establecieron las siguientes propiedades mecánicas

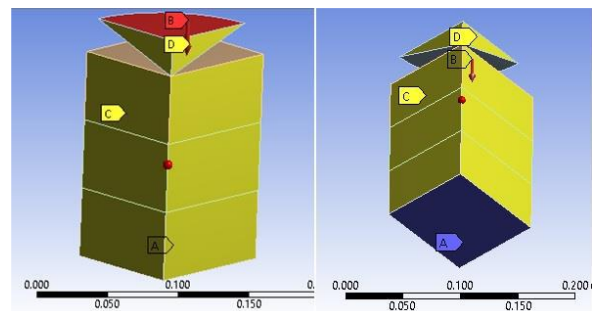
para el segundo recubrimiento depositado por el método ENP: **Módulo de Young, 75000 (MPa), Esfuerzo a la fluencia: 900 (MPa), Coeficiente de Poisson: 0.3**

**Tabla 7.** Propiedades del Electroless Nickel-Phosphorus [15].

Porcentaje de fosforo en peso (%)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Módulo de Young (GPa)
1-3	200-400	55-65
4-6	350-600	45-65
7-9	800-1000	50-65
10-13	650-900	55-70

### 3.3. Condiciones de borde

Para añadir las condiciones de contorno a las que están sometidos inicialmente los modelos fue necesario utilizar el módulo *Static Structural*, además que, este mismo contiene un submódulo llamado *Solutions* en donde se visualizan los resultados de las simulaciones. En las condiciones se contempló un soporte fijo en la base del sustrato, una fuerza perpendicular a la cara superior del indentador en dirección al sistema sustrato-multicapa, y una configuración de desplazamiento cero perpendicular al plano lateral de las caras de los materiales estratificados y del indentador. Estas condiciones de borde o frontera se pueden visualizar en la Figura 7.



**Figura 7.** Condiciones de borde en el modelo computacional. a) soporte fijo, b) fuerza aplicada, c) restricción de desplazamiento y d) restricción de desplazamiento. Elaboración propia.

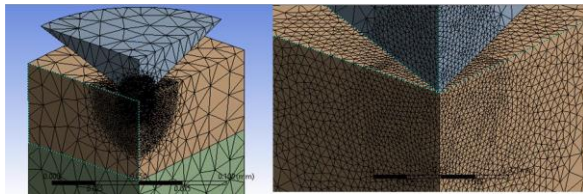
*New Chart and Table* se implementó en conjunto con la herramienta *User Defined Result*, para la visualización de la curva de esfuerzo-deformación construidas a lo largo de la microindentación por las características intrínsecas del programa. Esta última es utilizada para definir el comando “EPTO1” cuya finalidad permitió leer el comportamiento del esfuerzo principal máximo y los desplazamientos máximos presentes en el ensayo.

### 3.4. Generación de la malla

La malla generada contiene los parámetros para el óptimo funcionamiento y resolución de la simulación. Una vez configurada la estructura deseada se procede a generar el mallado de las piezas, como resultado se evidencia la cantidad de nodos y elementos representados en la Tabla 8 para cada uno de los modelos.

**Tabla 8.** Número de nodos y elementos del mallado por simulación.

Modelos	Nodos	Elementos
Primer modelo	20380	11509
Segundo modelo	12333	6792
Tercer modelo	37035	21290



**Figura 8.** Campos de influencia del refinado de malla a la izquierda y vista en detalle a la derecha del tercer modelo.

#### 4. Resultados y análisis

Los resultados son presentados en dos partes, en la primera se realiza el procedimiento para determinar el valor de la dureza en forma experimental y en la segunda se hace con el MEF.

##### 4.1 Cálculo de la dureza experimental

Las Tablas con los datos de los ensayos de dureza realizados para cada uno de los sistemas de capas del recubrimiento se introducen a continuación, seguidas de gráficas para la mejor comprensión del comportamiento del sistema de materiales. Las Tablas fueron construidas a partir de los datos suministrados por el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC.

**Tabla 9.** Dureza experimental Vickers para el primer recubrimiento con tratamiento térmico a 400°C.

Carga (grf)	Dureza (HV)
300	300.8
200	394.2
100	748.1
25	463.6

##### 4.2 Estimación de la dureza absoluta de los recubrimientos.

El método de Lesage-Pertuz [16] se usó con el propósito obtener los valores de la dureza del recubrimiento simple sobre el sustrato, ya que estas formulaciones no sirven en sistemas donde existe influencia de la dureza de un tercer material o composición en un orden estratificado, pero sirve cuando se requiere modelar el comportamiento de la dureza de un recubrimiento, y así corroborar que los resultados suministrados por el programa sean fiables. La ecuación que rige este modelo es la siguiente:

$$A \times H_f^2 + B \times H_f + C = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} A = f^2 \times (f - 1) \\ B = (-2f^3 + 2f^2 - 1) \times H_s + (1 - f) \times H_c \\ C = f \times H_c \times H_s + f^2 \times (f - 1) \times H_s^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$f = \left(\frac{t}{d}\right)^m \quad (3)$$

El valor de "m" se calcula mediante el desarrollo de una regresión lineal de todos los puntos experimentales obtenidos para el sistema sustrato-revestimiento y se deduce de la siguiente relación.

$$\ln d = m \ln P + d \quad (5)$$

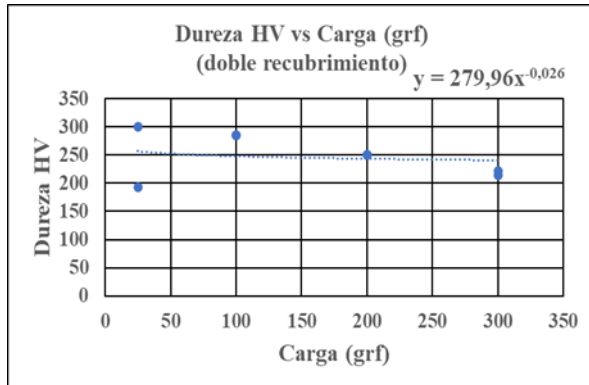
donde:  $H_c$  = dureza del compuesto,  $H_s$  = dureza del sustrato,  $H_f$  = dureza del recubrimiento y  $t$  = espesor del recubrimiento.

**Tabla 10.** Dureza comparativa del recubrimiento en el análisis experimental y simulación computacional.

Carga (grf)	Valores Numéricos	Valores Experimentales	Error (%)
	Dureza (HV)	Dureza (HV)	
25	505.2	572.3	11.72
100	479.4	457.2	4.85
200	348.17	379.405	8.23
300	313.426	362.426	13.45

**Tabla 11.** Dureza experimental Vickers para el doble recubrimiento.

Carga (grf)	Dureza (HV)
300	218.2
200	250.2
100	285.1
25	227.5



**Figura 9.** Gráfica de valores de dureza (HV) vs carga (grf) para el doble recubrimiento (dureza compuesta). Elaboración propia.

Los valores de la profundidad promedio, la profundidad relativa de indentación (Relative Indentation Depth–RID) y la dureza Vickers (HV), para las pruebas experimentales de cada una de las cargas del ensayo sobre el doble recubrimiento, se muestran en la Tabla 12. Esto se hizo con el fin de construir las curvas P–h/t (carga–desplazamiento/espesor de la capa), también llamadas curvas desplazamiento relativo del indentador (curvas RID). La cual es de gran importancia en el entendimiento del comportamiento mecánico de los sistemas estudiados [17].

**Tabla 12.** Valores de profundidad promedio, profundidad relativa (RID) y dureza (HV) promedios para el sistema sustrato doble recubrimiento.

Sistema Sustrato-Doble Recubrimiento				
Carga (grf)	25	100	200	300
Profundidad (µm)	5.08	9.6	14.49	19.1
RID	0.1	0.2	0.3	0.38
Dureza (HV)	271.7	285.1	250.2	218.2

#### 4.3 Cálculo de la dureza del sustrato utilizando el MEF

Como primer paso se realizaron las simulaciones para hallar los valores de dureza numérica y encontrar los porcentajes de error relativo. los resultados de las pruebas se pueden apreciar en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Datos comparativos de la dureza en la simulación numérica y experimental para el acero AISI 1045.

	Valores Numéricos	Valores Experimentales	
Carga (grf)	Dureza (HV)	Dureza (HV)	Error (%)
25	187.374	172.5	8.62
100	190.337	198.9	4.30
200	204.342	213.6	4.33
300	226.779	222.7	1.83

#### 4.4 Cálculo de dureza compuesta para el sistema sustrato–doble recubrimiento aplicando el MEF

Por último, al igual que en el proceso anterior, se hizo la comparación de la dureza del compuesto en la simulación computacional respecto a los valores obtenidos dados en los ensayos experimentales, los resultados de las pruebas se pueden visualizar en las Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16.

**Tabla 14.** Tabla comparativa de la dureza, numérica y experimental para el doble recubrimiento Ni–P.

	Valores Numéricos	Valores Experimentales	
Carga (grf)	Dureza (HV)	Dureza (HV)	Error (%)
25	216.0	256.73	15.9
100	242.1	246.64	2.2
200	245.1	243.22	3.9
300	252.0	240.66	4.7

Después de haber realizado con éxito la simulación computacional, se procedió a realizar el análisis para la obtención de la dureza del recubrimiento superior. Debido a la profundidad de la huella, la alta dureza del recubrimiento inferior y el espesor conjunto de las dos capas se pudo apreciar la nula influencia implícita de los esfuerzos del sustrato en los ensayos de indentación, por tal motivo, se utilizó nuevamente el método de Lesage–Pertuz [16], [18], [19] para poder hallar los valores de dureza del recubrimiento, teniendo en cuenta que la capa inferior debido a su grosor actuó como un sustrato para la ecuación. La Tabla 15 muestra los parámetros fundamentales que permiten representar la dureza del recubrimiento superior versus la profundidad relativa de indentación.

**Tabla 15.** Datos para hallar y representar el comportamiento de la dureza del doble recubrimiento contra la profundidad relativa de indentación (RID).

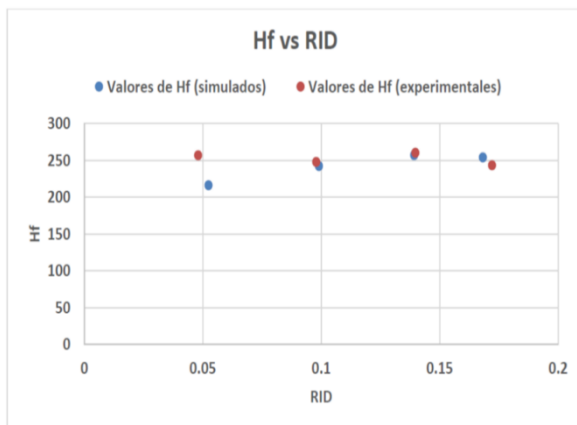
$\ln(d)$ (µm)	$\ln(P)$ (N)	$f$	$Hf$ (HV)	RID
2.68	-1.4065	1.779	216	0.0525
3.32	-0.0202	1.3199	242.1	0.0991
3.66	0.6729	1.125	256.9	0.1393
3.85	1.0784	1.029	253.77	0.1683



**Tabla 16.** Dureza comparativa del recubrimiento superior en el análisis experimental y la simulación computacional.

	Valores Numéricos	Valores Experimentales	
Carga (grf)	Dureza (HV)	Dureza (HV)	Error (%)
25	226	256.73	15.86
100	242.1	247.64	2.24
200	256.92	260.09	1.22
300	253.77	243.08	4.39

Una vez hallados los datos, se procedió a realizar la tabulación de estos y después se hizo la gráfica comparativa en base a los resultados de la simulación y el experimento. Se construyó la gráfica de la Figura 10 y se compararon los valores de la dureza del recubrimiento contra la profundidad relativa de indentación – RID.



**Figura 10.** Dureza del recubrimiento de la segunda capa (Hf) vs RID.

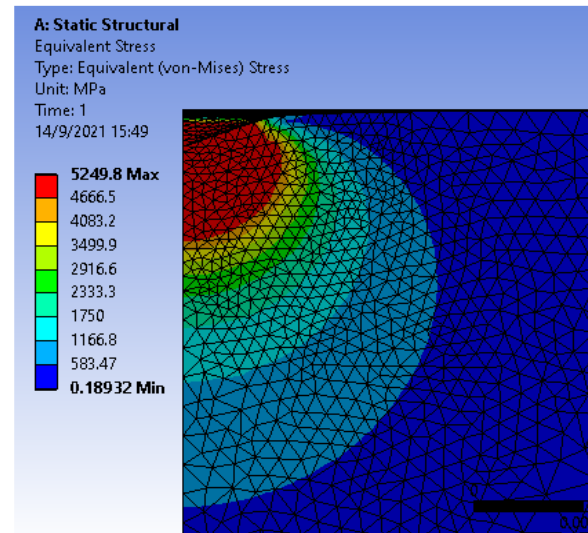
#### 4.5 Análisis de los campos de esfuerzos y deformaciones con Ansys.

El software ANSYS cuenta con distintas teorías de falla para el análisis de los campos de esfuerzos, esto se debe a la naturaleza de sus resultados los cuales llevan a variados análisis para las mismas condiciones, es por lo que se utilizó la teoría de esfuerzo equivalente de Von Mises. Las deformaciones también cuentan con teorías que se pueden representar en el programa, para su análisis se utilizó la teoría de deformación elástica equivalente ya que muestra una zona de influencia mayor.

##### 4.5.1 Análisis de los campos de esfuerzos y deformaciones para la carga de 25 grf

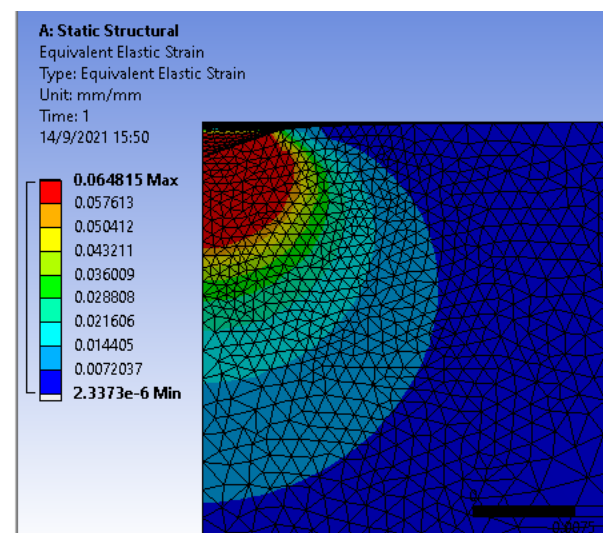
Los esfuerzos presentes en el análisis corresponden al tercer modelo geométrico de indentación estática, el cual consta de 37035 nodos y 21290 elementos tetraédricos de orden cuadrático.

El análisis de tensiones para la huella dejada por la carga de 25 grf es importante para observar las diferentes interacciones entre esta carga y la 300 grf. Los mapas de esfuerzos del tercer modelo para el ensayo de indentación con una carga de 25 grf, se puede observar en la Figura 11.



**Figura 11.** Análisis de esfuerzos del tercer modelo geométrico para una carga de indentación de 25 grf.

Los resultados obtenidos por la deformación equivalente del tercer modelo para la carga de 25 grf son apreciables en la Figura 12. En la Figura se observa que los mapas de deformación son muy similares a los de esfuerzo debido a que los valores máximos se concentran entorno a la huella dejada.



**Figura 12.** Análisis de deformaciones del tercer modelo geométrico para una carga de indentación de 25 grf.

## 5. Conclusiones

En las simulaciones computacionales realizadas para el acero AISI 1045 (primer modelo) se pudo determinar la dureza del material con un error máximo de 8.62% para la carga de 25 grf, respecto a los valores de los resultados experimentales. En el desarrollo de las simulaciones del programa para el segundo modelo el cual consistía en la primera capa del recubrimiento con tratamiento térmico, se pudo obtener la dureza a partir del método de Lesage–Pertuz, y se determinó un porcentaje máximo de error relativo del 13.45% para la carga de 300 grf. Igualmente se pudo determinar la dureza de la segunda capa del recubrimiento para el sistema sustrato–multicapa (tercer modelo) por medio del mismo método, y se determinó un porcentaje relativo de error del 15.9% para la carga de 25 grf en comparación con los resultados experimentales.

## 6. Referencias

- [1] Gomes, N., González-Estrada, O. A., y Pertuz, A. (2019). Electroless Nickel Phosphorous: una visión global. *Revista UIS Ingenierías*, 18(4), 173–192. Disponible: <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n4-2019016>
- [2] ASTM International. (2017). ASTM E384-17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. In *Annual book of ASTM standards 2017* (pp.1-40). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- [3] Taylor, R.L; Zienkiewicz, O. C., & J.Z, Z. (2005). *Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics* (Sixth, Issue 1). Butterworth-Heinemann 2000.
- [4] Kot, M., Rakowski, W., Lackner, J. M., y Major, Ł. (2013). Analysis of spherical indentations of coating-substrate systems: Experiments and finite element modeling. *Materials and Design*, 43, 99–111. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.040>
- [5] Escalona M, V. J., y Montilla C, C. J. (2013). Determinación de la dureza de un recubrimiento a partir de simulación numérica empleando el método de elementos finitos. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- [6] He, J. L., y Veprek, S. (2003). Finite element modeling of indentation into superhard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 163–164, 374–379. Disponible: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00628-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00628-X)
- [7] Calik, A., Sahin, O., y Ucar, N. (2009). Mechanical Properties of Boronized AISI 316, AISI 1040, AISI 1045 and AISI 4140 Steels. 115(3), 694–698.
- [8] Zhao, G., Liu, L., Wang, D., Guo, J., & Chen, W. (2018). Mechanical Properties of AISI 1045 Steel Subjected to Combined Loads of Tension and Torsion. *Experimental Techniques*, 42(4), 393–406. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s40799-018-0236-3>
- [9] Li, C., Zhao, H., Sun, L., & Yu, X. (2019). In situ nanoindentation method for characterizing tensile properties of AISI 1045 steel based on mesomechanical analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(7), 1–11. Disponible: <https://doi.org/10.1177/1687814019862919>
- [10] SAE 1020 Y SAE 1045. (marzo de 2007). Bogotá, Colombia.: Cía. General de Aceros. Disponible: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf?sequence=2>
- [11] Mata, M., Anglada, M., & Alcalá, J. (2002). Contact deformation regimes around sharp indentations and the concept of the characteristic strain. *Journal of Materials Research*, 17(5), 964–976. Disponible: <https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0144>
- [12] Hernández, J., Flores, S., Romero, F., y Palma, A. (2016). *Modelación Del Comportamiento Mecánico Del Nanocompuesto De Poliestireno-Montmorillonita, Mediante La Técnica De Nanoindentación* (tesis de maestría). Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua, Mexico.
- [13] Arora, A., Uday Venkat Kiran, K., y Dumpala, R. (2018). Predicting nanoindentation behaviour of Ni-P coatings using finite element analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402(1). Disponible: <https://doi.org/10.1088/1757899X/402/1/012004>
- [14] NACE Publication 6A287, “Electroless Nickel Coatings” (Houston, TX: NACE International, 1997).
- [15] Properties of electroless Nickel. (Septiembre de 2005). Langenfeld, Alemania: MacDermid Enthone. Disponible: <https://industrial.macdermidenthone.com/products-and-applications/electroless-nickel/properties>
- [16] Lesage, J., Pertuz, A., Puchi-Cabrera, E. S., & Chicot, D. (2006). A model to determine the surface hardness of thin films from standard micro-indentation tests. *Thin Solid Films*, 497(1–2), 232–238. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.09.194>
- [17] Meza, J. M., & Devia, A. (2006). La importancia de las curvas RID y P-h en los estudios de capas TiN depositadas sobre aceros M2 y 304L. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 37, 93–106.
- [18] Martínez, H., & Richard, A. (2009). Determinación de propiedades estáticas de recubrimientos depositados por proyección térmica utilizando indentación normal. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- [19] León B, J. S., Pertuz, A., & Martínez, M. (2020). A combined numerical and experimental approach to evaluate the hardness of AA aluminum 6063 T6 with a Ni-P coating. *Key Engineering Materials*, 827 KEM, 209–215. Disponible: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.827.209>