

Determinación de la Dureza de un Recubrimiento de Doble Capa a Partir de Simulación
Numérica Empleando el Método de Elementos Finitos

Pedro José Hernández Valbuena y José Daniel Vargas Suta

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Manuel del Jesús Martínez

Doctor en ingeniería mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2021

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 14 |
| 1. Objetivos | 16 |
| 1.1. Objetivo general | 16 |
| 1.2. Objetivos específicos | 16 |
| 2. Marco teórico | 17 |
| 2.1. Antecedentes de la investigación | 17 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales | 17 |
| 2.1.1.1. Analysis of spherical indentations of coating-substrate systems: experiments and finite element modeling (kot et al. , 2012). | 17 |
| 2.1.1.2. Determinación de la dureza de un recubrimiento a partir de simulación numérica empleando el método de elementos finitos (víctor y cesar, 2013)..... | 18 |
| 2.1.2. Antecedentes nacionales | 18 |
| 2.1.2.1. Electroless nickel phosphorous: una vision global (gomes, gonzález-estrada y pertuz, 2019)..... | 18 |
| 2.1.2.2. A combined numerical and experimental approach to evaluate the hardness of aa aluminum 6063 t6 with a ni-p coating (leon b., pertuz y martínez, 2019)..... | 19 |
| 2.2. Referentes teóricos..... | 20 |
| 2.2.1. Finite element modeling of indentation into superhard coatings (he y veprek, 2002)..... | 20 |
| 2.2.2. Contact deformation regimes around sharp indentations and the concept of the characteristic strain (mata, anglada y alcalá, 2002). | 21 |

| | |
|---|----|
| 2.2.3. Post-yielding stress-strain determination using spherical indentation (kang, yao y barbero, 2006)..... | 22 |
| 2.3. Referencias conceptuales..... | 23 |
| 2.3.1. Fundamentos del niquelado químico (enp)..... | 23 |
| 2.3.1.1. Aspectos históricos fundamentales del niquelado químico (enp)..... | 23 |
| 2.3.1.1.1. Propiedades del niquelado químico.. | 26 |
| 2.3.2. Especificación estándar para revestimientos de níquel-fósforo autocatalíticos en metal (astm b733-15)..... | 28 |
| 2.3.3. Fundamentos de indentación..... | 30 |
| 2.3.3.1. Introducción a la indentación..... | 30 |
| 2.3.3.2. Ensayo de dureza por microindentación..... | 31 |
| 2.3.3.2.1. Indentador y número de dureza vickers..... | 31 |
| 2.3.3.2.2. Formulación..... | 32 |
| 2.3.4. Fundamentos del método de elementos finitos..... | 33 |
| 2.3.4.1. Antecedentes históricos del método de elementos finitos.. | 33 |
| 2.3.4.2. Definición del método..... | 35 |
| 2.3.4.3. Solución del método de elementos finitos. | 36 |
| 2.3.4.3.1. Función de desplazamiento..... | 37 |
| 2.3.4.3.2. Deformaciones..... | 38 |
| 2.3.4.3.3. Esfuerzos..... | 39 |
| 2.3.4.3.4. Fuerzas equivalentes nodales..... | 40 |
| 2.3.5. Tratamientos térmicos..... | 42 |
| 2.3.5.1. Temple..... | 42 |

| | |
|---|----|
| 2.3.5.1.1. Temple martensítico..... | 43 |
| 2.3.5.1.2. Temple de precipitación..... | 43 |
| 3. Metodología | 44 |
| 3.1. Metodología numérica | 44 |
| 3.1.1. Partes..... | 45 |
| 3.1.2. Malla..... | 48 |
| 3.2.2.1 patch conforming method..... | 49 |
| 3.2.2.2 generación de malla..... | 49 |
| 3.1.3. Configuración de análisis..... | 50 |
| 3.1.4. Definición del material del sustrato | 53 |
| 3.1.5. Definición del material del recubrimiento | 54 |
| 3.1.6. Visualización de resultados..... | 57 |
| 3.2. Estimación de la dureza absoluta de los recubrimientos | 58 |
| 3.3. Construcción de la curva de esfuerzo - deformación a partir de indentación para el sustrato..... | 59 |
| 4. Diseño metodológico | 61 |
| 5. Resultado y análisis..... | 62 |
| 5.1. Cálculo de la dureza experimental..... | 62 |
| 5.2. Cálculo de dureza aplicando el método de elementos finitos | 69 |
| 5.2.1. Análisis de convergencia | 69 |
| 5.2.2. Cálculo de dureza del sustrato aisi 1045 aplicando el método de elementos finitos | 70 |
| 5.2.3. Cálculo de dureza compuesta para el primer recubrimiento aplicando el método de elementos finitos..... | 72 |

| | |
|--|----|
| 5.2.4. Cálculo de dureza compuesta para el sistema sustrato – doble recubrimiento aplicando el método de elementos finitos. | 76 |
| 5.3. Análisis de los campos de esfuerzo y deformación | 79 |
| 5.3.1. Análisis de esfuerzo | 80 |
| 5.3.1.1 campo de tensiones para carga de 25 grf. | 80 |
| 5.3.1.2 campo de tensiones para carga de 100 grf. | 81 |
| 5.3.1.3 campo de tensiones para carga de 300 grf. | 82 |
| 5.3.2. Análisis de deformación | 82 |
| 5.3.2.1 campos de deformación para carga de 25 grf. | 82 |
| 5.3.2.2 campos de deformación para carga de 100 grf. | 83 |
| 5.3.2.3 campos de deformación para carga de 300 grf. | 84 |
| 6. Conclusiones | 85 |
| Bibliografía | 88 |
| Apendices..... | 92 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Dimensiones del sustrato y capas de recubrimiento | 48 |
| Tabla 2. Numero de nodos y elementos del mallado por simulación | 49 |
| Tabla 3. Propiedades mecánicas del Acero AISI 1045 (Calik, 2009) | 54 |
| Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero AISI 1045 (Zhao, 2018) | 54 |
| Tabla 5. Propiedades mecánicas del acero AISI 1045 (Li, 2019)..... | 54 |
| Tabla 6. Coeficiente de Poisson de los recubrimientos Ni – P | 55 |
| Tabla 7. Propiedades del Electroless Nickel-Phosphorus | 57 |
| Tabla 8. Diseño metodológico del proyecto | 61 |
| Tabla 9. Dureza experimental para el acero AISI 1045 | 63 |
| Tabla 10. Dureza experimental Vickers para el primer recubrimiento con tratamiento térmico a 400°C | 64 |
| Tabla 11. Dureza experimental Vickers para el doble recubrimiento | 66 |
| Tabla 12. Valores de profundidad promedio, profundidad relativa (RID) y dureza (HV) promedios para el sistema sustrato doble recubrimiento | 68 |
| Tabla 13. Datos comparativos de la dureza y diagonal de la huella en la simulacion numérica y experimental para el acero AISI 1045 | 70 |
| Tabla 14. Dureza Vickers determinada de acuerdo con la aplicación de la carga por el método de elementos finitos | 72 |

| | |
|--|----|
| Tabla 15. Tabla comparativa de la dureza y diagonal de la huella, numérica y experimental para el recubrimiento Ni – P con tratamiento térmico sobre sustrato..... | 73 |
| Tabla 16. Datos para hallar y representar el comportamiento de la dureza del recubrimiento simple contra la profundidad relativa de indentación (RID) | 74 |
| Tabla 17. Dureza comparativa del recubrimiento en el análisis experimental y simulación computacional..... | 75 |
| Tabla 18. Tabla comparativa de la dureza y diagonal de la huella, numérica y experimental para el doble recubrimiento Ni – P | 76 |
| Tabla 19. Datos para hallar y representar el comportamiento de la dureza del doble recubrimiento contra la profundidad relativa de indentación (RID) | 77 |
| Tabla 20. Dureza comparativa del recubrimiento en el análisis experimental y la simulación computacional..... | 78 |
| Tabla 21. Composición química del Acero 1045..... | 92 |
| Tabla 22. Dimensiones de probetas usadas en pruebas experimentales | 93 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Procesos de precipitación del baño ENP. A la izquierda el baño el proceso, y a la derecha el polvo que se precipita | 24 |
| Figura 2. Diferencias entre las deposiciones finales de la capa entre la técnica autocatalítica (izquierda) y la electrolítica (derecha)..... | 26 |
| Figura 3. Efecto de la composición en la microdureza de los recubrimientos de ENP. (a) sin tratamiento térmico y (b) con tratamiento térmico a 400 °C | 27 |
| Figura 4. Propiedades de los recubrimientos de ENP según el contenido de fosforo | 29 |
| Figura 5. Comparación de la curva de profundidad del indentador generada con FEM y de solución analítica..... | 31 |
| Figura 6. Indentador Vickers | 32 |
| Figura 7. Modelado de estructuras como ensambles de elementos discretos. (a) elementos unidimensionales. (b) elemento de esfuerzo plano bidimensionales | 36 |
| Figura 8. Región de esfuerzos planos dividido en elementos finitos..... | 38 |
| Figura 9. Diagrama de flujo | 44 |
| Figura 10. Croquis representativo del primer modelo de estudio, indentador y sustrato | 46 |
| Figura 11. Modelos de simulación, (a) Sustrato e indentador, (b) sustrato con recubrimiento e indentador, (c) sustrato recubrimiento bicapa e indentador..... | 47 |
| Figura 12. Campos de influencia del refinado de malla a la izquierda y vista en detalle a la derecha | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 13. Condiciones de borde en el modelo computacional | 52 |
| Figura 14. Zona de difusión entre las capas del recubrimiento bicapa..... | 56 |
| Figura 15. Grafica de valores de dureza (HV) vs carga (grf) para el acero AISI 1045 | 64 |
| Figura 16. Grafica de valores de dureza (HV) vs carga (grf) para el primer recubrimiento (dureza compuesta) | 65 |
| Figura 17. Grafica de valores de dureza (HV) vs carga (grf) para el doble recubrimiento (dureza compuesta)..... | 67 |
| Figura 18. Grafica de valores de Carga (grf) vs RID para el sistema sustrato doble recubrimiento | 68 |
| Figura 19. Grafica de análisis de convergencia | 69 |
| Figura 20. Grafica comparativa de las curvas de endurecimiento por deformación basado en resultados experimentales y la simulación computacional | 71 |
| Figura 21. Dureza del recubrimiento (Hf) vs RID | 75 |
| Figura 22. Dureza del recubrimiento (Hf) vs RID | 79 |
| Figura 23. análisis de esfuerzos para una carga de indentación de 25 grf..... | 80 |
| Figura 24. Análisis de esfuerzos para una carga de indentación de 100 grf..... | 81 |
| Figura 25. Análisis de esfuerzos para una carga de indentación de 300 grf..... | 82 |
| Figura 26. Análisis de deformaciones para una carga de indentación de 25 grf | 83 |
| Figura 27. Análisis de deformaciones para una carga de indentación de 100 grf | 84 |

| | |
|---|----|
| Figura 28. Análisis de deformaciones para una carga de indentación de 300 grf | 85 |
| Figura 29. Dureza de los recubrimientos de níquel no electrolítico vs tratamiento térmico de 1 hora, según el porcentaje de fosforo presente en la muestra..... | 96 |
| Figura 30. Densidad de los recubrimientos de níquel no electrolítico según su porcentaje de fosforo | 97 |
| Figura 31. Microdurometro de marca LEITZ WETZLAR. Tipo: 060-356.012, No: 881922..... | 98 |

Lista de apéndices

| | | |
|-------------|--|----|
| Apendice A. | Metodología experimental..... | 92 |
| Apendice B. | Material base..... | 92 |
| Apendice C. | Selección y preparación de probetas | 93 |
| Apendice D. | Recubrimiento de probetas | 93 |
| Apendice E. | Tratamiento térmico aplicado al recubrimiento..... | 95 |
| Apendice F. | Determinación del espesor del recubrimiento..... | 96 |
| Apendice G. | Ensayo de dureza..... | 98 |

Resumen

Título: Determinación de la Dureza de un Recubrimiento de Doble Capa a Partir de Simulación Numérica Empleando el Método de Elementos Finitos *

Autores: Pedro José Hernández Valbuena y José Daniel Vargas Suta**

Palabras clave: indentación, simulación, dureza, recubrimiento, ENP.

Descripción: Los recubrimientos de níquel – fosforo depositados por el método de niquelado químico “ENP” son populares por sus características deseables en diversas industrias, como lo es su alta dureza, propiedades magnéticas y excelente resistencia a la corrosión. Este método cada vez va ganando campo en las practicas industriales para la mejora de las propiedades mecánicas de los materiales involucrados en procesos de producción y/o transporte de productos químicos. La selección de los recubrimiento multicapa siempre ha representado un desafío debido a la naturaleza de los esfuerzos y deformaciones de los cuales influyen los diferentes sistemas de materiales estratificados, es por ello que el objetivo de este trabajo es realizar pruebas de indentación Vickers para un acero AISI 1045 con un doble recubrimiento Ni – P por el método de elementos finitos, utilizando el software ANSYS, para la visualización de los esfuerzos y deformaciones presentes en las huellas. Luego, usando el modelo de Lesage – Pertuz, para determinar el aporte de dureza del sustrato al recubrimiento, y obtener la comparación entre los resultados simulados y experimentales, de los cuales se halló un amplio margen de confiabilidad en comparación con los datos experimentales, así, se pudo concluir que aun que el software si sirve para observar el comportamiento de sistemas multicapa bajo cargas externa, lo cual valida proseguir investigando su comportamiento del mismo con el uso de elementos finitos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Manuel del Jesús Martínez. Codirector

Abstract

Title: Determination of the Hardness of a Double Layer Coating from Numerical Simulation Using the Finite Element Method*

Authors: Pedro José Hernández Valbuena and José Daniel Vargas Suta**

Keywords: indentation, simulation, hardness, coating, ENP.

Description: Nickel-phosphorus coatings deposited by the electroless nickel plating method "ENP" are popular for their characteristics that are ideal for several industries, such as high hardness, magnetic properties, and excellent corrosion resistance. This method is increasingly gaining ground in industrial practices for the improvement of the mechanical properties of materials involved in chemical production and/or transportation processes. The selection of multilayer coatings has always represented a challenge due to the nature of the stresses and deformations which influence the different layered material systems, that is why the objective of this work is to perform Vickers indentation tests for an AISI 1045 steel with a double Ni - P coating by the finite element method, using the ANSYS software to visualize the stresses and deformations present in the traces. Then, using the model of Lesage - Pertuz, to determine the contribution of hardness of the substrate to the coating, and to obtain the comparison between the simulated and experimental results, of which a wide margin of reliability was found in comparison with the experimental data, thus, it was possible to conclude that although the software is useful to observe the behavior of multilayer systems under external loads, which validates to continue investigating its behavior with the use of finite elements.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Manuel del Jesús Martínez. Codirector

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), cuenta con propiedades tales como, uniformidad en el espesor depositado en la capa, elevados niveles de dureza, resistencia al desgaste y a la corrosión. Además, de que estas propiedades pueden tomar valores diferentes en función del contenido de fosforo en peso. 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-multicapa.

La prueba de indentación es el ensayo más aceptado para obtener valores de dureza de un material, el cual consta 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 la influencia 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 ha permitido resolver grandes problemas que antes eran imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Se ha consolidado entonces, la implementación del método en el modelado de los ensayos de indentación, debido a los buenos resultados obtenidos con bajos errores en comparación con las pruebas experimentales. Al diseñar estos sistemas multicapa es importante tener un conocimiento completo de las deformaciones al contacto y los campos de tensión de los materiales estratificados, para evaluar la fiabilidad de la mecánica.

El objetivo del presente estudio es examinar las tensiones de contacto y deformaciones causadas por la indentación en un espacio de dos capas Níquel-Fosforo sobre acero AISI 1045 en un régimen elástico-plástico, esto por medio de un modelado computacional usando el método de elementos finitos, para diseñar y comprobar una metodología alternativa para la determinación de propiedades mecánicas en sistemas sustrato-multicapa, sin necesidad de ensayos experimentales.

Los capítulos en este libro fueron introducidos de manera que el lector no tiene que ser un experto en la materia aquí descrita para entender de manera concisa la investigación realizada en este libro. El contenido se inicia con la presente introducción para después adentrarnos en el Capítulo 2 el cual ahonda los temas referentes al marco teórico, seguido del Capítulo 3 el cual contiene una recopilación de referencias que inciden e influyen en gran medida sobre el trabajo. La metodología inicia en el Capítulo 4, el cual detalla el proceso de desarrollo de la investigación, después se inicia el Capítulo 5 titulado validación computacional, para después avanzar con los Capítulos 5 y 6, los cuales son los referentes a los análisis, resultados y discusiones, y se finaliza el libro con los capítulos de propuestas futuras y conclusiones.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Simulación computacional de un ensayo de dureza en un recubrimiento bicapa de ENP con el fin de describir y analizar el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones presentes en los sistemas de sustratos con recubrimientos multicapa, utilizando el software ANSYS.

1.2. Objetivos específicos

Elaborar tres modelos geométricos de indentación estática en ANSYS de los sistemas de materiales conformados a partir del sustrato (Acero AISI 1045), y los recubrimientos monocapa y bicapa, con el fin de ajustar los diferentes parámetros necesarios en la simulación computacional.

Desarrollar las tres simulaciones en ANSYS utilizando los diferentes modelos geométricos, con la finalidad de comparar los valores obtenidos de cada prueba con los resultados de dureza de ensayos experimentales.

Obtener los mapas de esfuerzo y deformación presentes en los sistemas de materiales bicapa en un ensayo de indentación para analizar su comportamiento.

2. Marco teórico

Este capítulo se enfoca en temas que abordan en gran medida lo referente a las simulaciones computacionales, empleando el método de elementos finitos para la determinación de la dureza de un recubrimiento bicapa de ENP. Se relaciona la información que sea pertinente para la comprensión de la situación actual.

En primer lugar, se analizan los antecedentes, los cuales tienen como objetivo ilustrar el estado del desarrollo de proyectos similares, se evidencian avances, y se finaliza con el marco conceptual, el cual sirve para comprender términos, técnicas, leyes, entre otros. Estos tienen relación directa con la temática del proyecto.

2.1. Antecedentes de la investigación

El estado del arte permite tener una visión sobre las investigaciones que se han desarrollado con respecto al tema a nivel nacional e internacional, esto con el fin de entender el avance que se lleva para una muestra de la fidelidad y veracidad de la situación actual.

2.1.1. Antecedentes internacionales

2.1.1.1. *Analysis of spherical indentations of coating-substrate systems: experiments and finite element modeling (Kot et al. , 2012)*. Los autores de este artículo expresan el afán por comprender mejor la mecánica del contacto de los sistemas recubrimiento-sustrato, del cual aún no se comprendía lo suficiente y no había estudios complejos que mostrasen como se puede predecir la carga máxima al contacto. Sabiendo que no se puede usar la teoría de Hertz, ya que está es válida para materiales homogéneos, pero no sirve cuando el material del recubrimiento tiene distintas propiedades con respecto a las del material del sustrato. Así que se realizaron

ensayos de nano-indentación para un recubrimiento de TiN (Nitruro de Titanio) de depositado en un sustrato de acero. Combinando el modelado FEM y los resultados experimentales pudieron encontrar la determinación de las cargas críticas, que conducen a las formas de destrucción características de los elementos revestidos, debido a el rendimiento del sustrato, la fractura del revestimiento y el estado correspondiente de esfuerzos.

2.1.1.2. *Determinación de la dureza de un recubrimiento a partir de simulación numérica empleando el método de elementos finitos (Víctor y Cesar, 2013).* El objetivo de este proyecto es evaluar experimental y numéricamente la dureza Vickers de un sistema monocapa en un sustrato de acero, recubierto de Níquel-Fosforo por el método de electroless nickel. El proyecto se desarrolló con el fin de hacer un aporte al amplio mercado industrial, el cual ha presentado un crecimiento notable a nivel mundial. Se realiza un modelo computacional sobre un determinado sustrato, el sustrato no es de gran importancia en los resultados finales, ya que el modelo computacional sirve para hacer el mismo análisis en un sustrato distinto, y los resultados son cercanos a los obtenidos experimentalmente. Al analizar los resultados arrojados por el modelo computacional, se pudo determinar los porcentajes de error del experimento, los cuales eran aceptables debido a un valor porcentual muy bajo (porcentaje de error del 4.93%), resultado de la diferencia con datos experimentales. Se logró concluir la posibilidad de representar el comportamiento de los campos de esfuerzo y deformación en un sistema sustrato-recubrimiento utilizando el método de elementos finitos.

2.1.2. Antecedentes nacionales

2.1.2.1. *Electroless nickel phosphorous: una vision global (Gomes, González-Estrada y Pertuz, 2019).* El referente de la investigación a nivel nacional se encuentra en la

universidad industrial de Santander, es una publicación académica de la revista UIS de ingenierías. En el presente trabajo se expone una amplia descripción sobre la técnica ENP, destacando las diferentes propiedades fisicoquímicas que exhibe dicho recubrimiento. Del cual se pueden conceptualizar sobre como es este recubrimiento, su funcionamiento, sus ventajas, sus aplicaciones y entre otras cosas referentes a el uso del mismo.

2.1.2.2. *A combined numerical and experimental approach to evaluate the hardness of aa aluminum 6063 t6 with a ni-p coating (Leon B., Pertuz y Martínez, 2019).* Los autores de la investigación hablan sobre la caracterización de las propiedades mecánicas de los sistemas sustrato-recubrimiento, las cuales no pueden ser halladas por un ensayo de tracción. Los ensayos de dureza resultan en una importante forma de determinar las propiedades mecánicas por su sencillez, versatilidad y economía. Desafortunadamente, el diseño de películas delgadas las cuales tienen propiedades mecánicas óptimas evitan la determinación directa de la dureza del recubrimiento, ya que la influencia del sustrato en el uso de ensayos de micro dureza comienza a hacerse evidente cuando las cargas superan una profundidad equivalente a un décimo del espesor de la capa. Para determinar la verdadera dureza de la capa del recubrimiento, es necesario separar la contribución del sustrato. La investigación se enfoca en el uso e implementación del método de elementos finitos para modelar un ensayo de dureza, ya que este se caracteriza por sus buenos resultados, con bajos errores en comparación con los experimentales. Esto se hace especialmente para mostrar como este método ha permitido contar con una metodología alternativa para la determinación de propiedades mecánicas en materiales, sin necesidad de ensayos experimentales. En este trabajo se determina la dureza de un recubrimiento NiP mediante la combinación de una

simulación numérica basada en el método de elementos finitos y una prueba experimental de indentación Brinell.

2.2. Referentes teóricos

Esta sección del capítulo está destinada para que el lector pueda identificar los antecedentes, las bases teóricas y las bases conceptuales de la investigación.

2.2.1. Finite element modeling of indentation into superhard coatings (He y Veprek, 2002).

Los investigadores aplicaron el modelado de elementos finitos para simular la respuesta mecánica de recubrimientos altamente duros (>40 GPa) sobre sustratos blandos (acero comercial) con indentación. Se encontró que la punta de diamante del indentador ya no se podía tratar como rígida para esta situación, además se halló que el sustrato ejercía una gran influencia incluso en revestimientos relativamente gruesos (~5 μm). Así que, para obtener el valor de la dureza del espesor de la película, se deben realizar los experimentos de indentación dentro del 5% de profundidad del espesor de la capa de la película, en lugar del 10%.

El modelo computacional fue hecho con el software comercial ANSYS 57-ANSYRF, el indentador usado fue un cono con un medio ángulo de 70.3° , y se consideró un mínimo redondeo en la punta debido a que no se puede esperar a que el indentador esté perfectamente afilado. Este valor fue empleado ya que produce una huella donde la relación entre el área de contacto y la profundidad de penetración es idéntica a la existente en una indentación Vickers, el material del indentador se tomó como el diamante y se supuso un módulo de Young de $E=1140$ GPa y un coeficiente de Poisson $\nu=0.04$, así mismo se asumió un comportamiento elástico. El modelo tenía la forma de un cilindro de 200 μm de diámetro y estaba hecho de acero comercial con un valor del módulo de Young $E=205$ GPa, un coeficiente de Poisson $\nu=0.03$, un esfuerzo de fluencia $\sigma_y=280$

MPa, esfuerzo ultimo $\sigma_u=600$ MPa y una dureza aproximada de 1.5 GPa. Se modeló con un comportamiento elástico-plástico. Por otra parte, los recubrimientos que se simularon tenían un comportamiento plástico, valores de grosor de la película entre 2 y 10 μm , un módulo de Young $E= 550$ GPa, su esfuerzo a la fluencia fue asumido para estar entre 5 y 30 GPa, y un coeficiente de Poisson $\nu=0,3$, dando una dureza aproximada entre 15 GPa y 100 GPa. Se usó un mallado para el indentador de 8.000 nodos y para el sustrato se usó un mallado de 20.000 nodos. Con este estudio se logró verificar que en materiales superduros se deben considerar deformaciones en la punta del indentador.

2.2.2. Contact deformation regimes around sharp indentations and the concept of the characteristic strain (Mata, Anglada y Alcalá, 2002).

La publicación consta de un estudio que se realizó del contacto entre un indentador puntiagudo y materiales que desarrollan endurecimiento por deformación utilizando un modelo computacional por el método de elementos finitos. Para esta investigación se utilizó el software comercial ABAQUS, se utilizó un indentador cónico con un medio ángulo de 70.3° y se usó una malla que constaba de 11.905 elementos. Se consideró que no existía fricción durante la penetración del material y además se asumió que el indentador era rígido, esto para que los resultados experimentales de dureza Vickers coincidieran con los simulados. Se estudiaron 52 sólidos los cuales contaban con valores del módulo de Young $E=70, 110$ y 200 GPa; $\sigma_{ys}=50, 100, 400$ y 1000 MPa; $n =0, 0.1, 0.2$ y 0.4 ; y un valor constante del coeficiente de Poisson $\nu =0.3$. Y se desarrollaron las características de la huella dejada por un indentador de estas dimensiones y un material que desarrolla endurecimiento por deformación. El contacto se determinó como completamente plástico cuando las deformaciones se extendían hasta puntos alejados del área de

contacto, mientras que el contorno del indentador indicaba una respuesta elástico-plástica. Entonces se pudo corroborar la validez de la ecuación propuesta por Tabor, la cual dice que la dureza es directamente proporcional a la tensión uniaxial, asociándose así una deformación en solidos blandos completamente plástica, y una deformación elástico-plástica para materiales de dureza elevada.

2.2.3. Post-yielding stress-strain determination using spherical indentation (Kang, Yao y Barbero, 2006).

En esta investigación se realizaron simulaciones del método de elementos finitos para verificar las relaciones empíricas de Tabor, las cuales permiten el uso de la prueba de indentación para la determinación de las curvas características de deformación uniaxial después del punto de fluencia de una variedad de aleaciones metálicas dúctiles, esto en dos configuraciones distintas de un sistema recubrimiento sustrato. El proyecto consistía en simular un indentador esférico, rígido con un diámetro de 100 μm en el software ABAQUS. Se usaron 21 materiales como sustrato, entre ellos el aluminio ($E=69$ GPa, $\nu = 0.33$, $\sigma_y=275$ y 500 MPa, $n = 0.09, 0.18, 0.27,$ y 0.36), además de aleaciones de acero comercial ($E=200$ GPa, $\nu=0.3$, $\sigma_y=242, 500$ y 750 MPa, $n = 0.1, 0.2$ y 0.3), y materiales con soldaduras libres de plomo ($E=26.2$ GPa, $\nu = 0.3$, $\sigma_y= 22.5$ MPa, $n = 0.026, 0.1, 0.2$ y 0.3). Se empleó aluminio ($E=69$ GPa, $\nu = 0.33$, $\sigma_y= 275$ MPa, $n = 0.09$) y silicio ($E = 127$ GPa, $\nu = 0.278$, $\sigma_y = 4410$ MPa, $n = 0$) como recubrimientos, el espesor de la película fue de 30 μm . La malla tenía 21.573 nodos. Con estas condiciones se pudo verificar con la relación de Tabor que en el estudio del tema no se pueden despreciar los efectos que produce el sustrato cuando la profundidad de la indentación es similar al espesor del recubrimiento.

2.3. Referencias conceptuales

Esta parte del capítulo será de gran importancia para mostrar aquellos significados precisos de los conceptos principales, expresiones o variables involucradas en el problema formulado.

2.3.1. Fundamentos del niquelado químico (ENP)

2.3.1.1. Aspectos históricos fundamentales del niquelado químico (ENP). Según Gomes, Gonzales-Estrada y Pertuz, 2019, en el año 1846 Wutz registro la primera reducción de iones níquel por acción de hipofosfito de sodio, realizo experimentos usando diversas combinaciones de hipofosfito con metales alcalinos, alcalinotérreos y de transición. Él descubrió al llevar hasta 100°C una solución acuosa de hipofosfito de níquel, que ocurría una reacción química violenta con la generación de una gran cantidad de gas hidrógeno y la formación de polvo gris oscuro, el cual fue asumido como una mezcla de níquel metálico y oxido de níquel.

En 1911 Breteau se basó en el trabajo de Wurtz para realizar experimentos con soluciones de sulfato de níquel (NiSO_4) e hipofosfito de sodio ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2$) a diferentes concentraciones, así se pudo descubrir la capacidad que posee la reacción para recubrir objetos, ya que esta solución recubrió el interior del envase de vidrio en el cual se realizó, con la misma precipitación de polvo gris que ya había descrito Wurtz.

Figura 1

Procesos de precipitación del baño ENP. A la izquierda el baño el proceso, y a la derecha el polvo que se precipita.



Nota. Figura tomada de Gomes, González-Estrada y pertuz, 2019.

Se llegó a patentar el proceso hasta 1916 por Roux, el cual publicó el método como un proceso para producción de depósitos metálicos, y consistía en el uso de baños alcalinos de citrato de níquel e $\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2$ para el recubrimiento de piezas metálicas y no metálicas, haciendo énfasis en sustratos de aluminio. Cabe resaltar que esta fue la primera vez que se reportó el uso de baños alcalinos para la deposición de níquel, ya que los experimentos anteriores fueron realizados en condiciones de PH neutro.

Recubrimientos de níquel e hipofosfito volvieron a ser reportados en 1931. Scholder y Heckel realizaron dos trabajos investigativos los cuales consistían en exposición del hipofosfito de sodio a sales de níquel y de cobalto a diferentes condiciones de pH. Después Pall y Friederici publicaron un trabajo similar en el que investigaron el efecto del $\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2$ sobre sales de níquel. Estos dos grupos de investigadores reportaron que la composición del precipitado producido, así como también el recubrimiento formado, no eran exclusivamente de níquel metálico, sino que también tenía una importante cantidad de fósforo en su composición (del 10% al 14 % en peso), y así se reportó la presencia de fosfuros de níquel en el proceso como resultado de la reducción con

hipofosfito de sodio. Los grupos de investigadores reportaron que en los diferentes experimentos se obtuvieron diferentes tipos de fosfuros como el Ni₃P, Ni₇P₂, Ni₅P₂, entre otros, y adicionalmente corroboraron que junto a los fosfuros se produce también níquel metálico.

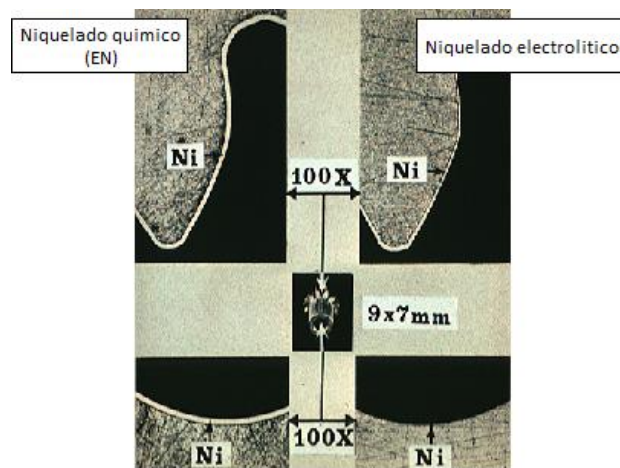
En 1946 los investigadores Brenner y Riddell desarrollaron una técnica de electrodeposición de aleaciones de níquel y tungsteno a partir de baños de citrato de hipofosfito, lo cual los llevo a reportar el primer método estable de recubrimiento en metales que no requería el uso de electricidad, esto fue un descubrimiento accidental, basado en sumergir la pieza metálica en un baño de NiCl₂ y NaH₂PO₂ a un intervalo de pH de 8 a 9 y una temperatura de 90°C. Hoy en día el método se conoce como Electroless Nickel Plating (ENP). Después de esto el desarrollo de la técnica tuvo un interés significativo por parte de diversas industrias interesadas en resolver problemas de corrosión, una de ellas la General American Transportation Corporation (G.A.T.C), debía resolver problemas de seguridad en el transporte de soda caustica, lo cual los llevo a mejorar la protección interna de los tanques, ya que el níquel electrodepositado era poco eficiente como protección contra la corrosión. De esta investigación la G.A.T.C publica la primera fórmula de ENP comercial bajo el nombre de Kanigen.

2.3.1.1.1. Propiedades del niquelado químico. Las propiedades finales del recubrimiento se encuentran en función de los porcentajes de fósforo presentes en el mismo, los cuales van desde un 1% hasta un 14% en peso. Las propiedades varían, tal que se pueden hallar diversos valores de dureza, fragilidad, resistencia al desgaste, soldabilidad y resistencia a la corrosión. Pueden ser modificadas por medio de un tratamiento térmico.

Uno de los aspectos positivos de usar la técnica autocatalítica, a diferencia de la electrolítica, es el espesor constante que se genera y recubre las piezas de geometrías complejas, como se aprecia en la Figura 2.

Figura 2

Diferencias entre las deposiciones finales de la capa entre la técnica autocatalítica (izquierda) y la electrolítica (derecha).



Nota. Adaptado y traducido al español de Advance Plating Technologies.

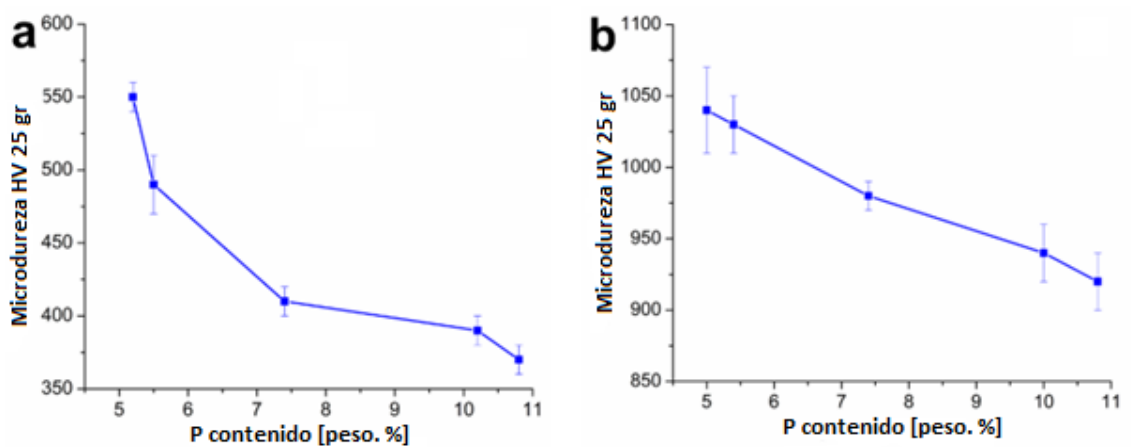
En el método electrolítico pueden presentarse variaciones en los valores del espesor de la capa, los cuales son función de la forma de la pieza a recubrir, la densidad de la corriente empleada y la cercanía de la pieza al ánodo, lo cual lleva a que en algunas piezas se requiera dar un acabado final al recubrimiento, cosa que no ocurre en el niquelado químico. Una de las ventajas de la

aplicación del niquelado químico es el de poder controlar el espesor de las capas del recubrimiento es un cierto rango de valores cercanos.

De este modo se ha llegado a parametrizar las propiedades presentes en las capas de recubrimiento del niquelado químico en función de las concentraciones de fósforo. Teniendo, así como referencia la Figura 3.

Figura 3

Efecto de la composición en la microdureza de los recubrimientos de ENP. (a) sin tratamiento térmico y (b) con tratamiento térmico a 400 °C.



Nota. Adaptado y traducido al español de Buchtík, Krystýnová, Másilko y Wasserbauer, 2019.

Adicional a esto, recientemente se han publicado estudios que clasifican la dureza de los recubrimientos de niquelado químico en función de los porcentajes de fósforo en peso, y también de tratamientos térmicos aplicados a una temperatura y un tiempo determinados. Estudios como el de Buchtík, Krystýnová, Másilko y Wasserbauer, 2019, demostraron no solo que la microdureza disminuía a medida que aumentaban los porcentajes de fósforo en peso, también la microestructura

cambio su naturaleza a cristalina amorfa, pero aun así se notó que el tratamiento térmico aumento significativamente la microdureza del recubrimiento, y que también influyo en la microestructura del sustrato.

2.3.2. Especificación estándar para revestimientos de níquel-fósforo autocatalíticos en metal (ASTM B733-15)

La norma ASTM B733-15 cubre los requisitos necesarios para recubrimientos autocatalíticos de níquel-fosforo aplicado a partir de soluciones acuosas en piezas metálicas para su uso en ingeniería.

Estandariza la aplicación de estos recubrimientos clasificándolos según su contenido de fosforo en peso (bajo, medio, alto %P), según el espesor de la capa y en función de un tratamiento térmico posteriormente hecho.

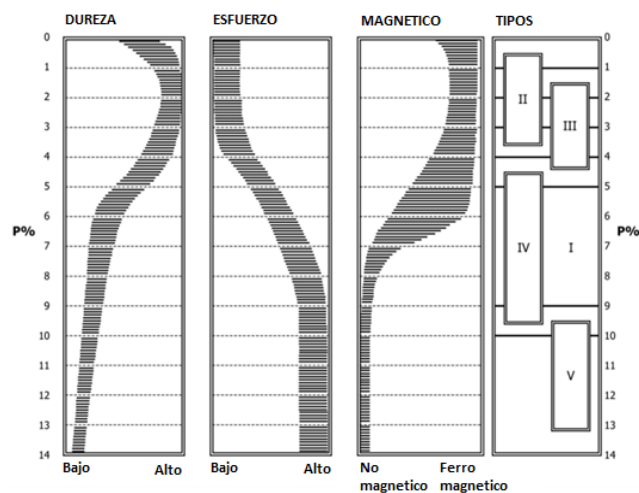
El bajo contenido de fosforo va de 1% a 4%, se pueden distinguir dos grandes usos, porcentajes del 2% al 4% generan resistencia a la abrasión y al desgaste, los porcentajes de 1% al 3% son usados en aplicaciones que requieran propiedades como, soldabilidad, adherencia, incremento en la conductividad eléctrica y resistencia a soluciones alcalinas fuertes. El contenido de fosforo medio (5 a 9% P), es usado en general en aplicaciones en las cuales se requiere una mayor resistencia al desgaste y a la corrosión. Por último, los recubrimientos con altos contenidos de fosforo (más del 10% P) se caracterizan por una alta resistencia de niebla salina, y al acido en una diversa gama de aplicaciones. Cabe mencionar que los recubrimientos con un contenido de fosforo superior al 11.2% P no se consideran ferromagnéticos.

Es importante que el sustrato pueda ser previamente adecuado antes de aplicar el recubrimiento, ya que imperfecciones presentes en el mismo como araños, porosidad,

inclusiones, marcas, grietas, rebabas, cierres en frío y asperezas pueden afectar negativamente el rendimiento del depósito. Además, piezas fabricadas de acero con una resistencia máxima a la tracción de más de 1000 MPa, que se han mecanizado, rectificado o conformado en frío, se les deberá aplicar un tratamiento térmico previo para reducir el riesgo de fragilización por hidrogeno.

Figura 4

Propiedades de los recubrimientos de ENP según el contenido de fósforo.



Nota. Adaptado y traducido al español de la ASTM INTERNATIONAL.

La norma sugiere una supervisión constante de los baños de ENP, esto para poder monitorear y controlar el nivel de pH, temperatura y concentraciones de níquel e hipofosfito del baño. Es importante, el uso de un régimen estadístico para establecer los límites de control.

Los recubrimientos ENP, presentan diferentes propiedades físicas según su concentración de fósforo en peso, esto se puede observar en la Figura 4, en donde se puede observar que los recubrimientos con porcentajes bajos de fósforo presentan mayores valores de dureza, menores valores de esfuerzo y propiedades ferromagnéticas. A mayores contenidos de fósforo (9 a 14% P) se logra una mejor capacidad de resistir esfuerzos, una menor dureza.

2.3.3. Fundamentos de indentación

2.3.3.1. Introducción a la indentación. El principio de la prueba de indentación es aplicar un indentador de forma conocida (esférico, cónico o piramidal) a la superficie del material que se va a probar. Bajo la acción de la carga de indentación, el penetrador se hunde en el material y produce deformaciones elásticas y plásticas en la zona de contacto. Cuando se quita el penetrador, queda una marca residual permanente en el material. Cuanto mayor sea la carga de indentación, mayor será la huella resultante. La dureza se calcula aplicando el cociente de la carga aplicada (P) y la superficie representativa (A) de la banda de rodadura. La relación general se escribe como:

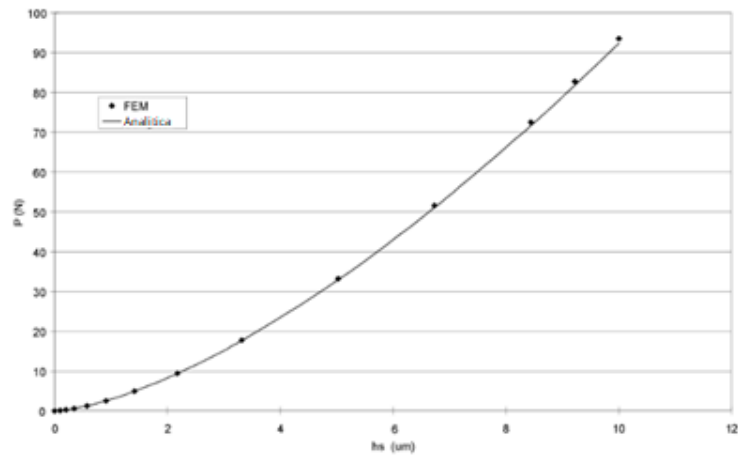
$$H = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuacion (1)}$$

Según la naturaleza del ensayo, el área a considerar será la real de indentación o la proyección de la huella impresa.

La aplicación de la carga de indentación puede ser discreta o continua. En el primer caso, se observará una marca residual después de retirar el indentador con la ayuda de un microscopio óptico. Una regla calibrada permite medir las diferentes longitudes características de la huella. Para la indentación continua, la carga se aplica gradualmente y la relación entre el desplazamiento de la punta del indentador y la carga se mide en tiempo real. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de una curva representativa. El cálculo se hace de la relación entre la carga máxima y la profundidad correspondiente a la misma.

Figura 5

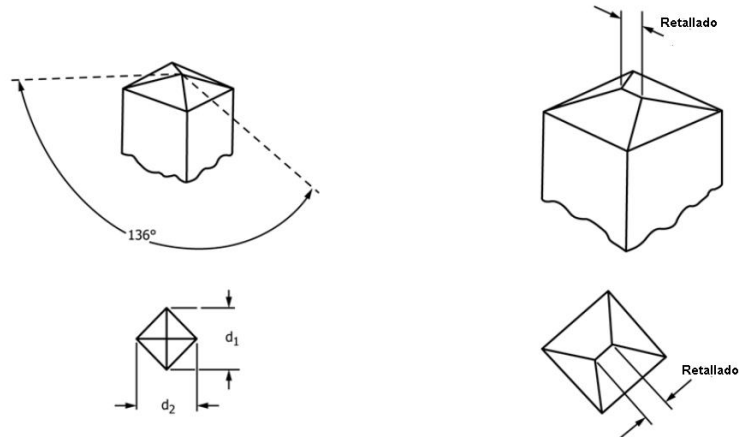
Comparación de la curva de profundidad del indentador generada con FEM y de solución analítica.



Nota. Adaptado de Kang, 2006.

2.3.3.2. Ensayo de Dureza por microindentación. Es una prueba de dureza que se realiza mediante el uso de una máquina calibrada para forzar un penetrador de diamante con determinada geometría, esta varía dependiendo si es con indentador Knoop o Vickers. Las fuerzas de prueba varían de 1 a 1.000 gf, y la diagonal de indentación, o diagonales se miden con un microscopio óptico después de retirar la carga; para cualquier prueba de dureza por microindentación, se supone que la huella no experimenta recuperación elástica después de la eliminación de la fuerza.

2.3.3.2.1. Indentador y número de dureza Vickers. El indentador Vickers es un penetrador de diamante de forma piramidal de base cuadrada con ángulos de cara de 136° (ver figura 6). EL HV es la expresión de dureza obtenida dividiendo la fuerza aplicada a un penetrador Vickers por el área de la superficie de la huella permanente hecha por el indentador.

Figura 6*Indentador Vickers.*

Nota. Adaptado de la Norma ASTM E384-17

2.3.3.2.2. *Formulación.* Las fórmulas presentadas a continuación para calcular la dureza de microindentación se basan en un indentador Vickers y condiciones ideales. El valor medido de la dureza por microindentación de un material está sujeto a varias fuentes de errores, según la variación de la fuerza aplicada. Para la prueba de dureza Vickers, en la práctica, las cargas de prueba son en gramos-fuerza y la diagonal de la huella están en micrómetros. Para estas unidades la ecuación más adecuada es la siguiente:

$$HV = 1854.4 \times \left(\frac{P}{d^2} \right) \quad \text{Ecuacion (2)}$$

Donde:

$P = \text{fuerza, [gf]}$

$d = \text{Longitud media de la diagonal de la huella, } [\mu\text{m}]$

Las ecuaciones para calcular el porcentaje de error y la repetibilidad para la verificación periódica se determinan usando las siguientes ecuaciones:

$$E = 100 \left(\frac{\bar{d} - d_{ref}}{d_{ref}} \right) \quad \text{Ecuacion (3)}$$

E = % de error en la realización de la verificación periodica

\bar{d} = Longitud media de la diagonal de la huella medida en [μm]

d_{ref} = Longitud certificada media de la diagonal de la huella medida en [μm]

$$R = 100 \left(\frac{d_{max} - d_{min}}{\bar{d}} \right) \quad \text{Ecuacion (4)}$$

R = Repetibilidad en la realización de la verificación

d_{max} = Longitud de la diagonal maxima de la huella en la simulación medida en [μm]

d_{min} = Longitud de la diagonal minima de la huella en la simulación medida en [μm]

\bar{d} = Longitud de la diagonal media de la huella en la simulación medida en [μm]

Se asume que la recuperación elástica no ocurre cuando el indentador se quita después del ciclo de carga, es decir, se supone que el indentador retiene la forma del indentador después de que se quita la fuerza, pero esto no siempre es cierto. (ASTM E384–17, 2005)

2.3.4. Fundamentos del método de elementos finitos

2.3.4.1. *Antecedentes históricos del método de elementos finitos.* En investigación hecha por Gupta y Meek en 1996, se llega a la conclusión después de haber realizado un examen

cuidadoso del artículo de Courant, de que aparentemente este utilizó un tipo de procedimiento de elementos finitos en una minimización de energía potencial para la función de tensión de torsión, utilizando valores de puntos de una división hecha en forma de cuadrícula como parámetros desconocidos. Se enfatiza en el uso de la palabra “aparentemente” con precaución, ya que no se dieron detalles de los cálculos utilizados por Courant. Se menciona y se enfatiza el trabajo realizado por Argyris, ya que dicen de su investigación que las técnicas numéricas necesarias para la aplicación de los principios de los desplazamientos virtuales, y las fuerzas se establecieron en forma de matriz consistente. Los métodos matriciales hechos por Argyris pueden convertirse en la base para casi todas las aplicaciones de análisis de tensión del MEF. Argyris demostró con éxito como se puede aplicar el método a un elemento plano rectangular elástico para que la compatibilidad de desplazamientos entre elementos este asegurado mediante la elección de funciones lineales a lo largo de los bordes del elemento. En 1956, la matriz de elementos triangulares fue desarrollada de forma independiente por Turner, en el cual hizo el estudio de las características de convergencia de desplazamientos de elementos planos, comparando el nuevo enfoque con la teoría simple y el método de relajación, para las deflexiones de una viga en voladizo. Finalmente, las técnicas de minimización de funciones, a las que Courant se refería tan oblicuamente, fueron aclaradas por Zienkiewicz en 1965 y abrieron el camino al análisis de problemas de campo por parte del MEF.

El MEF tuvo una acogida casi inmediata en 1960, debido al desarrollo, casi simultáneo, del computador digital, por el cual se lograba efectuar una gran cantidad de operaciones que el método demanda en forma rápida y precisa.

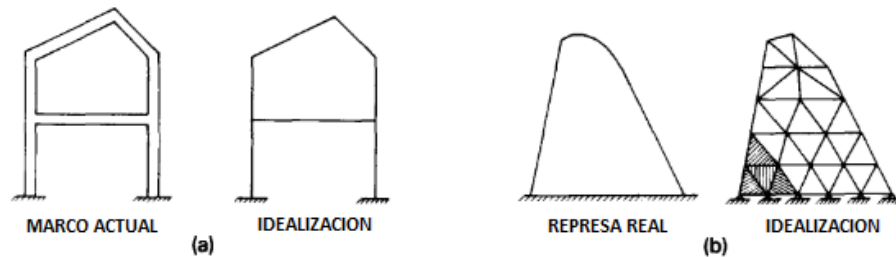
Actualmente el método es aplicado con éxito en problemas tridimensionales, en problemas no lineales y en problemas referentes a distintas áreas de análisis estructural como la transferencia de calor, análisis de campos eléctricos y magnéticos, entre otros.

2.3.4.2. Definición del método. En un trabajo publicado por Clough en 1974, se define el método de elementos finitos como un proceso numérico general para el análisis aproximado de estructuras arbitrarias y sistemas estructurales. El método es la solución de los muchos tipos de sistemas estructurales complejos para los cuales no está disponible ningún otro medio de análisis. Esto generalmente se da en situaciones en las que la geometría, forma y condiciones de contorno son complicadas, cuando existen interfaces arbitrarias entre diferentes tipos de materiales, o también cuando se involucran interacciones entre una variedad finita de diferentes componentes estructurales.

En 1990 el mismo Clough describió la formulación del método de elementos finitos, la cual consistió en la discretización un elemento en un número finito de partes o elementos triangulares o rectangulares para poder hallar una solución aproximada de los esfuerzos planos en los mismos. Los elementos en los cuales se descompuso la geometría están constituidos por nodos, de los cuales se podía conocer su desplazamiento virtual gracias a este método innovador.

Figura 7

Modelado de estructuras como ensambles de elementos discretos. (a) elementos unidimensionales. (b) elemento de esfuerzo plano bidimensionales.



Nota. Adaptado y traducido al español de Clough, 1990.

2.3.4.3. Solución del método de elementos finitos. En el libro del método de elementos finitos (Taylor, Zienkiewicz & Zhu, 2005) se dice que la solución de elementos finitos de un problema sigue una metodología estándar. La hoja de ruta en cualquier proceso de solución siempre se realiza mediante los siguientes pasos:

- Definir el problema a resolver en términos de ecuaciones diferenciales. Construyendo la integral de forma para el problema como trabajo virtual, variacional o formulación débil.
- Seleccionar el tipo de orden de los elementos finitos que se utilizarán en el análisis.
- Definir la malla para el problema. Esto implica la descripción del diseño del nodo y del elemento, así como la especificación de las condiciones de contorno y los parámetros para la formulación utilizada.
- Calcule y ensamble las matrices de elementos. El trabajo virtual particular, variacional o de forma débil proporciona la base para calcular relaciones específicas de cada elemento.

- Resuelva el conjunto resultante de ecuaciones algebraicas lineales para los parámetros desconocidos.
- Genere los resultados de las variables nodales y de los elementos. Las salidas graficas son útiles para este paso.

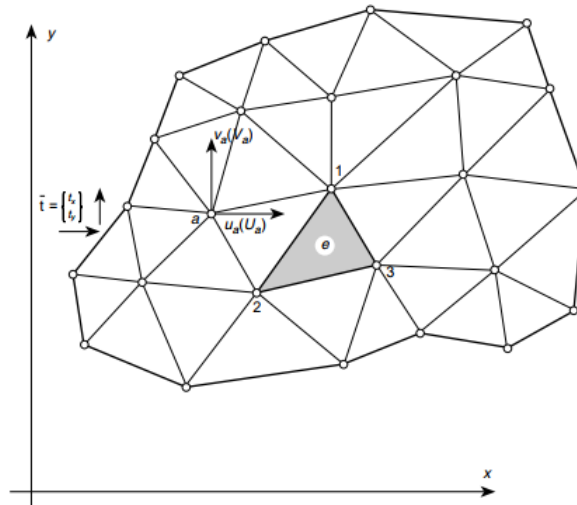
2.3.4.3.1. *Función de desplazamiento.* Para ilustrar este punto se utiliza un elemento finito, e, con forma triangular definido por los nodos 1, 2 y 3, y límites de línea recta entre los nodos (Figura 8). Después se dan los desplazamientos \mathbf{u} para cualquier punto del elemento aproximados como un vector columna, $\hat{\mathbf{u}}$:

$$\mathbf{u} \approx \hat{\mathbf{u}} = \sum_a N_a \tilde{\mathbf{u}}_a^e = [N_1, N_2, \dots] \begin{Bmatrix} \tilde{\mathbf{u}}_1 \\ \tilde{\mathbf{u}}_2 \\ \vdots \end{Bmatrix}^e = \mathbf{N} \tilde{\mathbf{u}}^e \quad \text{Ecuacion (5)}$$

Los desplazamientos o deformaciones que están dados por el vector \mathbf{u} representan los movimientos horizontales y verticales de un punto cualquiera del elemento, como se aprecia en la Figura 8, los desplazamientos verticales estas representados por la letra \mathbf{v} y los desplazamientos horizontales por la letra \mathbf{u} , los cuales a su vez dependen los valores del eje coordenado x y y .

Figura 8

Región de esfuerzos planos dividido en elementos finitos.



Nota. Adaptado de Taylor, Zienkiewicz & Zhu, 2005.

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix}$$

2.3.4.3.2. Deformaciones. Con los desplazamientos conocidos en todos los puntos dentro del elemento, se pueden determinar las deformaciones unitarias en cualquier punto. Estos siempre darán como resultado una relación que se puede escribir en notación matricial como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S}\mathbf{u} \quad \text{Ecuacion (6)}$$

Donde \mathbf{S} es un operador diferencial lineal adecuado. Usando la ecuación 5 la ecuación anterior puede ser aproximada como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} \approx \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}}^e \quad \text{Ecuacion (7)}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{S}\mathbf{N} \quad \text{Ecuacion (8)}$$

Para el caso de tensiones plana, las deformaciones relevantes de interés son las que ocurren en el plano y se definen en términos de los desplazamientos por relaciones conocidas que definen al operador **S**.

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Con las funciones de forma N_1, N_2 y N_3 ya determinadas para un elemento triangular, la matriz **B** se puede obtener fácilmente usando la ecuación 8.

2.3.4.3.3. Esfuerzos. Se percibe que el material dentro de los límites del elemento pueda estar sujeto a tensiones iniciales consecuentes de cambios de temperatura, contracciones, crecimiento de cristales, entre otros. Tales deformaciones se indican mediante el término ε_0 , y las deformaciones unitarias reales serán causadas entonces por la diferencia entre las deformaciones reales y las iniciales. Además, es conveniente asumir que al comienzo el cuerpo está estresado debido a algún sistema conocido de tensiones residuales iniciales σ_0 , los cuales podrían medirse, pero cuya predicción es imposible sin el conocimiento completo de la historia del material. Así, asumiendo un comportamiento plástico lineal, la relación entre tensiones y deformaciones sería lineal y de la forma:

$$\sigma = \mathbf{D}(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde **D** es una matriz de elasticidad que contiene las propiedades apropiadas del material. Nuevamente, para el caso particular de tensión plana, deben considerarse tres componentes de

tensión correspondientes a las deformaciones ya definidos (Taylor, Zienkiewicz & Zhu, 2005).

Estos son en una notación familiar:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

Resolviendo \mathbf{D} , en base a las ecuaciones de deformaciones para cada eje coordenado, se obtiene que esta es igual a:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1 - \nu)}{2} \end{bmatrix}$$

2.3.4.3.4. *Fuerzas equivalentes nodales.* Teniendo la expresión:

$$\mathbf{q}^e = \begin{Bmatrix} q_1^e \\ q_2^e \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

La cual define las fuerzas nodales, las cuales son estáticamente equivalentes a las tensiones en los límites y a las fuerzas corporales distribuidas que actúan sobre él. Cada una de las fuerzas \mathbf{q}_a^e deben contener el mismo número de componentes como el desplazamiento nodal correspondiente $\tilde{\mathbf{u}}_a$ y ordenarse en las direcciones correspondientes.

Las fuerzas distribuidas sobre el cuerpo \mathbf{b} se definen como las que actúan sobre una unidad de volumen del material dentro del elemento con direcciones correspondientes a las de los desplazamientos \mathbf{u} en ese punto.

En el caso particular de la tensión plana, las fuerzas nodales son, por ejemplo:

$$\mathbf{q}_a^e = \begin{Bmatrix} U_a^e \\ V_a^e \end{Bmatrix}$$

Para determinar las fuerzas nodales que resultan de las tensiones, los esfuerzos en los límites se calculan primero a partir de:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \end{Bmatrix} = t \begin{bmatrix} n_x & 0 & n_y \\ 0 & n_y & n_x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

Donde t es un grosor constante del corte de deformación plana y n_x, n_y son los cosenos de dirección de la normal hacia afuera del límite del elemento. Para el elemento triangular las tracciones son constantes.

Por tanto, por equivalencia estática, las fuerzas nodales en el nodo 1 están dadas por:

$$q_1 = \mathbf{B}_1^T \boldsymbol{\sigma} \Delta t \quad \text{Ecuacion (10)}$$

Combinando la expresión de esfuerzos y deformación de cada elemento obtenemos:

$$\mathbf{q} = \mathbf{B}^T [\mathbf{D}(\mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}}^e - \boldsymbol{\varepsilon}_0) + \boldsymbol{\sigma}_0] \Delta t \quad \text{Ecuacion (11)}$$

$$\mathbf{q}^e = \mathbf{K}^e \tilde{\mathbf{u}}^e + \mathbf{f}^e \quad \text{Ecuacion (12)}$$

Donde:

$$\mathbf{K}^e = \int_{V^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \cdot dV \quad \text{Ecuacion (13)}$$

$$\mathbf{f}^e = - \int_{V^e} \mathbf{N}^T \mathbf{b} \cdot dV - \int_{V^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \cdot dV + \int_{V^e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0 \cdot dV \quad \text{Ecuacion (14)}$$

En la expresión de \mathbf{f}^e (ecuación 14) aparecen, en orden: las fuerzas debidas a las fuerzas distribuidas, las deformaciones iniciales y las tensiones iniciales. \mathbf{K} (ecuación 13) es la matriz de rigidez.

Considerando que el límite está sujeto a una carga externa distribuida, digamos $\bar{\mathbf{t}}$ por unidad de área. Ahora se tendría que agregar un término adicional a las fuerzas nodales del elemento cuyo contorno posee una superficie \mathbf{A}^e , el cual estaría dado por:

$$- \int_{\mathbf{A}^e} \mathbf{N}^T \mathbf{t} \cdot dA$$

Se observa que $\bar{\mathbf{t}}$ debe tener el mismo número de componentes que \mathbf{u} para que la expresión anterior sea válida. Dicho elemento de contorno se muestra nuevamente para el caso especial de tensión plana en la Figura 8. Una vez que se ha determinado los desplazamientos nodales mediante la solución de tipo “estructural”, las tensiones en cualquier punto del elemento se pueden encontrar a partir de las relaciones de las ecuaciones (7) y (9), dando:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}}^e - \boldsymbol{\varepsilon}_0) + \boldsymbol{\sigma}_0 \quad \text{Ecuación (15)}$$

2.3.5. Tratamientos térmicos. El libro de Roy F. Kern llamado Steel Selection: “A guide for improving performance and profits” establece, a los tratamientos térmicos como operaciones de calentamiento y enfriamiento, y a condiciones determinadas, a los cuales se someten los aceros para cambiar sus características, por unas más adecuadas para su empleo. Se establece que los tratamientos térmicos modifican la constitución, estructura y estado mecánico de los aceros.

La constitución del acero es afectada debido a las variaciones en el estado del carbono; se modifica la estructura variando el tamaño del grano y el reparto de los constituyentes. Y el estado mecánico queda afectado debido a las tensiones a las que quedan sometidos los materiales después de algunos tratamientos térmicos. (Kern, 1979)

2.3.5.1. Temple. Se define el temple como el calentamiento del material hasta la temperatura crítica, seguido de un enfriamiento muy rápido para evitar la transformación

normal de la composición obtenida durante el calentamiento. De esta manera, es posible obtener un componente "anormal" que tiene su estructura cristalina formada y cuya tensión de deformación aumenta su dureza. El propósito del templeado es mejorar fundamentalmente la dureza y la resistencia. Mecánico.

El endurecimiento obtenido por temple se puede comparar con el endurecimiento obtenido por deformación en frío. Durante este proceso, el aumento de dureza se debe a el esfuerzo al que queda sometido cuando se deforma, conocido también como la deformación de su estructura micrográfica, y en el temple el aumento de su dureza se debe a los esfuerzos que quedan en los cristales por la deformación de su estructura cristalina.

Hay dos clases de temple: el temple **martensítico** y el temple de **precipitación**.

2.3.5.1.1. *Temple martensítico.* El temple martensítico es aplicado mayormente a los aceros, y la raíz de su nombre se debe al constituyente duro obtenido en este, la martensita, que es, ferrita sobresaturada de carbono. Esta sobresaturación distorsiona los cristales de ferrita y los pone en tensión y, por consiguiente, los endurece. En las aleaciones de metales no féreos a las que se aplica también esta clase de temple, el constituyente formado no es la martensita, sino otro de las mismas características.

2.3.5.1.2. *Temple de precipitación.* El temple de precipitación se aplica principalmente a algunas de las aleaciones de aluminio, magnesio y cobre. Se denomina así porque el endurecimiento se obtiene por la precipitación de un compuesto químico, que es el que pone en tensión a los cristales y los endurece, En el temple martensítico, el constituyente obtenido al final del enfriamiento.

3. Metodología

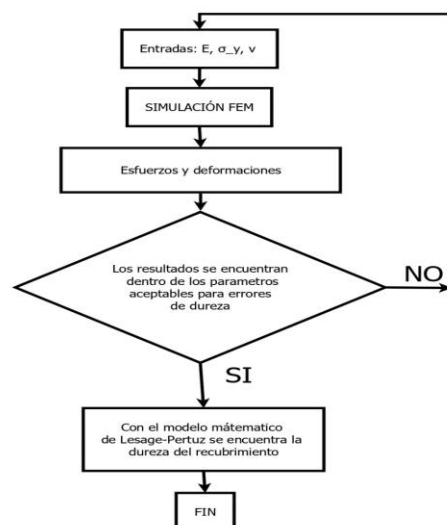
La finalidad de este capítulo es dar un compendio de los métodos, técnicas y procedimientos por los cuales se llevó a cabo la planificación y desarrollo del proyecto. Al final de este se obtendrán los conocimientos necesarios para comprender el procedimiento metodológico que se llevó a cabo.

Se encuentra dividido en dos partes, la metodología experimental, ensayo de microdureza Vickers (la cual se realizó en Venezuela bajo la supervisión de M. Sc. Nelson Jesús Gomes Vieira y como responsable del ensayo Karolayn Díaz Laboratorista del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas - IVIC) y la metodología numérica, que consta del planteamiento del modelo matemático del ensayo de microdureza Vickers utilizando el método de elementos finitos.

3.1. Metodología numérica

Figura 9

Diagrama de flujo.



Las simulaciones computarizadas de los ensayos de microindentación Vickers, fueron realizadas en el software comercial ANSYS, el proceso del desarrollo se logró por medio del método de elementos finitos. El software cuenta con múltiples bloques de funciones para los distintos tipos de configuraciones en los que se puede realizar una simulación. Así entonces, se consideró el proceso de indentación como estático, y se desarrolló en la configuración *Static Structural* del programa, debido a esto no se tomaron consideraciones del tiempo ya que este es una cualidad de una simulación dinámica. El proceso de solución consta de diferentes etapas, las cuales se fraccionaron y presentaron en la Figura 9.

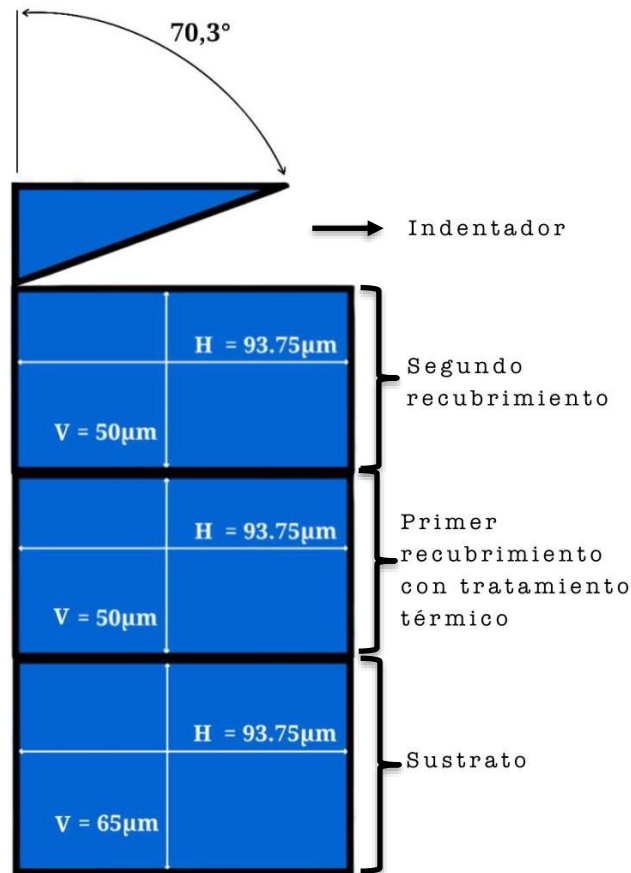
3.1.1. Partes

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 cuenta con 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° , como se muestra en la Figura 10. 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 indentador tipo Vickers, como lo aclara Hernández et al, 2016. 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 presentaron dimensiones de alrededor de 10 a 15 veces mayores que las dejadas por las del indentador en la simulación.

Figura 10

Croquis representativo del primer modelo de estudio, indentador y sustrato.



Nota. croquis en vista de corte del indentador (parte superior) y el sustrato (parte inferior).

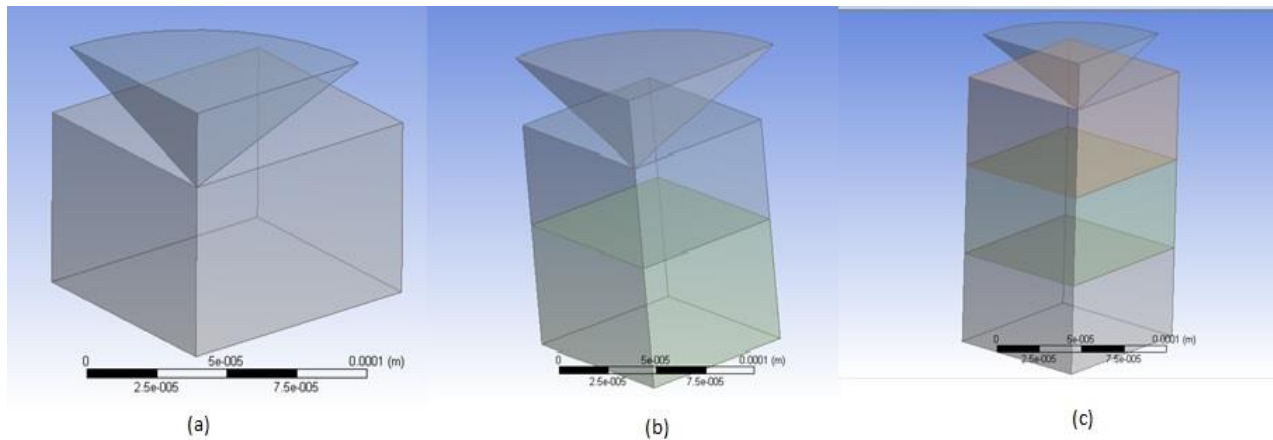
Se construyeron tres modelos para el estudio de la dureza superficial del recubrimiento ENP y las interacciones del sistema sustrato-bicapa. Los modelos se aprecian en la Figura 11 y sus dimensiones en la Tabla 1. El primer modelo computacional se trató de la simulación del ensayo de microindentación 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°C por una hora y enfriado en el horno en el cual fue aplicado el mencionado temple, finalmente el último modelo contuvo 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 11 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.

Figura 11

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



Nota. Los incisos corresponden a los modelos de estudio (a) primer modelo, (b) segundo modelo y (c) tercer modelo.

Tabla 1

Dimensiones del sustrato y capas de recubrimiento.

| Geometría | Ancho (μm) | Largo (μm) | Espesor (μm) |
|-----------------------|---|---|---|
| sustrato | 83 | 93.75 | 65 |
| Primer recubrimiento | 83 | 93.75 | 50 |
| Segundo recubrimiento | 83 | 93.75 | 50 |

Nota. Cabe mencionar que las dimensiones de ancho y largo corresponde a las dimensiones de una cuarta parte del modelo, ya que fue utilizada simetría en estos.

3.1.2. 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, ya que existen implicaciones de selección cuando hay conexiones entre subelementos de mallas donde se involucran distintos cuerpos o geometrías en contacto.

Para el mallado de la geometría se debieron tener múltiples consideraciones en cuenta, 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 adapten mejor a un refinamiento en el mallado. Debido además a que se crearon tipos de contactos e interacciones entre las capas e indentador, era necesario 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 configuró 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, para lograr resultados más exactos con un tiempo de cómputo óptimo.

3.2.2.1 Patch conforming method. Esta herramienta fue usada para la selección de los elementos en la solución de este ejercicio, se implementó para definir el tipo método usado en el mallado y el orden de este (lineal o cuadrático). Se utilizaron elementos de orden cuadrático ya que el orden del elemento usado en el problema aumenta el nivel de precisión, obteniendo así una importante gama de distintos valores de esfuerzos presentes únicamente en un subelemento.

3.2.2.2 Generación de malla. La malla generada contiene los parámetros para el óptimo funcionamiento y resolución de la simulación computarizada. 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 2 para cada uno de los modelos.

Tabla 2

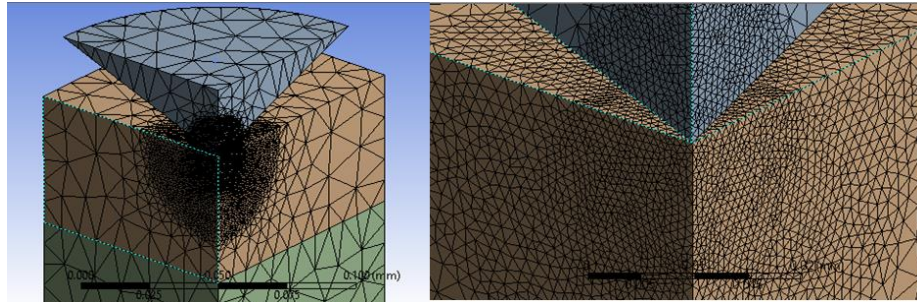
Numero de nodos y elementos del mallado por simulación.

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

Nota. el número de nodos y elementos por modelo depende del tamaño y orden de estos.

Figura 12

Campos de influencia del refinado de malla a la izquierda y vista en detalle a la derecha.



Nota. A la izquierda la vista global del mallado en la segunda capa del recubrimiento y el indentador, a la derecha la vista en detalle

3.1.3. Configuración de análisis

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, ya 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 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 configuro *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 malla anteriormente mencionadas. En este módulo de trabajo se usaron configuraciones tales como *Patch Conforming Method* y *Vertex Sizing*. La última se utilizó como método de refinamiento en la zona de concentración de los valores de esfuerzo y deformación más importantes presentes en los resultados.

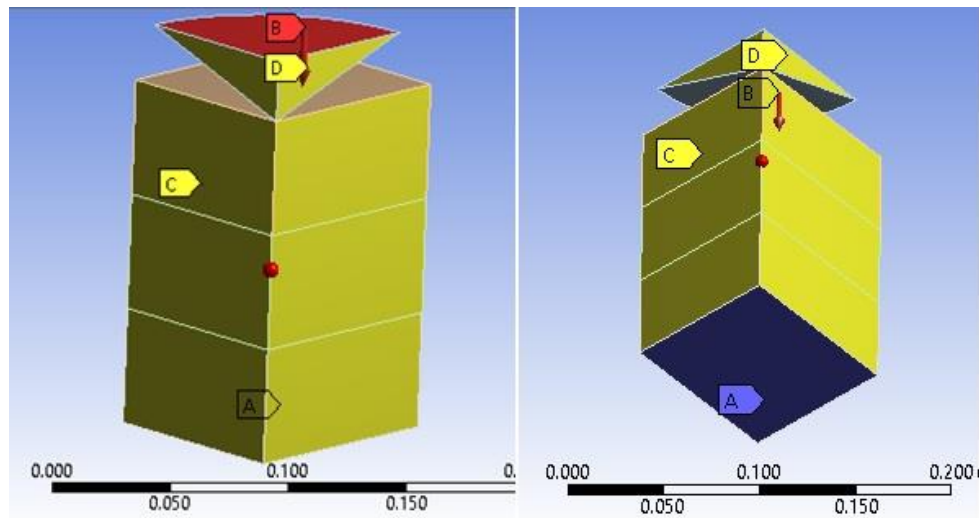
Mesh edit es una herramienta que simuló las conexiones presentes en el mallado y la interacción al contacto también inherentes de los materiales estratificados. Debido a que los esfuerzos y deformaciones muchas veces presentan influencia de elementos estratificados, es de gran importancia crear conexiones de malla entre los nodos de los elementos en estos tipos de contactos para obtener el verdadero comportamiento de esta influencia. También cabe aclarar que

la herramienta únicamente permite crear estas conexiones entre los nodos y elementos del mismo tipo.

Para añadir las condiciones de contorno a las que están sometidos inicialmente los modelos fue necesario utilizar del módulo *Static structural*, además de que este mismo contiene un submódulo llamado *solution* en donde se visualizan los resultados de las simulaciones. Se insertó 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 13.

Figura 13

Condiciones de borde en el modelo computacional.



Nota. a) soporte fijo, b) fuerza aplicada, c) restricción de desplazamiento y d) restricción de desplazamiento.

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 desplazamientos máximos presentes en el ensayo.

3.1.4. 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.

El valor del coeficiente de Poisson para aceros al carbono no tiene variaciones importantes de una aleación a otra. La Cia. General de Aceros S.A. da un valor para el mismo de 0.3, valor que fue implementado en las propiedades del acero.

Tabla 3

Propiedades mecánicas del Acero AISI 1045 (Calik, 2009).

| Esfuerzo de Fluencia “Sy” [Mpa] | Módulo de Young “E” [GPa] |
|--|----------------------------------|
| 510 | 200 |

Nota. Calik, A., Sahin, O., y Ucar, N. (2009).

Tabla 4

Propiedades mecánicas del acero AISI 1045 (Zhao, 2018).

| Esfuerzo de Fluencia “Sy” [Mpa] | Módulo de Young “E” [GPa] |
|--|----------------------------------|
| 507 | 223 |

Nota. Adaptado de Zhao, G., Liu, L., Wang, D., Guo, J., & Chen, W. (2018)

Tabla 5

Propiedades mecánicas del acero AISI 1045 (Li, 2019).

| Esfuerzo de Fluencia “Sy” [Mpa] | Módulo de Young “E” [GPa] |
|--|----------------------------------|
| 479.1751 | 253.7455 |

Nota. Adaptado de Li, C., Zhao, H., Sun, L., & Yu, X. (2019)

Esfuerzo a la fluencia σ_y : 500 (MPa)

Módulo de Young: 220000 (MPa)

Coefficiente de Poisson: 0.3

3.1.5. 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 recordar que las propiedades mecánicas del primer recubrimiento son distintas que las de la segunda capa, además de que las propiedades mecánicas de la zona de difusión entre los dos recubrimientos son distintas entre sí.

Tabla 6

Coefficiente de Poisson de los recubrimientos Ni – P.

| Material | Coefficiente de Poisson |
|---|--------------------------------|
| Depósito de Electroless Nickel-Phosphorus | 0.3 |

Nota. Adaptado de Arora, Uday Venkat Kiran & Dumpala, 2018.

Las propiedades mecánicas del recubrimiento ENP con tratamiento térmico se encontraron basándose en las estimaciones presentadas en la **NACE - International Publication** 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), entorno a esto se estimó un esfuerzo a la fluencia teniendo en cuenta que el mismo también aumento su valor después del tratamiento ya que luego de este la superficie del recubrimiento cambia su estructura interna molecular, comportándose así de forma similar a un material frágil.

Los valores de las propiedades para la primera capa fueron:

Módulo de Young: 180000 (MPa)

Esfuerzo a la fluencia: 1100 (MPa)

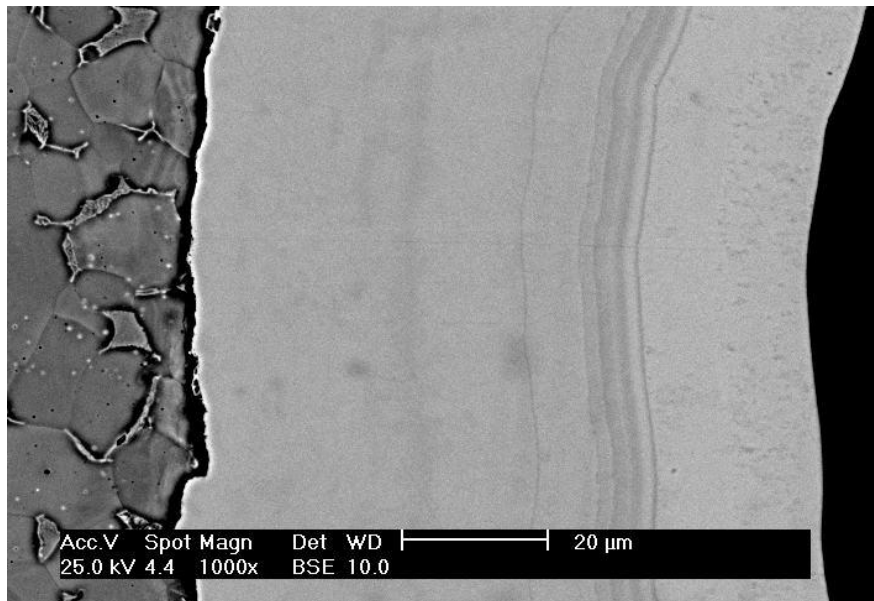
Coefficiente de Poisson: 0.3

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 14.

Se tuvieron en consideración las propiedades mecánicas de los recubrimientos con porcentajes mayores al 11% de fosforo, ya que estos son considerados niveles altos y poseen las mismas características mecánicas.

Figura 14

Zona de difusión entre las capas del recubrimiento bicapa.



Nota. Imagen entregada por el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC.

Tabla 7*Propiedades del Electroless Nickel-Phosphorus.*

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

Nota. Adaptado de MacDemid Enthone

En 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)

Coefficiente de Poisson: 0.3

3.1.6. Visualización de resultados

El programa cuenta con distintos tipos de análisis, los cuales se diferencian por las ecuaciones utilizadas para hacer los cálculos referente de 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 el cual se halle bajo la influencia de una fuerza externa.

El programa maneja una amplia variedad de teorías de falla para hallar los esfuerzos relacionados con la prueba de indentación. Para el análisis de resultados se eligieron únicamente

las teorías más relevantes en la búsqueda del comportamiento real del material, teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado 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, para después poder hallar 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 contra 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.

3.2. Estimación de la dureza absoluta de los recubrimientos

El método de Lesage-Pertuz 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 cuadrática que rige dicho modelo es la siguiente:

$$A * H_f^2 + B * H_f + C = 0 \quad \text{Ecuacion (16)}$$

Donde:

$$A = f^2 * (f - 1) \quad \text{Ecuacion (17)}$$

$$B = (-2f^3 + 2f^2 - 1) * H_s + (1 - f) * H_c \quad \text{Ecuacion (18)}$$

$$C = f * H_c * H_s + f^2 * (f - 1) * H_s^2 \quad \text{Ecuacion (19)}$$

$$f = \left(\frac{t}{d}\right)^m \quad \text{Ecuacion (20)}$$

El valor de m se obtiene de una regresión lineal, de todos los valores de carga $P(N)$ y diagonal d (μm) de la dureza compuesta, como se muestra en la Ecuación (21).

$$\ln d = m * \ln P + b \quad \text{Ecuacion (21)}$$

$H_c =$ Dureza compuesta.

$H_s =$ Dureza del sustrato.

$H_f =$ Dureza del recubrimiento.

$t =$ Espesor del recubrimiento (μm).

$d =$ Diagonal de la huella (μm).

3.3. Construcción de la curva de esfuerzo - deformación a partir de indentación para el sustrato

La construcción de las curvas de esfuerzo - deformación de las pruebas de microindentación para el sustrato se realizan a partir de las fórmulas empíricas de Tabor, descritas

por Kang, Yao y Barbero, 2006. Este tipo de análisis no es aplicable a los sistemas de materiales estratificados en donde los resultados obtenidos contendrían la influencia de los esfuerzos aportados por el material subsecuente.

$$\varepsilon_i = 0.2 \frac{d}{D} \quad \text{Ecuacion (22)}$$

$$\sigma_i = \frac{P_m}{2.8} \quad \text{Ecuacion (23)}$$

Donde:

$\varepsilon_i =$ Deformacion unitaria.

$d =$ Diametro de impresion de hendidura.

$D =$ Diametro de la bola del indetador Brinell.

La Ecuación 22 esta descrita para un indentador tipo Brinell, así pues, basándonos en las investigaciones realizadas por Martínez y Richard, 2009, se propuso tomar en cuenta una relación entre el promedio del diámetro de la huella (indentación Brinell) y la diagonal de la huella (indentación Vickers) para una misma carga aplicada. Para estas pruebas los investigadores utilizaron un indentador Brinell de un diámetro igual a 2.5 (mm), obteniéndose así la siguiente relación:

$$\frac{d_V}{d_B} = K_1 \quad \text{Ecuacion (24)}$$

Donde:

$d_V =$ Diagonal de la huella (indentacion Vickers).

$d_B =$ *Diametro de la huella (indentacion Brinell).*

$K_1 =$ *Valor promedio de la relacion d_V/d_B (1.22845).*

Sustituyendo la relación de la Ecuación 24 en la Ecuación 23 propuesta por Tabor para deformaciones debido a un indentador Brinell ($D=2.5$ mm), se obtuvo una ecuación para la deformación real hecha por un ensayo de indentación Vickers y una constante K_1 :

$$\varepsilon_i = 0.2 \frac{d_V}{K_1 * D} \quad \text{Ecuacion (25)}$$

4. Diseño metodológico

Tabla 8

Diseño metodológico del proyecto.

| Fase | Descripción | Actividades |
|------|--|---|
| I | Recopilación de datos de fuentes de tipo primario y secundario | <ul style="list-style-type: none"> Se recolectarán datos concernientes al tema de investigación, los cuales tengan aportes contribuyentes en el desarrollo del proyecto (revistas, artículos, libros, tesis e información en línea), esto con el fin de conocer lo referente a los procesos para llevar a cabo los objetivos del proyecto. Obtención de datos experimentales de la microdureza de los sistemas multicapa por parte de un laboratorio. |
| II | Comprensión del método y funcionamiento del software | <ul style="list-style-type: none"> Conceptualización del método para la mejor comprensión, posterior uso y aplicación del mismo en el problema de estudio. Se desarrollarán conocimientos y competencias para el uso del software ANSYS. |
| III | Desarrollo de un modelo computacional para estudio | <ul style="list-style-type: none"> Desarrollo del modelo computacional para el ensayo de microindentación en el sustrato “Acero AISI 1045”. |

| | | |
|----|---------------------------------------|--|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo del modelo computacional para el ensayo de microindentación del sustrato más una capa de nickel-phosphorus de 50 micras de espesor con posterior tratamiento térmico de 400°C a una hora. • Desarrollo del modelo computacional para el sistema multicapa. |
| IV | Simulación y recopilación de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Se pretende simular los modelos para la recolección de datos y posterior uso de la información. |
| V | Comparación y obtención de resultados | <ul style="list-style-type: none"> • Realizar la construcción y comparación entre los resultados experimentales y computacionales, para la obtención de márgenes de error de las pruebas, y obtención de resultados. |

5. Resultado y análisis

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos una vez aplicadas las técnicas descritas en la metodología del capítulo anterior. Siguiendo el orden de ideas mencionado anteriormente, primero se obtendrán los resultados por los ensayos experimentales de indentación Vickers, luego, los resultados del estudio derivado del modelo computacional del mismo ensayo usando el método de elementos finitos, y finalmente, el análisis de los resultados obtenidos.

5.1. Cálculo de la dureza experimental

Se utilizó una gráfica de dispersión para poder encontrar la ecuación potencial de la cual se obtendrían los valores comparativos de dureza experimental.

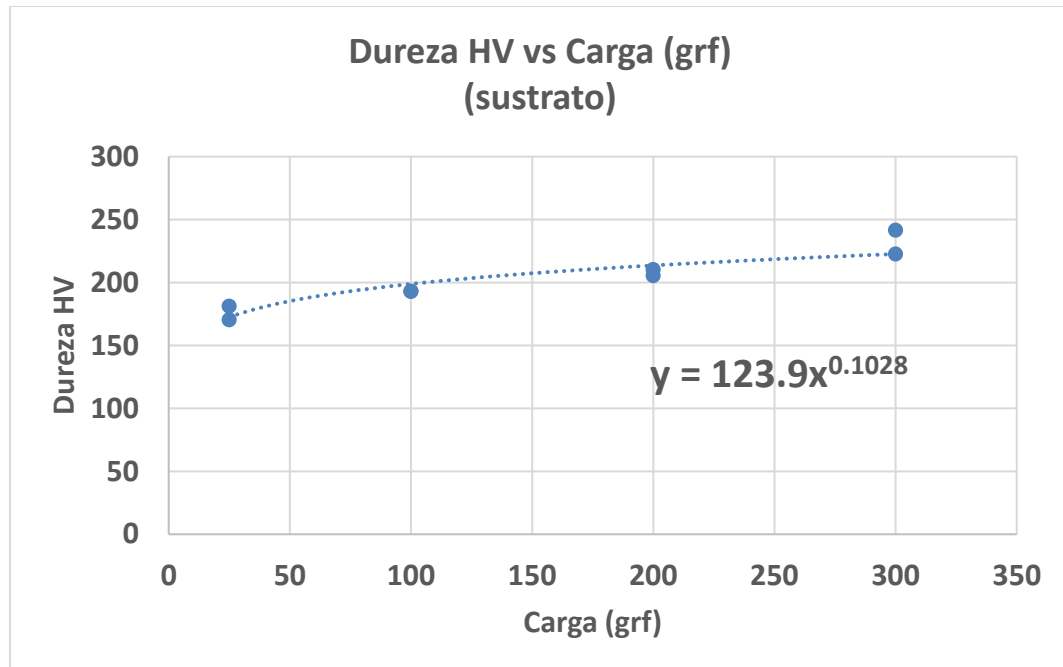
Tabla 9*Dureza experimental para el acero AISI 1045.*

| Carga | | 300 grf | |
|--------------------------|------------------|----------------|--------------------|
| Huella | 1 | | 2 |
| Vertical | 50 μm | | 46 μm |
| Horizontal | 50 μm | | 50 μm |
| Promedio diagonal | 50 μm | | 48 μm |
| Dureza (HV) | 222.5 | | 241.5 |
| Promedio (HV) | | 232 | |
| Carga | | 200 grf | |
| Huellas | 1 | | 2 |
| Vertical | 41 μm | | 41 μm |
| Horizontal | 43 μm | | 44 μm |
| Promedio diagonal | 42 μm | | 42.5 μm |
| Dureza (HV) | 210.2 | | 205.3 |
| Promedio (HV) | | 207.8 | |
| Carga | | 100 grf | |
| Huellas | 1 | | 2 |
| Vertical | 32 μm | | 31 μm |
| Horizontal | 30 μm | | 31 μm |
| Promedio diagonal | 31 μm | | 31 μm |
| Dureza (HV) | 192.9 | | 192.9 |
| Promedio (HV) | | 192.9 | |
| Carga | | 25 grf | |
| Huellas | 1 | | 2 |
| Vertical | 16 μm | | 16 μm |
| Horizontal | 16 μm | | 17 μm |
| Promedio diagonal | 16 μm | | 16.5 μm |
| Dureza (HV) | 181.1 | | 170.3 |
| Promedio (HV) | | 175.7 | |

Nota. Datos aportados por el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC.

Figura 15

Grafica de valores de dureza (HV) vs carga (grf) para el acero AISI 1045.

**Tabla 10**

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

| Carga 300 grf | | |
|--------------------------|---------|-------|
| Huella | 1 | 2 |
| Vertical | 43 μm | 43 μm |
| Horizontal | 43 μm | 43 μm |
| Promedio diagonal | 43 μm | 43 μm |
| Dureza (HV) | 300.8 | 300.8 |
| Promedio (HV) | 300.8 | |
| Carga 200 grf | | |
| Huellas | 1 | 2 |
| vertical | 29 μm | 32 μm |
| Horizontal | 30 μm | 32 μm |
| Promedio diagonal | 29.5 μm | 32 μm |
| Dureza (HV) | 426.2 | 362.2 |
| Promedio (HV) | 394.2 | |
| Carga 100 grf | | |
| Huellas | 1 | 2 |

| | | |
|--------------------------|------------------|--------------------|
| vertical | 16 μm | 15 μm |
| Horizontal | 16 μm | 16 μm |
| Promedio diagonal | 16 μm | 15.5 μm |
| Dureza (HV) | 724.4 | 771.8 |
| Promedio (HV) | | 748.1 |
| Carga 25 grf | | |
| Huellas | 1 | 2 |
| vertical | 10 μm | 10 μm |
| Horizontal | 10 μm | 10 μm |
| Promedio diagonal | 10 μm | 10 μm |
| Dureza (HV) | 463.6 | 463.6 |
| Promedio (HV) | | 463.6 |

Nota. Datos aportados por el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC.

Figura 16

Grafica de valores de dureza (HV) vs carga (grf) para el primer recubrimiento (dureza compuesta).

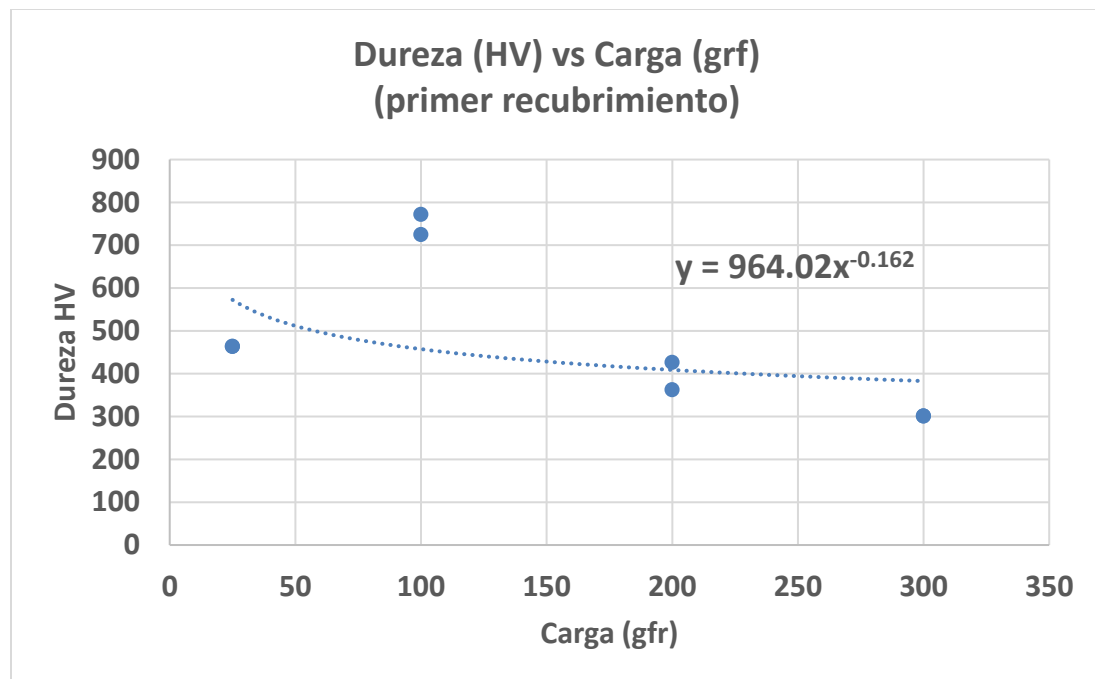


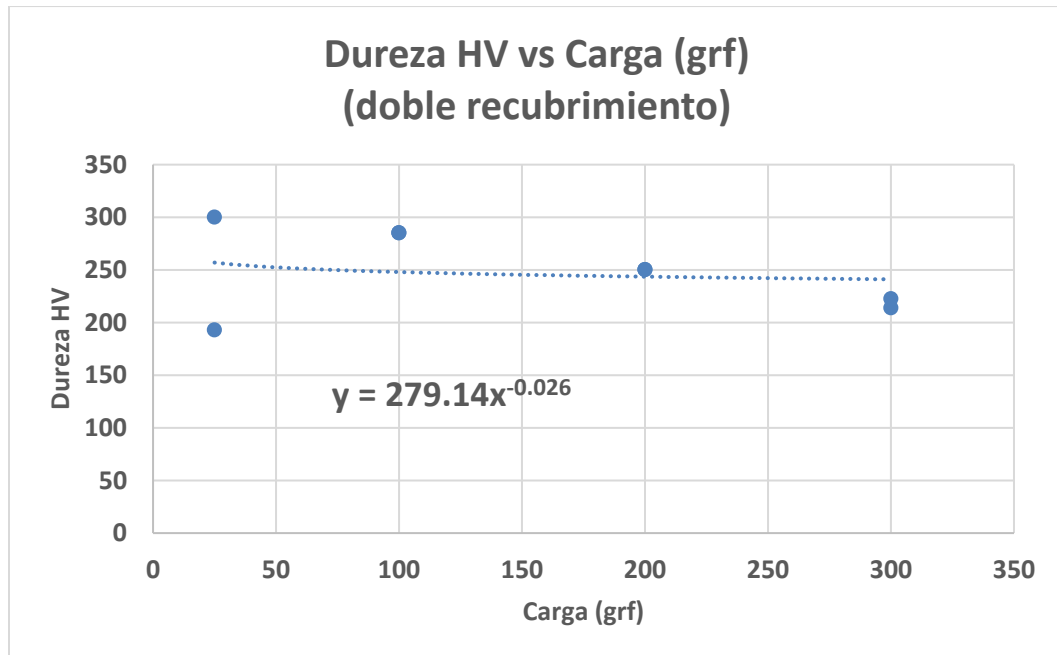
Tabla 11*Dureza experimental Vickers para el doble recubrimiento.*

| Carga | | 300 grf | |
|--------------------------|--|--------------------|--------------------|
| Huella | | 1 | 2 |
| Vertical | | 52 μm | 50 μm |
| Horizontal | | 50 μm | 51 μm |
| Promedio diagonal | | 51 μm | 50.5 μm |
| Dureza (HV) | | 213.8 | 222.5 |
| Promedio (HV) | | 218.2 | |
| Carga | | 200 grf | |
| Huellas | | 1 | 2 |
| vertical | | 39 μm | 39 μm |
| Horizontal | | 38 μm | 38 μm |
| Promedio diagonal | | 38.5 μm | 38.5 μm |
| Dureza (HV) | | 250.2 | 250.2 |
| Promedio (HV) | | 250.2 | |
| Carga | | 100 grf | |
| Huellas | | 1 | 2 |
| vertical | | 26 μm | 26 μm |
| Horizontal | | 25 μm | 25 μm |
| Promedio diagonal | | 25.5 μm | 25.5 μm |
| Dureza (HV) | | 285.1 | 285.1 |
| Promedio (HV) | | 285.1 | |
| Carga | | 25 grf | |
| Huellas | | 1 | 2 |
| vertical | | 43 μm | 15 μm |
| Horizontal | | 43 μm | 16 μm |
| Promedio diagonal | | 43 μm | 15.5 μm |
| Dureza (HV) | | 300.8 | 192.9 |
| Promedio (HV) | | 227.5 | |

Nota. Datos aportados por el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC.

Figura 17

Grafica de valores de dureza (HV) vs carga (grf) para el doble recubrimiento (dureza compuesta).



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 como se describió en el estudio de Meza, Devia & Vélez, 2006.

Tabla 12

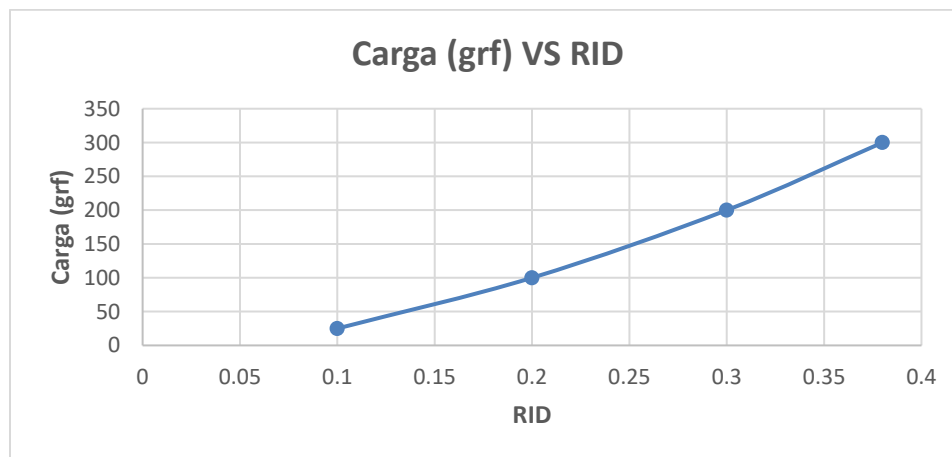
Valores de profundidad promedio, profundidad relativa (RID) y dureza (HV) promedios para el sistema sustrato doble recubrimiento.

| 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 |

Nota. Para más comprensión de los datos véase la Figura 21.

Figura 18

Grafica de valores de Carga (grf) vs RID para el sistema sustrato doble recubrimiento.



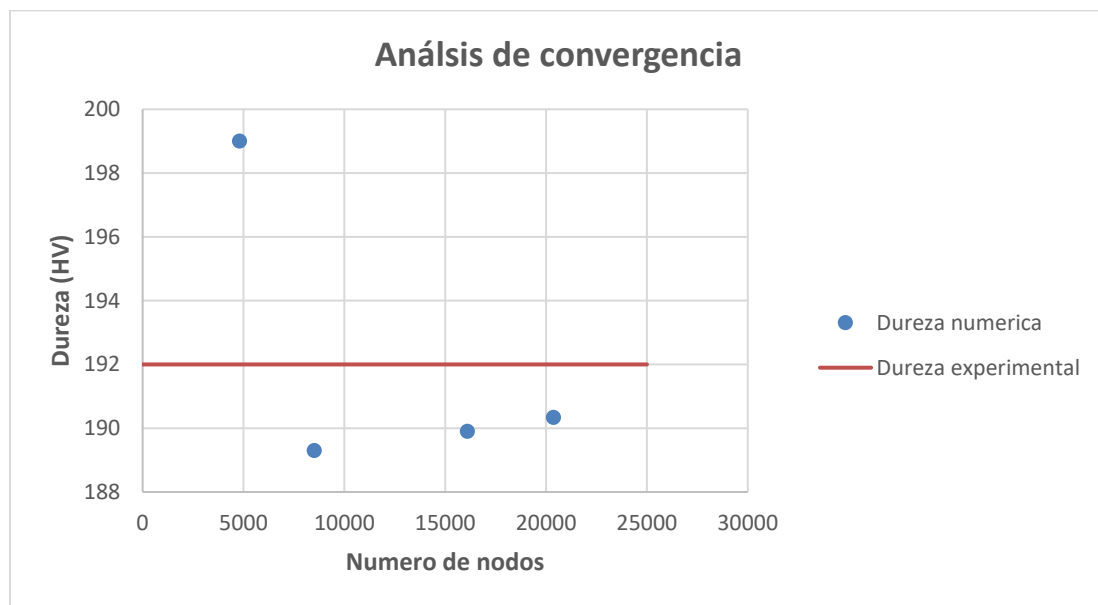
5.2. Cálculo de dureza aplicando el método de elementos finitos

5.2.1. 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.

Figura 19

Grafica de análisis de convergencia.



Nota. Para el análisis solo se prescindió de los valores de dureza para una carga de 100 grf.

Por lo tanto, la gráfica de la Figura 19 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.

5.2.2. Cálculo de dureza del sustrato AISI 1045 aplicando el método de elementos finitos.

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

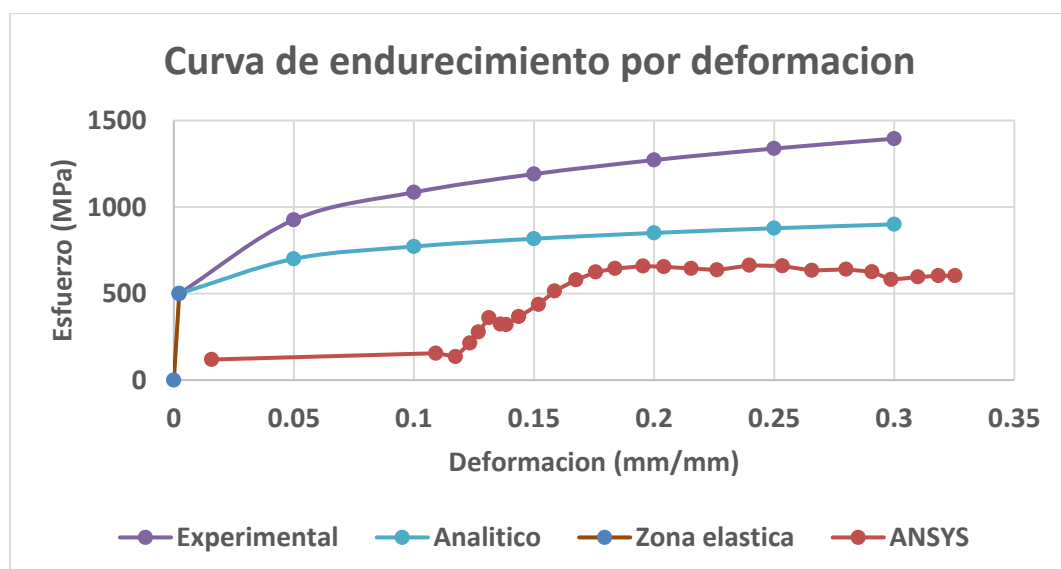
Datos comparativos de la dureza y diagonal de la huella en la simulación numérica y experimental para el acero AISI 1045.

| Carga (grf) | Valores numéricos | | Valores experimentales | | Error % |
|----------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|------------|
| | Diagonal (μm) | Dureza (HV) | Diagonal (μm) | Dureza (HV) | |
| 25 | 15.73 | 187.374 | 16.39 | 172.5 | 8.62 |
| 100 | 31.21 | 190.337 | 30.53 | 198.9 | 4.30 |
| 200 | 42.6 | 204.342 | 41.67 | 213.6 | 4.33 |
| 300 | 49.53 | 226.779 | 49.98 | 222.7 | 1.83 |

Las implicaciones de la formulación de Tabor para la mecánica del contacto en este punto de la prueba son absolutamente necesarias para la construcción y análisis de la curva de endurecimiento por deformación. Se utilizó la ecuación constitutiva de Hollomon, la cual es ampliamente usada en el análisis, simulación y procesos de diseño de conformado de metales a temperatura ambiente con tasas de deformación relativamente bajas (Gronostajski, 2000). El resultado obtenido para el método experimental es expresado por la ecuación $y = 1836.8x^{0.2286}$, y el de la simulación es representado por $y = 1064.9x^{0.1398}$, como se puede observar, ambas ecuaciones muestran una diferencia apreciable tan solo debidas a una diferencia de menos de un 9% de error relativo. También se puede visualizar un fragmento de la curva de esfuerzos y deformación creada en base al criterio de falla del esfuerzo principal máximo, construida por el método de elementos finitos (MEF) en rojo, en donde se detalla como esta converge hacia su homóloga creada a partir de los resultados de huella en la simulación.

Figura 20

Grafica comparativa de las curvas de endurecimiento por deformación basado en resultados experimentales y la simulación computacional.



Nota. Los datos de las curvas de endurecimiento por deformación experimental y analítico fueron hallados ambos utilizando el método de Tabor. Los datos de Ansys fueron obtenidos de directamente desde el programa.

Este tipo de pruebas se encuentran sometidas a mucha incertidumbre, ya que, la divergencia entre las curvas observadas se debió a un porcentaje de error relativo no mayor al 8.62% en la dureza del sustrato.

La Tabla 14 muestra los valores de cada incremento de la carga durante la indentación, obteniendo los valores representativos con los que se desarrolló la curva de Tabor.

Tabla 14

Dureza Vickers determinada de acuerdo con la aplicación de la carga por el método de elementos finitos.

| P (N) | D (mm) | Área (mm^2) | σ (MPa) | ϵ (mm/mm) | Dureza (HV) |
|--------------|---------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 0.245 | 0.013864 | 0.00021 | 417.157 | 0.00102 | 187.374 |
| 0.98 | 0.027515 | 0.00082 | 423.866 | 0.00203 | 190.337 |
| 1.96 | 0.037555 | 0.00154 | 455.017 | 0.00277 | 204.342 |
| 2.94 | 0.043656 | 0.00208 | 504.895 | 0.00322 | 226.779 |

5.2.3. Cálculo de dureza compuesta para el primer recubrimiento aplicando el método de elementos finitos.

Para comenzar a trabajar con el análisis y los resultados de la simulación computacional primero se debió hallar la relación existente entre la huella dejada por el indentador en un sistema donde existe influencia de materiales estratificados, por tal motivo se realizó la simulación de los

materiales estratificados uno a uno. Obteniéndose así un comportamiento más detallado de los esfuerzos y deformaciones existentes en la prueba.

Tabla 15

Tabla comparativa de la dureza y diagonal de la huella, numérica y experimental para el recubrimiento Ni – P con tratamiento térmico sobre sustrato.

| Carga (grf) | Valores numéricos | | Valores experimentales | | Error % |
|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|------------|
| | Diagonal (μm) | Dureza (HV) | Diagonal (μm) | Dureza (HV) | |
| 25 | 9.58 | 505.2 | 9 | 572.3 | 11.7 |
| 100 | 19.67 | 479.4 | 20.14 | 457.2 | 4.8 |
| 200 | 31.39 | 376.5 | 30.13 | 408.6 | 7.8 |
| 300 | 41.51 | 322.9 | 38.13 | 382.6 | 15.6 |

Una vez hallados los resultados y hechas las comparaciones, se pudo describir el comportamiento de la dureza usando el método de Lesage – Pertuz. Se realizaron las comparaciones en base a los datos experimentales y simulados de las pruebas. En la Tabla 16 se muestran los valores obtenidos por la simulación computacional.

Tabla 16

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

| $\ln(d)$ (μm) | $\ln(P)$ (N) | f | H_f (HV) | RID |
|-------------------------------|-----------------|--------|---------------|----------|
| 2.2596 | -1.4065 | 2.6344 | 505.2 | 0.034298 |
| 2.9791 | -0.0202 | 1.7278 | 479.4 | 0.07042 |
| 3.4464 | 0.6729 | 1.3137 | 348.17 | 0.112382 |
| 3.7259 | 1.0784 | 1.1152 | 313.426 | 0.148614 |

Se observa que los dos primeros datos de dureza en la Tabla 17 corresponden a los mismos tabulados anteriormente en la dureza del compuesto, esto se debe que para estas dos cargas de indentación (25 y 100 grf) no se obtuvo un valor real de la cuadrática del método, lo que quiere decir que estas dos huellas dejadas por el indentador no contienen la influencia de la dureza de materiales estratificados.

Tabla 17

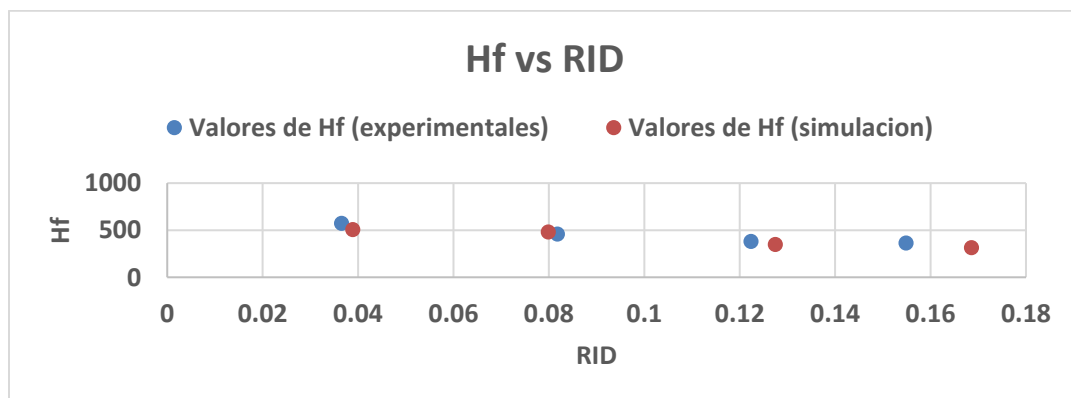
Dureza comparativa del recubrimiento en el análisis experimental y simulación computacional.

| Dureza del recubrimiento | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Carga (grf) | Dureza experimental (HV) | Dureza numérica (HV) | Error % |
| 25 | 572.3 | 505.2 | 11.72 |
| 100 | 457.2 | 479.4 | 4.85 |
| 200 | 379.405 | 348.17 | 8.23 |
| 300 | 362.14 | 313.426 | 13.45 |

Con los datos obtenidos se construyó la gráfica comparativa para representar el comportamiento de la dureza del recubrimiento, en base a los resultados experimentales y computacionales, contra la profundidad relativa de indentación (RID). Los resultados del análisis son apreciables en la Figura 21.

Figura 21

Dureza del recubrimiento (H_f) vs RID.



5.2.4. Cálculo de dureza compuesta para el sistema sustrato – doble recubrimiento aplicando el método de elementos finitos.

Por último, se realizó el mismo proceso que para la primera capa con tratamiento térmico, pero esta vez se usó el sistema sustrato – multicapa. Al igual que en el proceso anterior, se hizo la comparación de la dureza del compuesto en la simulación computacional respecto a los valores dados por la ecuación de los ensayos experimentales, los resultados de las pruebas se pueden visualizar en la Tabla 18.

Tabla 18

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

| Carga (grf) | Valores numéricos | | Valores experimentales | | Error % |
|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|------------|
| | Diagonal (μm) | Dureza (HV) | Diagonal (μm) | Dureza (HV) | |
| 25 | 14.66 | 216 | 13.44 | 256.73 | 15.9 |
| 100 | 27.68 | 242.1 | 27.36 | 247.64 | 2.2 |
| 200 | 38.9 | 245.1 | 39.05 | 243.22 | 3.9 |
| 300 | 47 | 252 | 48.08 | 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 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.

Tabla 19

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 | H_f (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 |

La Tabla 20 revela los resultados obtenidos de dureza del recubrimiento superior de Ni – P. Al igual que los resultados del procedimiento anterior, se obtuvo que la dureza del recubrimiento para las dos primeras cargas (25 y 100 grf), es la misma que la dureza del compuesto, ya que los resultados demuestran soluciones reales inexistentes para el método de Lesage – Pertuz para las huellas dejadas por estas dos cargas.

Tabla 20

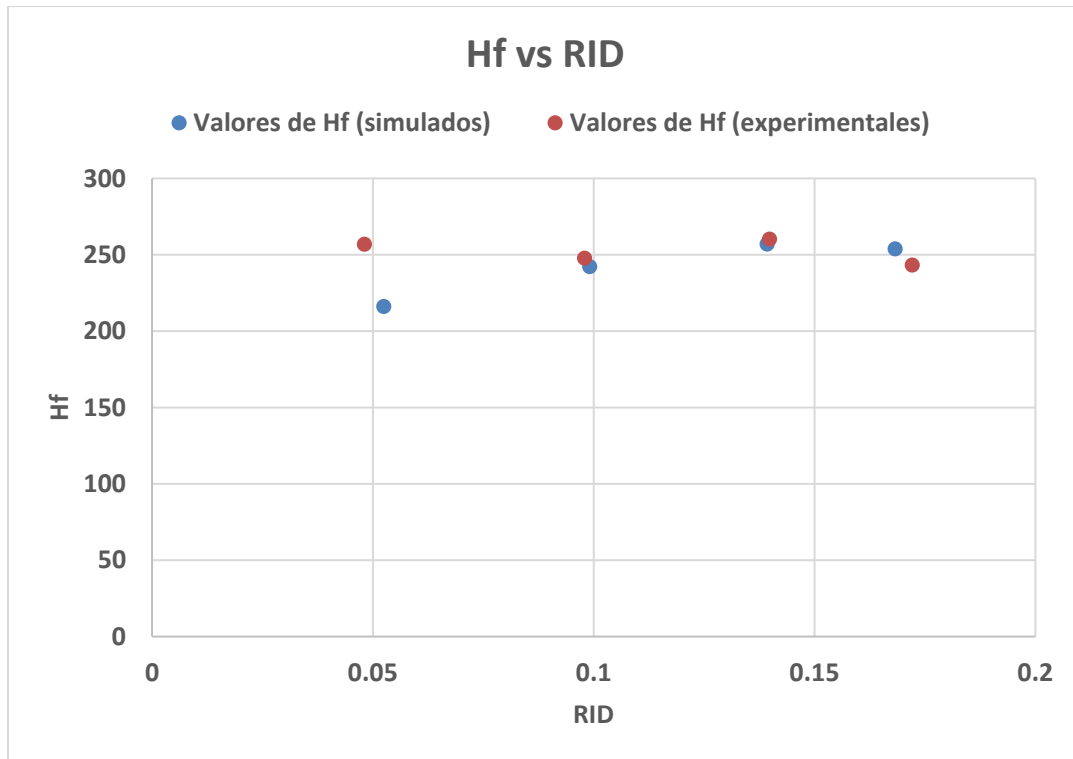
Dureza comparativa del recubrimiento en el análisis experimental y la simulación computacional.

| Dureza del recubrimiento | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Carga (grf) | Dureza experimental (HV) | Dureza numérica (HV) | Error % |
| 25 | 256.73 | 226 | 15.86 |
| 100 | 247.64 | 242.1 | 2.24 |
| 200 | 260.09 | 256.92 | 1.22 |
| 300 | 243.098 | 253.77 | 4.39 |

Una vez hallados los datos, se procedió a realizar la tabulación de estos y después se hizo la grafica comparativa en base a los resultados de la simulación y el experimento. Se construyó la gráfica de la Figura 22 y se compararon los valores de la dureza del recubrimiento contra la profundidad relativa de indentación – RID.

Figura 22

Dureza del recubrimiento (H_f) vs RID.



5.3. Análisis de los campos de esfuerzo y deformación

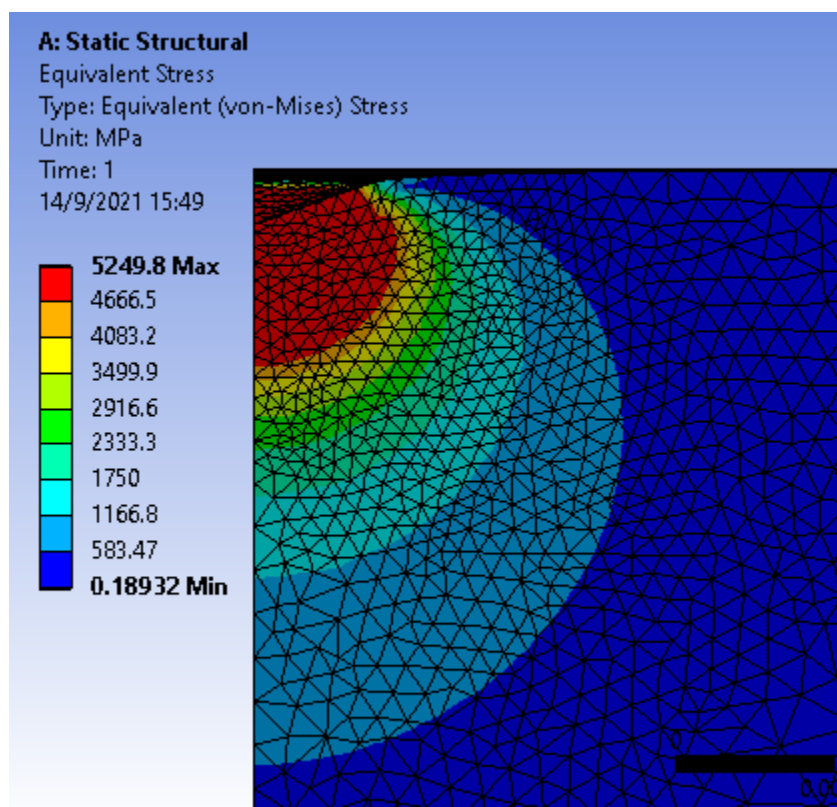
El software ANSYS cuenta con distintas teorías de falla para el análisis de los campos de esfuerzos, esto se debe a la naturaleza de sus resultados los cuales llevan a variados análisis para las mismas condiciones, es por ello que se utilizó la teoría de esfuerzo equivalente de Von Mises, debido a la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

5.3.1. Análisis de esfuerzo

5.3.1.1 Campo de tensiones para carga de 25 grf. 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 para el ensayo de indentación con una carga de 25 grf puede observar en la Figura 23.

Figura 23

Análisis de esfuerzos para una carga de indentación de 25 grf.



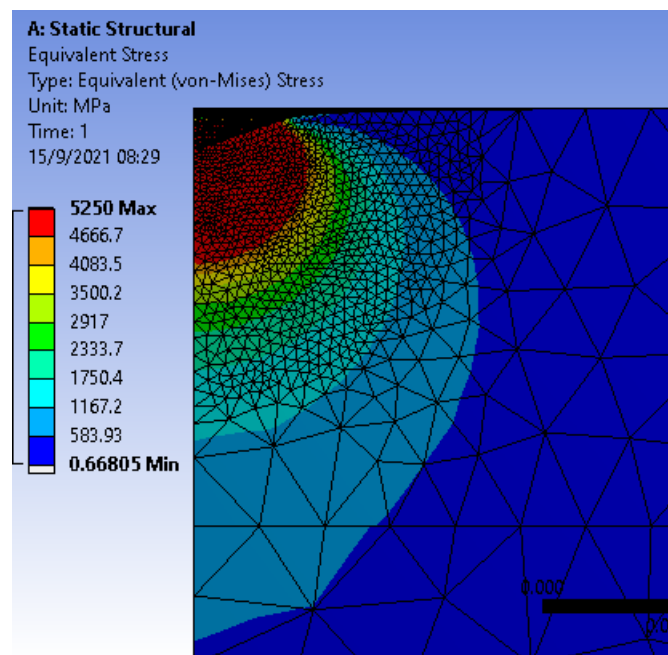
Nota. Esfuerzo equivalente

El rango de colores representa un grado mayor o menor de los valores de esfuerzo en el modelo, en donde se distinguen los valores máximos en rojo y mínimos en azul.

5.3.1.2 Campo de tensiones para carga de 100 grf. A continuación, se analizan los esfuerzos equivalentes de Von – Mises, los cuales no reflejan un cambio aparentemente notable ni abrupto en los campos de tensión presentados en la Figura 24. Además de esto, se observaron los campos de esfuerzo que se transfirieron al material estratificado. Esta carga representa el umbral entre la aportación y no aportación de esfuerzos por parte del material, ya que la profundidad de la huella alcanza una profundidad mayor al 10% del espesor del recubrimiento a partir de cargas mayores a los 100 grf.

Figura 24

Análisis de esfuerzos para una carga de indentación de 100 grf.

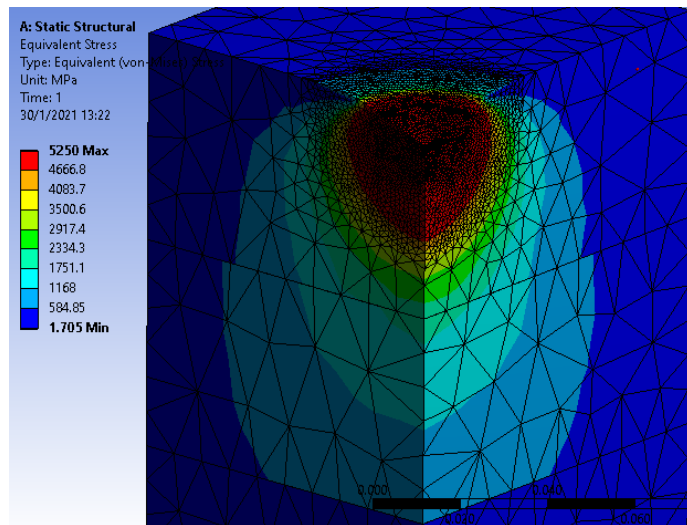


Nota. Esfuerzo equivalente.

5.3.1.3 Campo de tensiones para carga de 300 grf. Se resalta en la Figura 25 la existencia e influencia de esfuerzos presentes en la primera y segunda capa del recubrimiento. En la imagen también se observa dos campos de valores de tensión distintos en la segunda capa, de los cuales el mayor de ellos corresponde a los esfuerzos creados por una deformación plástica y el menor por una deformación elástica.

Figura 25

Análisis de esfuerzos para una carga de indentación de 300 grf.



Nota. Esfuerzo equivalente.

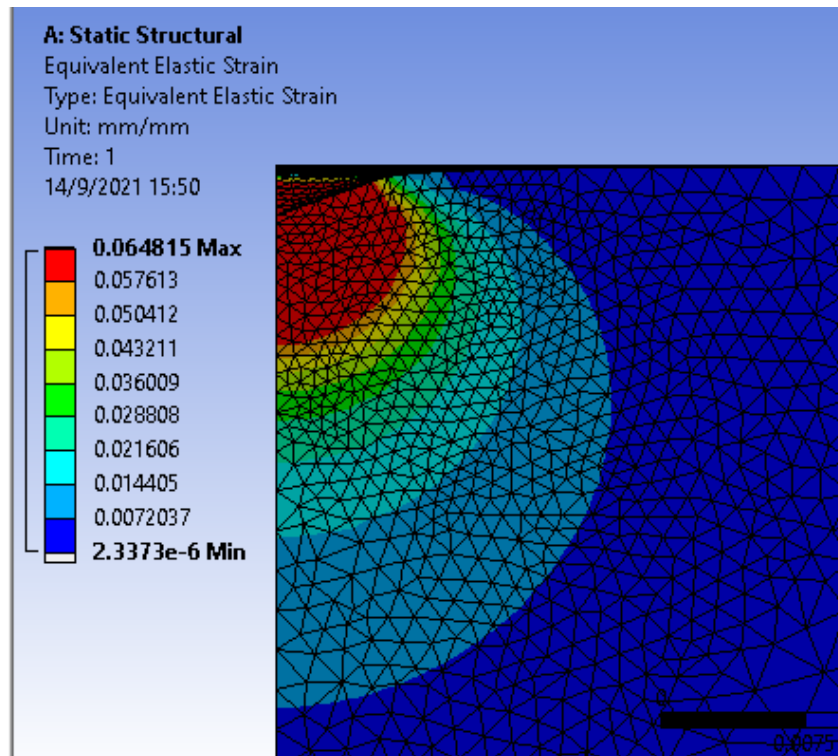
5.3.2. Análisis de deformación

5.3.2.1 Campos de deformación para carga de 25 grf. Los resultados obtenidos por la deformación equivalente para la carga de 25 grf son apreciables en la Figura 26. 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 26

Análisis de deformaciones para una carga de indentación de 25 grf.

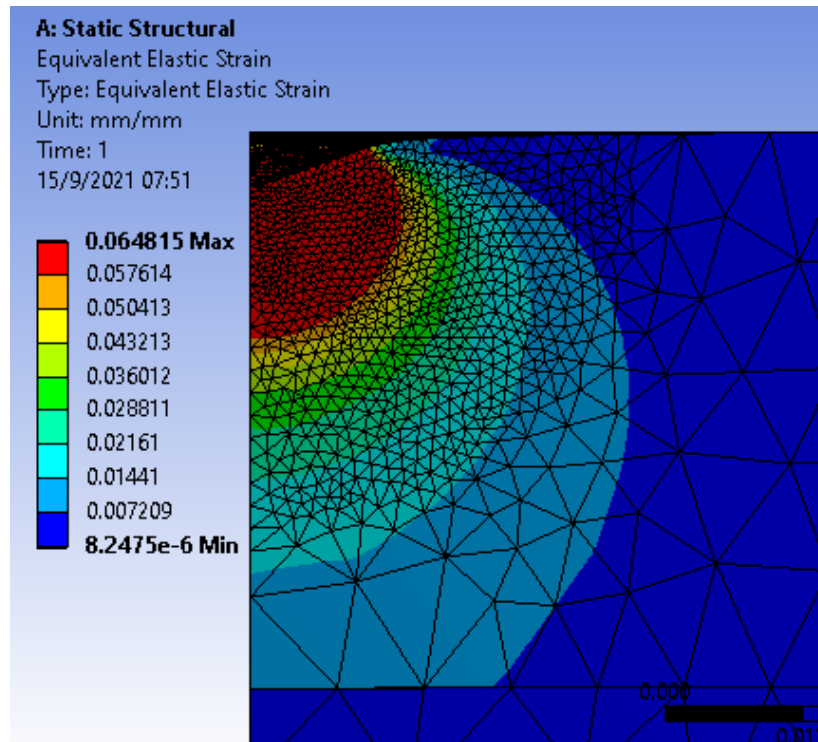


Nota. Deformación elástica equivalente.

5.3.2.2 Campos de deformación para carga de 100 grf. Las deformaciones en la Figura 27, muestran la evolución de la concentración de esfuerzos y el aumento en el tamaño de los campos de acción a medida que aumenta la profundidad de la huella.

Figura 27

Análisis de deformaciones para una carga de indentación de 100 grf.

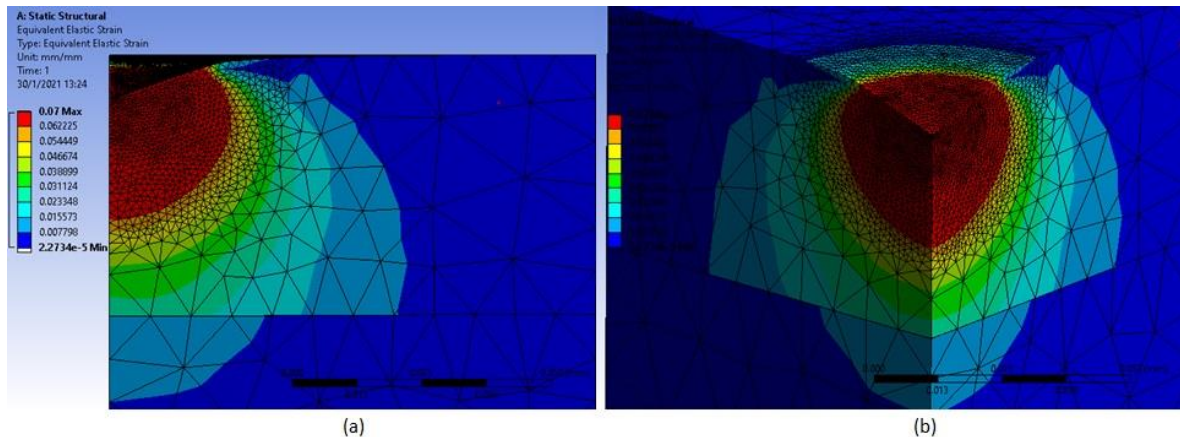


Nota. Deformación elástica principal máxima

5.3.2.3 Campos de deformación para carga de 300 grf. Las deformaciones resultado de la indentación con una carga de 300 grf que se presentan en la Figura 28 mostró una mayor concentración de deformaciones plásticas en torno a la huella. En la imagen se además se observó la existencia de campos de acción entre la capa de un material y el otro, este efecto corresponde a una deformación elástico-plásticas en el material de la capa intermedia consecuencia de a mayor profundidad de huella de indentación.

Figura 28

Análisis de deformaciones para una carga de indentación de 300 grf.



Nota. Deformación elástica equivalente, (a) Vista de perfil, (b) Vista isométrica.

6. Conclusiones

En las simulaciones computacionales el tamaño de los elementos de malla y el orden de los elementos tiene una gran influencia sobre los resultados obtenidos de dureza. Un mayor tamaño involucra un número menor de nodos sobre el mallado, y una dispersión mayor en los datos. Por lo tanto, se utilizó una malla óptima, de modo que no se sacrificó una enorme cantidad de tiempo de cálculo en la obtención de los resultados.

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.

Para las propiedades mecánicas de tracción por indentación, se puede emplear el enfoque de Hollomon, sin embargo, es muy difícil de garantizar el verdadero conocimiento del comportamiento mecánico del material, ya que las pruebas de indentación no conducen a una predicción exacta de estas.

El análisis y mapas de distribución de teorías de falla del sistema sustrato – multicapa nos brindan información sobre el papel de las propiedades de todos los materiales. Estos mapas son útiles para otras combinaciones de materiales y geometrías mediante la extrapolación de los resultados de unos pocos sistemas de análisis. Los mapas de falla también son de utilidad en la selección del material y espesor del recubrimiento, además de predecir las cargas permisibles de una geometría conocida. También son de gran ayuda en el diseño y desarrollo de sistemas, y permiten la selección racional del material del recubrimiento y el espesor de la capa, para una aplicación particular.

Se cumplió de esta manera el objetivo general del libro, el cual consistió en evaluar la capacidad que tiene una simulación computacional para realizar un ensayo de indentación Vickers sobre un sistema de recubrimientos multicapa, con el fin de un posterior análisis de resultados para la obtención de la dureza individual de las capas del recubrimiento, y los campos de esfuerzos y deformaciones presentes en la zona de contacto.

Se cumplieron los tres objetivos específicos propuestos, se elaboraron correctamente los tres modelos geométricos de indentación estática por medio del módulo Geometry del programa, después se realizaron las configuraciones de análisis necesarias en ANSYS para el desarrollo de las simulaciones computacionales, y finalmente se obtuvieron los mapas de esfuerzo y

deformación presentes en los sistemas de materiales bicapa de ensayo de indentación para su posterior análisis

Bibliografía

- Advance Plating Technologies. (2019). Electroless nickel plating process vs electrolytic nickel plating process. Advance Plating Technologies. <https://advancedplatingtech.com/>
- 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). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012004>
- ASTM International. (2015). ASTM B733-15: Standard Specification for Autocatalytic (Electroless) Nickel-Phosphorus Coatings on Metal. In *Annual book of ASTM standards 2015* (pp.1-40). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- 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.
- Buchtík, M., Krystýnová, M., Másilko, J., y Wasserbauer, J. (2019). The effect of heat treatment on properties of Ni-P coatings deposited on a AZ91 magnesium alloy. *Coatings*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/coatings9070461>
- 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.
- Clough, R. W. (1974). Areas of application of the finite element method. *Computers and Structures*, 4(1), 17–40. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(74\)90075-3](https://doi.org/10.1016/0045-7949(74)90075-3)
- Clough, R. W. (1990). Original formulation of the finite element method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 7(2), 89–101. [https://doi.org/10.1016/0168-874X\(90\)90001-U](https://doi.org/10.1016/0168-874X(90)90001-U)

- 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. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Gomes, N., González-Estrada, O. A., y Pertuz, A. (2019). Electroless Nickel Phosphorous: una visión global. *Revista UIS Ingenierías*, 18(4), 173–192. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n4-2019016>
- Gronostajski, Z. (2000). Constitutive equations for FEM analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1–3), 40–44. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00635-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00635-X)
- Gupta, K. K., y Meek, J. L. (1996). A brief history of the beginning of the finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39(22), 3761–3774. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19961130\)39:22<3761::AID-NME22>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19961130)39:22<3761::AID-NME22>3.0.CO;2-5)
- He, J. L., y Veprek, S. (2003). Finite element modeling of indentation into superhard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 163–164, 374–379. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00628-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00628-X)
- 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.
- Kang, B. S. J., Yao, Z., y Barbero, E. J. (2006). Post-yielding stress-strain determination using spherical indentation. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 13(2), 129–138. <https://doi.org/10.1080/15376490500448607>
- Kern, R. F., y Suess, M. E., (1979), *Steel selection: "A guide for improving performance and profits"*, Michigan, EU, Wiley.

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.040>
- 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.827.209>
- 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. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.09.194>
- 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. <https://doi.org/10.1177/1687814019862919>
- 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. <https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0144>
- Martínez, H., & Richard, A. (2009). Determinación de propiedades estáticas de recubrimientos depositados por proyección térmica utilizando indentación normal (tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- 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.

NACE Publication 6A287, “Electroless Nickel Coatings” (Houston, TX: NACE International, 1997).

Properties of electroless Nickel. (Septiembre de 2005). Langenfeld, Alemania.: MacDermid Enthone. <https://industrial.macdermidenthone.com/products-and-applications/electroless-nickel/properties>

SAE 1020 Y SAE 1045. (Marzo de 2007). Bogota, Colombia.: Cía. General de Aceros. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf?sequence=2>

Taylor, R.L; Zienkiewicz, O. C., & J.Z, Z. (2005). Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics (Sixth, Issue 1). Butterworth-Heinemann 2000.

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. <https://doi.org/10.1007/s40799-018-0236-3>

APENDICES**Apendice A. Metodología experimental****Apendice B. Material base****Tabla 21***Composición química del Acero 1045.*

| Composición química | C | Si | Mn | Cr | Ni | P | S |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Elemento en peso (%) | 0.47 | 0.29 | 0.71 | 0.18 | 0.03 | 0.02 | 0.04 |

Nota. Adaptado de Acta Physica Polonica A. Vol 115(2009) No. 3

El sustrato usado en la investigación fue un acero AISI 1045, el cual es un acero de aplicación universal el cual posee un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con respecto a los aceros de baja aleación. Este acero puede ser usado en condiciones de suministro: laminado en caliente o con tratamiento térmico (templado en aceite y revenido). La composición química en porcentaje (%) en peso se puede apreciar en la Tabla 21.

Apendice C. Selección y preparación de probetas

Tabla 22

Dimensiones de probetas usadas en pruebas experimentales.

| Medidas | Primera muestra | Tercera muestra | Cuarta muestra |
|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Promedio ancho (mm) | 18.9 | 10.7 | 8.9 |
| Promedio largo (mm) | 24.3 | 24 | 23.3 |
| Promedio espesor (mm) | 4.9 | 5.5 | 5.2 |

Nota. Aporte del instituto venezolano de investigaciones científicas.

Las probetas a utilizar fueron cortadas y mecanizadas en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC, se usaron 5 tipos de muestras para el desarrollo de la parte experimental, la **primera muestra** consta únicamente del sustrato base sin ningún tipo de recubrimiento, una **segunda muestra** con un recubrimiento ENP con un espesor de 50 micras, una **tercera muestra** con un recubrimiento de ENP sometida a un tratamiento térmico de 400°C por una hora, una **cuarta muestra** con doble recubrimiento el cual consiste en agregarle una capa a una muestra idéntica a la tercera y la **quinta muestra** con un doble recubrimiento de ENP con un tratamiento térmico en la segunda capa el cual consistió en llevarla a un medio a 250 °C por 5 horas y luego a 400 °C por una hora. Las dimensiones de las muestras que la presente simulación tendrá en cuenta se pueden visualizar en la Tabla 22.

Apendice D. Recubrimiento de probetas

Para llevar a cabo el recubrimiento se debe preparar previamente cada una de las probetas que se recubrirá, el procedimiento consiste en un desengrase y un decapado ácido, con el fin de eliminar cualquier impureza u óxido de la superficie. Adicionalmente, se debe llevar a cabo una

activación acida para preparar la superficie del metal para la deposición química. A continuación, se describen los pasos a seguir para cumplir con los requerimientos necesarios para lograr un buen recubrimiento.

- **Desengrase N° 1.** Se sumergió el monolito durante 24 horas en acetona. Luego se retiró y se dejó secar al aire por cinco minutos.
- **Desengrase N° 2.** Se sumergió el monolito en una solución desengrasante que constó de 10 galones por 1 galón de carbonato de sodio y 5 galones por 1 galón de fosfato trisódico, a una temperatura de 85 °C por 5 minutos. Luego se retiró del baño de desengrase y se enjuagó con agua destilada.
- **Decapado.** Se sumergió el monolito en una solución de ácido nítrico al 15%p/p por 15 minutos para los monolitos de aluminio y 2 minutos para los monolitos de cobre. Luego se retiró del baño y se enjuagó con agua destilada.
- **Activación superficial.** Se sumergió el monolito en una solución de ácido sulfúrico al 15 %p/p, a una temperatura de 60 °C por 40 segundos. Luego se retiró del baño de activación y se enjuagó con agua destilada. Una vez desengrasada y activada la superficie, se procedió a sumergir las piezas.

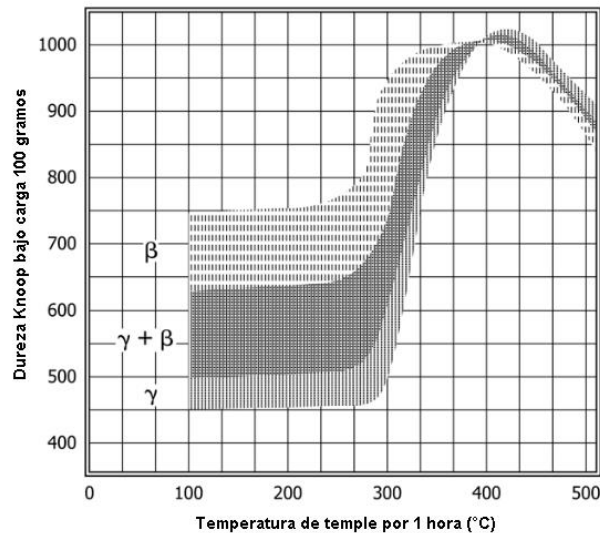
Se procede a sumergir en el baño de deposición química las muestras, inmediatamente después de pasar por la activación superficial. Cabe mencionar la importancia de la relación de níquel y fosforo que se desea obtener (14%), para lograrlo se parte de la relación de sulfato de níquel e hipofosfito de sodio. La composición base fue optimizada empleando buffers específicos para mantener un pH estable durante el desarrollo de la deposición. El proceso es prácticamente de naturaleza autocatalítica ya que el sustrato se usa como catalizador para la reacción de reducción química.

Apendice E. Tratamiento térmico aplicado al recubrimiento

Al aplicar un tratamiento térmico (temple) a un recubrimiento los valores de dureza aumentan significativamente, según el contenido de fósforo que esté presente, los depósitos bajos en fósforo (β) son más duros como recubrimientos y cambiarán entre 200 °C y 400 °C, produciendo una estructura cúbica centrada en las caras (FCC) de una mezcla entre Ni y Ni_3P . Los recubrimientos con alto contenido de fósforo (γ) siendo el caso de interés, son más blandos que los de bajo contenido de fósforo sin el tratamiento térmico, cuando este se aplica entre 275 °C y 350 °C produce una estructura cúbica centrada en las caras (FCC) de una mezcla entre Ni y Ni_3P . Finalmente, los recubrimientos que están en el rango de 4 a 8% son una mezcla de los anteriormente mencionado, además su comportamiento es menos predecible después del tratamiento térmico. Esto se puede apreciar en la Figura 29. Es el principal objetivo del tratamiento térmico, pero sumado a esto se mejora la uniformidad estructural y crea una protección contra la corrosión y resistencia al desgaste, siendo estas las características óptimas para un buen sustituto del cromo duro por ENP. Es importante recalcar que la muestra se enfría conforme el horno donde se depositó disminuye su temperatura.

Figura 29

Dureza de los recubrimientos de níquel no electrolítico vs tratamiento térmico de 1 hora, según el porcentaje de fósforo presente en la muestra.



Nota. Adaptado de la norma ASME B733-15.

Apéndice F. Determinación del espesor del recubrimiento

En base de la norma ASTM B733-15 en el apartado 9.3.5 se indica la manera como se debe determinar el espesor del recubrimiento de ENP. Inicialmente se debe pesar la muestra antes de sumergirla en la solución que le adherirá el recubrimiento, también se pesará después de haber pasado por el recubrimiento asegurándose que la muestra este totalmente seca y a temperatura ambiente. La fórmula se usa para calcular el espesor a partir del aumento de peso de la pieza su densidad y área de la superficie recubierta.

$$\text{Espesor del recubrimiento, } \mu\text{m} = 10 * \frac{W}{A * D} \quad \text{Ecuacion (26)}$$

Donde:

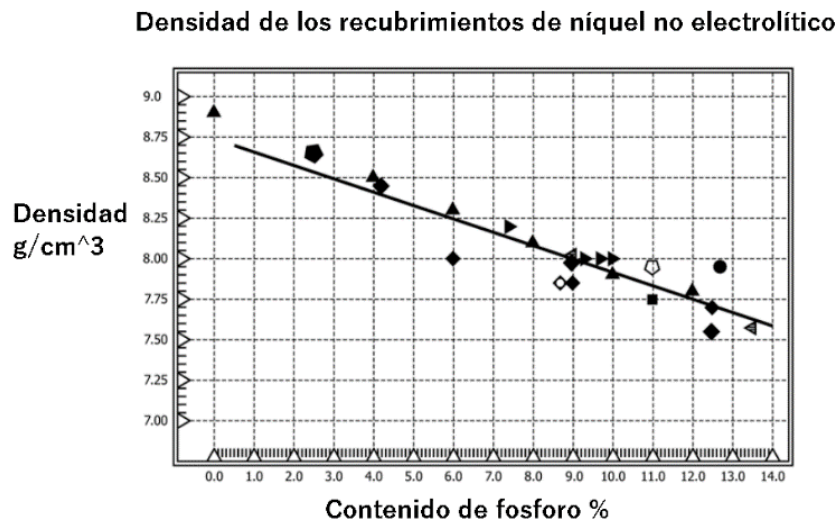
W = aumento de peso en miligramos [mg]

A = Área de superficie total en centímetros cuadrados [cm^2]

D = Densidad del recubrimiento según su contenido de fósforo, ver Figura 30.

Figura 30

Densidad de los recubrimientos de níquel no electrolítico según su porcentaje de fósforo.



Nota. Adaptado norma ASME B733-15.

Apendice G. Ensayo de Dureza

Figura 31

Microdurometro de marca LEITZ WETZLAR. Tipo: 060-356.012, No: 881922.



Nota. Adaptado del informe experimental del ensayo de microindentación del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas – IVIC.

El ensayo de microindentación Vickers se llevó a cabo por medio de un microdurometro de marca **LEITZ WETZLAR**. Tipo: 060-356.012, No: 881922 la cual es una máquina computarizada con un indentador Vickers de forma piramidal con un ángulo entre caras de 136° (se puede visualizar en la Figura 31), las cargas sobre las probetas fueron de 25, 100, 200 y 300 **grf**.

La carga fue aplicada durante un tiempo de 15 segundos. Después de hecha la indentación se procedió a retirar el indentador y medir el tamaño de la diagonal de la huella, ya que se tomó el valor promedio de la vertical y la horizontal. Además, se realizaron dos repeticiones por cada carga aplicada. Se tuvo en consideración que la distancia entre el centro de dos indentaciones adyacentes

debía ser tres veces mayor a la diagonal del indentador. Con los valores obtenidos promedio de la diagonal de la huella se obtuvo la dureza Vickers (HV) mediante el uso de la Ecuación (2) la cual es obtenida de la norma ASME E384-17.