

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN
UN ALUMINIO 6063 RECUBIERTO, UTILIZANDO
SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL METODO DE
LOS ELEMENTOS FINITOS**

Presentado Ante La Ilustre
Universidad Central De Venezuela

Por los Bachilleres:

**Ayres E., Rodolfo J.
Quintero G., Helgar A.**

Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 RECUBIERTO, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Manuel Martínez.

Presentado Ante La Ilustre
Universidad Central De Venezuela

Por los Bachilleres:

**Ayres E., Rodolfo J.
Quintero G., Helgar A.**

Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



UNIVERSIDAD

Caracas, 16 de noviembre de 2.009

ACTA

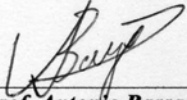
Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

RODOLFO AYRES y HELGAR QUINTERO

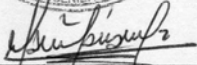
Titulado:

“DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 RECUBIERTO, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. Antonio Barragán
Jurado




Prof. Manuel Martínez
Tutor


Prof. Jorge Cruz
Jurado

DEDICATORIA

A Dios, por ser el guía en el camino de la vida.

*A mis Padres, por todo el apoyo
recibido a lo largo de esta etapa.*

*A mi Hermano por estar siempre
presente en cada momento.*

Rodolfo E. Ayres J.

DEDICATORIA

*A Dios, por iluminarme el camino.
A mis Padres, por los valores inculcados que
me han permitido ser quien soy ahora.
A todas aquellas personas especiales en
mi vida, que de una manera u otra
contribuyeron para culminar esta etapa de mi vida.*

Helgar A. Quintero G.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, por brindarnos la oportunidad de ser parte de ella, sintiéndonos orgullosos de ser ahora y siempre UCEVISTAS.

A nuestros padres por servirnos de guía en todo momento, aconsejándonos y orientándonos para evitar que eligiéramos un rumbo equivocado.

A nuestros hermanos que de una o u otra manera sin importar su edad nos han servido de guía y ejemplo para superar los obstáculos que se nos presentaron.

A nuestro tutor, Profesor Manuel Martínez, por su cordialidad y su gran vocación para ayudarnos en todo momento a la realización de este trabajo especial de grado.

Al profesor Ramón Sánchez por brindarnos siempre una mano amiga.

A Crisanto Villalobos nuestro profesor y amigo por su gran disposición para ayudarnos en momentos claves del desarrollo de esta investigación.

A todos nuestros compañeros y amigos que siempre estuvieron presentes apoyándonos y ayudándonos a lo largo de nuestra vida universitaria y que aun culminado este capítulo, lo seguirán haciendo.

Nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas que colaboraron con nosotros durante este proceso.

Ayres E., Rodolfo J. y Quintero G., Helgar A.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 RECUBIERTO, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

**Tutor Académico: Prof. Manuel Martínez. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009, n°pag.72**

Palabras Clave: Método de Elemento Finitos (MEF), Recubrimientos, Modelado de Dureza, Indentación Esférica.

Resumen: En este trabajo se determinan las propiedades mecánicas de un recubrimiento a través de un ensayo de indentación normal modelado mediante el uso de un software computacional basado en el método de los elementos finitos, de nombre comercial ABAQUSTM. El material a ensayar fue un aluminio 6063T6. Para ello se realizó el modelado de un ensayo de indentación esférico, en el cual las cargas de indentación y el radio de contacto proyectado son obtenidos de varios ajustes potenciales. Se aplicaron las relaciones empíricas de Tabor⁽⁶⁾ para determinar los valores esfuerzo-deformación y así construir la curva del aluminio. Se obtuvieron valores de dureza con un margen de error menor al 4 % en comparación directa con los datos experimentales suministrados. A través de un ensayo de indentación Brinell se determinaron las propiedades mecánicas del sistema sustrato y recubrimiento, cuyos datos fueron obtenidos de trabajos de investigación anteriores. Con el modelo Lesage-Pertuz⁽⁹⁾ se calcularon valores de dureza del recubrimiento, en función de la carga aplicada; pero esto sólo fue posible en el recubrimiento de 0,45mm de espesor, ya que este modelo es válido para recubrimientos delgados.

Ayres E., Rodolfo J. y Quintero G., Helgar A.

**DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES IN A
6063 ALUMINUM COATED, NUMERICAL SIMULATION
BY USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

**Tutor Acad.: Prof. Manuel Martínez. Caracas, U.C.V. Faculty of
Engineering, School of Mechanical Engineering. 2009, n°pag. 72**

Keywords: Finite Elements, Coated Systems, Hardness Modeling, Espherical Indentation.

Abstract: This present work has a main purpose, it is to determine the mechanical properties of a surface treatment through a modeling normal indentation essay, all this with the use of a software which is based on finite elements method, commercialy named “ABAQUSTM”. The material which was studied was an aluminium 6063T6. For this, a spherical indentation modeling essay was executed, in this essay the indentation charges and the projected radio contact are obtained from some potential adjustments. Tabor empirical relations were applied to determine the deformation-effort values to construct the aluminium curve. It was obtained hardness values with a margin of error of 4% in a direct comparison with supplied experimental data. Through a Brinell indentation essay, the mechanical properties of the surface treatments and substrate system were determined, this information were obtained from past researches. With Lesage-Pertuz model, it was calculated the hardness values of surface treatment, on the basis of the applied charge; but this was just posible in the surface treatment of thickness (0,45 mm), due to the fact that this model is valid for thin surface treatments.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	IX
INDICE DE TABLAS.....	XII
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	3
1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1.1. <i>Objetivo General</i>	3
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.1.3. <i>Alcances</i>	3
CAPITULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1. LA ALEACION DE ALUMINIO AA 6063	6
2.1.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN ALUMINIO AA 6063	6
2.1.3. <i>Propiedades Mecánicas de la Aleación de Aluminio AA 6063</i>	6
2.2. DEPÓSITOS AUTOCATALÍTICOS ELECTROLESS NI-P	7
2.2.1. <i>Principios Químicos</i>	7
2.2.2. <i>Agentes Reductores</i>	8
2.2.3. <i>Agentes Acomplejantes</i>	8
2.2.4. <i>Estabilizadores – Inhibidores</i>	9
2.2.5. <i>Dureza</i>	9
2.3. INDENTACIÓN.....	10
2.3.1. <i>Prueba de Indentación</i>	10
2.3.2. <i>Dureza</i>	11
2.3.3. <i>Ensayo Brinell (Indentador Esférico)</i>	12
2.3.4. <i>Ensayo Rockwell (Indentador Cónico)</i>	14
2.3.6. <i>Ensayo Knoop (Indentador Piramidal)</i>	16
2.3.7. <i>Ensayo Berkovitch (Indentador Piramidal)</i>	17
2.4. MECÁNICA DE CONTACTO	18
2.4.1. <i>Historia</i>	18

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

2.4.2. <i>El contacto Hertziano</i>	20
2.4.3. <i>Formulación</i>	20
2.5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	23
2.5.1. <i>Desarrollo Histórico</i>	24
2.5.1.1. Procedimiento para la Implementación del Método de Elementos Finitos (MEF).....	25
2.5.1.2. Funciones de Forma	26
2.5.1.2.1. Propiedades de las Funciones de Formas	27
2.5.1.3. Pasos a seguir en el cálculo por MEF. Funcionamiento de un programa de elementos finitos	27
2.5.2. <i>Matriz de Deformaciones</i>	29
2.5.3. <i>Matriz de Elasticidad</i>	29
2.5.4. MATRICES DE RIGIDEZ	30
2.5.5. <i>Elementos</i>	30
2.5.5.1. Elementos en una dimensión.....	31
2.5.5.2. Elementos en dos dimensiones.....	31
2.5.5.3. Elementos en tres dimensiones	31
2.5.5.4. Elementos axisimétricos.....	32
2.5.5.5. Elemento CAX4R	32
2.5.6. <i>Convergencia del Método</i>	33
CAPÍTULO III	35
METODOLOGÍA	36
3.1. METODOLOGÍA ABAQUS TM /CAE	36
3.1.1. <i>Crear las Partes</i>	37
3.1.2. <i>Mallado</i>	37
3.1.2.1. Importar la Malla.....	37
3.1.2.2. Generando la Malla	38
3.1.2.3. Generando el mallado (nodos)	39
3.1.2.4. Creando el OrphanMesh	40
3.1.3. <i>Crear las Propiedades Mecánicas</i>	40
3.1.4. <i>Asignar la Sección</i>	41
3.1.5. <i>Ensamblando las Partes</i>	41
3.1.6. <i>Configuración del análisis</i>	42
3.1.6.1. Crear los desplazamientos.....	43
3.1.6.2. Condiciones de Borde	44

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

3.1.7. *Interacción de las Superficies*.....45

3.1.8. *Extracción de los resultados*.....45

3.1.9. **Convergencia de la Malla**.....46

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE ESFUERZO CONTRA DEFORMACION A PARTIR DE LA INDENTACION.47

3.2.1. *Determinación del área de Contacto*.....47

3.2.2. *Determinación del esfuerzo y la deformación*.....48

3.3. CURVAS DEL SISTEMA SUSTRATO-RECUBRIMIENTO49

CAPÍTULO IV51

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS51

4.1. CONVERGENCIA DEL MALLADO51

4.2. INDENTACIÓN PLÁSTICA.....61

4.3. DUREZA DEL ALUMINIO 6063-T6 RECUBIERTO.....64

4.4. DUREZA DEL RECUBRIMIENTO NiP66

CONCLUSIONES.....68

RECOMENDACIONES.....69

BIBLIOGRAFIA.....70

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

INDICE DE TABLAS

Tabla II. 1: Intervalos de Composición Química de la Aleación de Aluminio AA 6063.....6

Tabla II. 2: Propiedades Mecánicas en función del tratamiento térmico para la Aleación de Aluminio AA 6063⁽⁶⁾7

Tabla IV. 3: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (3444 nodos).....58

Tabla IV. 4: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (7141 nodos).....59

Tabla IV. 5: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (13181 nodos).....59

Tabla IV. 6: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (17844 nodos).....60

Tabla IV. 7: Tabla de datos experimentales del Aluminio AA 6063 T661

Tabla IV. 8: Dureza Brinell determinada según la carga aplicada por MEF62

Tabla IV.9: Dureza del Aluminio 6063-T6 recubierto con NiP.....65

INDICE DE FIGURAS

Figura II. 1: Dureza Brinell.....12

Figura II. 2: Esquema de la indentación Rockwell C.....14

Figura II. 3: Esquema de la indentación Vickers.....15

Figura II.4: Esquema del indentador Knoop.....17

Figura II.5. Huellas piramidales Berkovitch con base triangular.....17

Figura II.6. Elemento en una dimensión.....31

Figura II.7. Elemento en dos dimensiones.....31

Figura II.8. Elemento en tres dimensiones.....32

Figura II.9: Elemento CAX4R con un punto de integración Gaussiana.....33

Figura III. 1. Malla hecha con AUTOCAD (17844 nodos).....39

Figura III. 2. Elemento trapezoidal utilizado en el área de transición.....39

Figura III. 3: Ensamble del Indentador y el Sustrato.....42

Figura III. 4. Condicionfies de borde del modelo.....44

Figura III. 5: Perfil de indentación del Aluminio 6063 T6.....48

Figura IV. 1: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (877 nodos).....53

Figura IV. 2: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (1465 nodos).....54

Figura IV. 3: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (3444 nodos).....54

Figura IV. 4: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (7141 nodos).....55

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Figura IV. 5: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (13181 nodos).	55
Figura IV. 6: Tabla Comparativa de la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación.....	56
Figura IV. 7: Ajuste de la convergencia de la Malla.....	57
Figura IV. 8: Comparación de la zona plástica por el método analítico y MEF63	
Figura IV. 9: Gráfica de la dureza AA 6063-T6 vs. el inverso del diámetro de la huella.	64
Figura IV. 10: Gráfica de la dureza compuesta vs. la profundidad relativa de indentación.	65
Figura IV. 11: Gráfica de la dureza del recubrimiento vs. RID.....	67

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, debido a las exigencias del mercado, las industrias han puesto su particular atención en la durabilidad de piezas y sistemas mecánicos. Esto se debe a que hoy en día existe una tendencia a optimizar los criterios de resistencia al desgaste, a la fricción y/o a la corrosión. En el campo de la ingeniería es particularmente notable esta tendencia, ya que se necesita saber el comportamiento de los materiales sólidos a fuerzas externas como la tensión, la compresión, la torsión, la flexión o la cizalladura. Los elementos de máquinas responden a dichas fuerzas con una deformación elástica (en la que el material vuelve a su tamaño y forma originales cuando se elimina la fuerza externa). En muchos materiales, entre ellos los metales y los minerales la deformación es directamente proporcional al esfuerzo, esta relación se conoce como Ley de Hooke. No obstante, si la fuerza externa supera un determinado valor (fluencia), el material puede quedar deformado permanentemente, y la Ley de Hooke ya no es válida.

La necesidad de mejorar las propiedades de la superficie de los materiales, ha conducido al desarrollo de piezas revestidas con materiales duros depositados sobre substratos de propiedades mecánicas menores que dichos recubrimientos. Los avances en recubrimientos, la tendencia a estudiar materiales mono o multicapa y el avance en la utilización de estas técnicas en campos tan dispares como la microelectrónica o el envasado, requieren de la necesidad de utilizar otro ensayo, que no sea el de tracción, para poder caracterizar las propiedades mecánicas de dichos recubrimientos y del propio componente. Es por ello que se han buscado métodos alternativos para la obtención de la dureza de un material, como por ejemplo el ensayo de

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

indentación, el cual, consiste en presionar un indenter sobre la superficie dejando una impresión sobre el material, y con el valor del área impresa y de la carga aplicada, se pueden obtener algunas propiedades mecánicas. Es importante destacar la importancia de esta nueva forma de determinar propiedades mecánicas, por su sencillez, versatilidad y economía.

El método de los elementos finitos ha adquirido un gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco eran imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando modelos de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo.

Este método permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número.

La implementación de este método en el modelado del ensayo de indentación se está afianzando entre los métodos de análisis, por los buenos resultados obtenidos, con errores bajos comparados con los experimentales. Definiendo así una nueva metodología para la determinación de propiedades mecánicas en los materiales, sin necesidad de realizar ensayos experimentales.

CAPITULO I

1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1. Objetivo General

Determinar las propiedades mecánicas en un Aluminio 6063T6 con recubrimiento superaleación base Níquel utilizando simulación numérica basada en el método de los elementos finitos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Análisis de esfuerzos en piezas en contacto mecánico, el modelado y mallado de sólidos en 2D y del análisis por elementos finitos.
- Desarrollar los modelos geométricos de indentación estática de los materiales a los cuales se desean obtener las propiedades mecánicas.
- Definir las condiciones de restricción y cargas correspondientes para los casos de estudio.
- Realizar el análisis de los campos de esfuerzo y determinar las propiedades mecánicas para los diferentes casos de estudio.
- Obtener valores representativos de los ensayos numéricos a realizar para su análisis y comparación con los métodos disponibles, tanto experimentales como analíticos.

1.1.3. Alcances

- Determinar las propiedades mecánicas del recubrimiento superaleación base Níquel.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

- Familiarizarse con el uso y manejo del programa comercial.
- Simulación numérica basada en el método de los elementos finitos con el uso de un programa comercial.
- Implementar los modelos geométricos a estudiar mediante mallas bidimensionales al programa de análisis.

1.1.4. Justificación de la Investigación

Con el fin de mejorar la resistencia de los daños a la superficie de los materiales por acciones mecánicas, diversas investigaciones se han llevado a cabo para aumentar la dureza de la zona superficial de piezas mecánicas. Esto se logra, por ejemplo, por medios físicos como deposición de vapor de películas delgadas en su superficie.

Lamentablemente el diseño de películas delgadas que posean óptimas propiedades mecánicas evita la determinación directa de la dureza del recubrimiento, ya que la influencia del sustrato, en el uso de ensayos de microdureza, comienza a hacerse evidente cuando las cargas superan una profundidad equivalente a un décimo del espesor de la película. Con el fin de determinar la verdadera dureza de la película, es necesario separar esta contribución.

En trabajos de investigación recientes (Barbero, Khonda Bharath), numerosos modelos, racionales y empíricos, fueron propuestos para tal fin sobre la base de diversas hipótesis. Sea cual sea la hipótesis tomada, todos los modelos disponibles en la literatura tienen en común la suposición de una ley aditiva lineal para la expresión de la dureza del compuesto (HC) en función de la dureza de la película (HF) y de la dureza del sustrato (HS).

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO
CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO
SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

A través del análisis computacional se puede determinar la dureza de estos materiales, con el propósito de evitar la realización de ensayos destructivos, logrando la reducción de tiempo experimental y de costos en la elaboración de probetas y de los correspondientes ensayos.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. LA ALEACION DE ALUMINIO AA 6063

En la serie de aleación de Aluminio 6xxx predomina la proporción de Magnesio y Silicio. El segundo dígito indica una modificación de la aleación, pero solo en el caso de que este número esté entre 1-9, si es cero (0) como en este caso indica que una aleación original. Los últimos dos dígitos no tienen especial significado, pero sirven para identificar las diferentes aleaciones de aluminio.

2.1.1. Composición química de la Aleación Aluminio AA 6063

Los principales elementos de esta aleación son el magnesio y el silicio. Según la Aluminium Association, los intervalos de composición química de la aleación de aluminio AA 6063 son los mostrados en la *Tabla II.1*.

Tabla II. 1: Intervalos de Composición Química de la Aleación de Aluminio AA 6063.

AA 6063	Si	Mg	Fe Max.	Cu Max.	Mn Max.	Cr Max.	Ti Max.	Zn Max.
	0,2-0,6	0,45-0,9	0,35	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

2.1.3. Propiedades Mecánicas de la Aleación de Aluminio AA 6063

En la *Tabla II.2* se resume el conjunto de propiedades promedio que se obtienen con la aleación, en los diferentes tratamientos térmicos.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Tabla II. 2: Propiedades Mecánicas en función del tratamiento térmico para la Aleación de Aluminio AA 6063⁽⁶⁾.

Tratamiento Térmico	Dureza (Brinell) Carga: 500Kg. Bola: 10mm	Propiedades Mecánicas				
		Sy(0,2%) (MPa)	Suts (MPa)	Resistencia a la Fatiga		Elong. (%) Long: 5cm Esp: 1,6
				S(MPa)	N(106)	
T0	25	50	90	55	500	-
T1	42	90	150	70	500	20
T4	46	90	170	-	-	22
T5	60	145	185	70	500	12
T6	73	215	240	70	500	12

T0: estado recocido.

T1: temple a la salida de la prensa y envejecimiento natural hasta una condición sustancialmente estable.

T4: tratamiento térmico de solubilización, temple y envejecimiento natural hasta una condición sustancialmente estable.

T5: temple a la salida de la prensa y envejecimiento artificial.

T6: tratamiento térmico de solubilización, temple y envejecimiento artificial.

2.2. DEPÓSITOS AUTOCATALÍTICOS ELECTROLESS NI-P

2.2.1. Principios Químicos

El proceso de “Electroless” se caracteriza por ser un proceso autocatalítico de deposición de níquel, sin requerir la aplicación de una corriente eléctrica. La técnica de deposición involucra la inmersión del

componente a recubrir en una solución de iones de Ni, los cuales se reducen en la superficie. El proceso continúa sobre la superficie recubierta por la acción catalítica del depósito. Además de los iones de Ni, en el baño se pueden encontrar otros agentes, cuya función es proporcionar la condición óptima para la continuidad del proceso.

2.2.2. Agentes Reductores

Para la reducción química de los iones de Ni presentes en la solución, pueden emplearse agentes a base de fósforo, boro o nitrógeno. Para la reducción con fósforo es ampliamente empleado el hipofosfito de sodio. Se utilizan los hidrocarburos de sodio o bien, los boruros de amina, para la reducción con boro. La reducción con nitrógeno, por otro lado, es generalmente realizada por medio de la hidrazina.

Ahora bien, la reacción de deposición por “Electroless” puede ser considerada como el resultado de la combinación de dos grupos de reacciones independientes:

- Reacciones parciales catódicas (reducción de iones de metal).
- Reacciones parciales anódicas (oxidación del agente reductor).

2.2.3. Agentes Acomplejantes

Los agentes complejantes son añadidos a las soluciones con el fin de regular o controlar la cantidad de níquel libre durante el proceso de deposición. De esta manera se previene la descomposición del baño, la cual podría presentarse por defecto de la precipitación de sales o compuestos de níquel. Estos agentes también son capaces de controlar la reacción de deposición de níquel, de manera que ésta ocurra en la superficie catalítica. Entre otros podríamos enunciar como complejantes los ácidos orgánicos y sus sales.

2.2.4. Estabilizadores – Inhibidores

Las soluciones de deposición por “Electroless” níquel en muchos casos tienden a degradarse y por ende es necesario el uso de estos agentes.

La descomposición del baño se inicia por lo general debido a la presencia de partículas sólidas coloidales en el baño. Estas partículas pueden resultar de la introducción a la solución del material externo, o pueden ser generadas como producto de la acumulación de ortofosfato en cantidades superiores a su límite de solubilidad. Independientemente de la fuente de esas partículas, el área superficial de las mismas cataliza la reacción, conduciendo a una reacción en cadena de autoaceleración y descomposición.

2.2.5. Dureza

La dureza Vickers de los depósitos de Ni-P, sin tratamiento térmico, se encuentra entre valores de 500 y 700, medidas con una carga de 100g⁽¹⁷⁾.

La dureza de los depósitos de “Electroless” Ni-P, evaluada sobre sustratos blandos, debe ser medida sobre la sección transversal y el depósito debe presentar un espesor mínimo de 30µm. Depósitos muy delgados tienden a reflejar en gran medida la dureza del sustrato, por lo que deben ser aplicados factores de corrección que permitan excluir la influencia de este.

Es importante destacar que, los valores de dureza de los depósitos de “Electroless” Ni-P, pueden ser modificados en gran medida por medio de la aplicación de tratamientos térmicos a temperaturas superiores a los 200°C. Durante estos tratamientos se produce la cristalización de la estructura amorfa inicial del depósito. Específicamente, según diferentes investigadores, el incremento en los valores de dureza se debe a la aparición del compuesto Ni₃P. Durante la formación de compuestos intermetálicos pueden ocurrir

transformaciones, las cuales pueden resultar en el endurecimiento por precipitación.

2.3. INDENTACIÓN

2.3.1. Prueba de Indentación

Esta prueba nos permite obtener, además de la dureza, información con respecto a las propiedades mecánicas del material como, por ejemplo, la tenacidad, Módulo de Young, Módulo de Poisson, dureza, coeficiente de endurecimiento por deformación, fatiga, etc.

A continuación, se detallarán el principio y las características de las diversas pruebas de indentación.

La prueba de indentación consiste en la aplicación de un indentador de forma conocida (esfera, cono o pirámide) a la superficie del material que será sometido a prueba. Bajo la acción de una carga de indentación, el indentador se hunde en el material produciendo una deformación elástica y plástica en la zona de contacto. Al ser retirado el indentador, queda una huella residual persistente en el material. Mientras mayor sea la carga de indentación, mayor será la huella residual. La dureza se calcula a partir de la relación entre la carga aplicada y una superficie representativa de la huella. La relación general se escribe:

$$H = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde

H: Dureza.

P: Carga Aplicada.

A: Superficie representativa de la huella

Según la naturaleza de la prueba, el área que se considera será el área real de indentación o la proyección de la huella impresa.

La aplicación de la carga de indentación puede ser discreta o continua. En el caso de ser discreta, la huella residual se observará después de retirar el indentador con ayuda de un microscopio óptico, y utilizando una regla graduada se podrá medir las diferentes longitudes características de la impresión o huella sobre el material. Para la indentación continua, la carga será aplicada progresivamente, midiendo, en tiempo real, el desplazamiento de la punta del indentador en función de la carga.

2.3.2. Dureza

La dureza se define como la resistencia mecánica que un material opone a la penetración, por un cuerpo más duro que dicho material, bajo la acción de una carga dada. La elección del indentador, se hace de manera que su deformación con relación a la del material a probar sea insignificante. El contacto entre estos dos cuerpos da como resultado una modificación superficial del material que se somete a prueba.

Dicha modificación no solo depende de las características intrínsecas del material, sino también de la forma y las condiciones de aplicación del indentador. De esto se infiere, que la dureza es en realidad una propiedad compleja que no se puede relacionar directamente con otras propiedades mecánicas. Sin embargo, el valor de dureza obtenida mediante el ensayo de indentación, es una información cuantificada obtenida por normas precisas. Así, aplicar la norma, permite comparar materiales o determinar el efecto de un tratamiento térmico o mecánico. La prueba de indentación es mucho más interesante que el simple y rápido empleo mencionado líneas arriba. Además, la

zona superficial del material no se ve afectada pues dicha prueba o ensayo es considerado como no destructivo.

Si la obtención de la cantidad de dureza no se puede clasificar como un problema, no sucederá igual con la interpretación física que se hace de ella, la cual varía según el método de indentación utilizado. A continuación, se detallarán el principio y las características de las pruebas de indentación.

2.3.3. Ensayo Brinell (Indentador Esférico)

En este ensayo se realiza una indentación con una punta esférica de Carburo Tungsteno o de diamante a un sustrato; con un diámetro d se indenta el material con una carga P como se muestra en la Figura II.2. Después de retirar la punta del indentador se procede a la medición del diámetro de la huella dejada por el indentador con un microscopio, para realizar el cálculo del área impresa en el material.

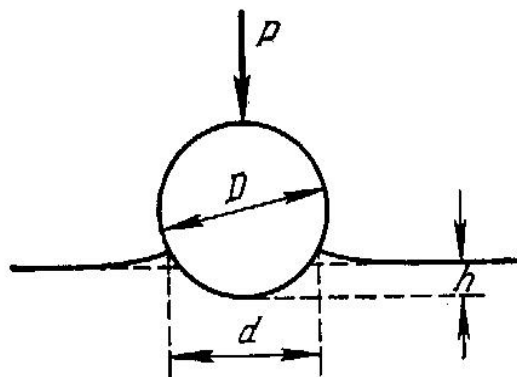


Figura II. 1: Dureza Brinell

El área superficial de la hendidura en forma de casquete esférico, que queda por la penetración del indentador, está en función del diámetro inicial de

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO
CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO
SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

la esfera y del diámetro de huella residual. La superficie se calcula según la siguiente relación:

$$A = \pi \times D \times h \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Con

$$h = \frac{1}{2} \times (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Reemplazando se tiene:

$$A = \frac{\pi \times D}{2} \times (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

La dureza se halla, reemplazando lo anterior en la relación (ecuación de dureza), obteniéndose así:

$$HB = \frac{P}{A} = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

A: Área superficial de la hendidura.

D: Diámetro inicial de la esfera.

d: Diámetro de huella residual.

h: Profundidad de indentación.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

P: Carga aplicada.

HB: Dureza Brinell.

2.3.4. Ensayo Rockwell (Indentador Cónico)

El indentador característico de este ensayo es un diamante en forma de cono con un ángulo de 120° en el vértice (se puede utilizar también esferas de acero templado de $1/8$ y $1/16$ de pulgada). La profundidad de la huella se determina según la diferencia entre las posiciones de la punta del indentador, desde la precarga hasta llegar a la carga máxima. La Figura II.4 esquematiza el principio de la prueba.

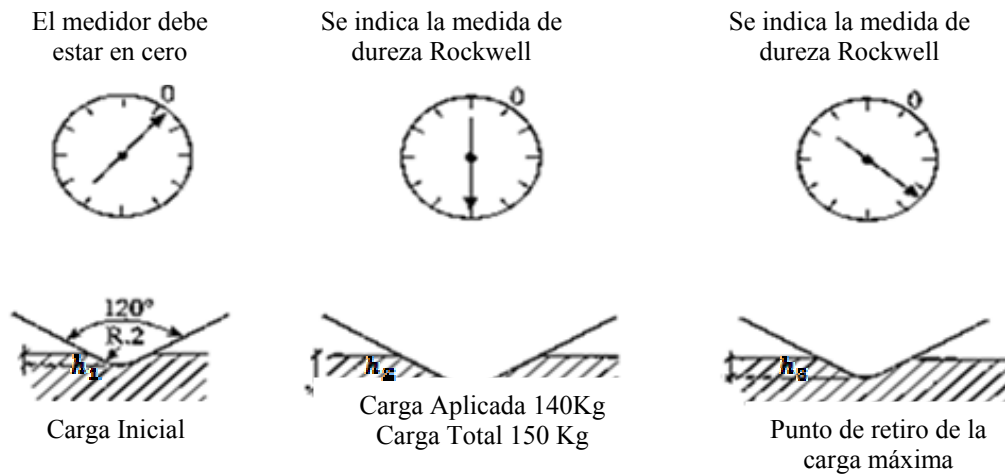


Figura II. 2: Esquema de la indentación Rockwell C.

La prueba Rockwell C consiste en aplicar una carga de 100 N, de modo que el cono penetre una profundidad h_1 . Luego se le aplica una fuerza de $100\text{N} + P$, con $P = 1400\text{N}$, con una duración de 3 a 8 segundos. El cono se hunde hasta una profundidad h_2 . Al retirarse la carga, debido a la recuperación

elástica del material, el cono queda a una profundidad h_3 menor que h_2 . La profundidad remanente ($h_3 - h_1$) permite calcular la dureza Rockwell C (HRC) según la fórmula siguiente:

$$HRC = (100 - (h_3 - h_1)) \times 500 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde

HRC: Dureza Rockwell.

h: Profundidad de indentación.

Una de las ventajas de la prueba Rockwell es que el valor de dureza se puede leer directamente en un medidor graduado.

2.3.5. Ensayo Vickers (Indentador Piramidal)

En la prueba Vickers, el objeto penetrante es un diamante en forma de pirámide de base cuadrada. El ángulo entre las caras triangulares opuestas es de 136° y entre las líneas opuestas es de 148° (*Figura II.4*).

Luego de haber penetrado la superficie del material con el indentador, la huella residual queda en forma de cuadrado (*Figura II.4*). El valor de dureza se calcula a partir de la relación entre la carga y la superficie real de contacto.

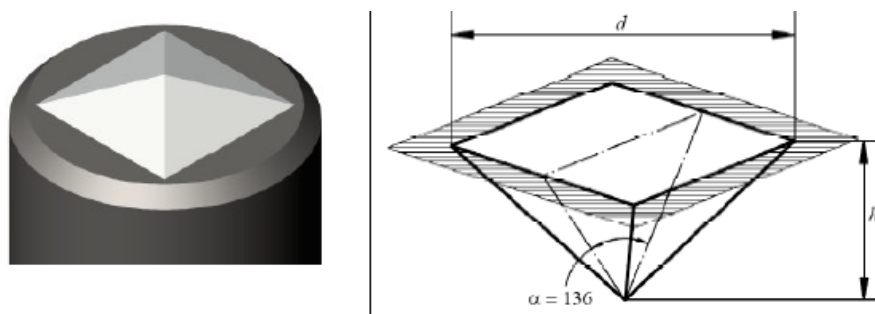


Figura II. 3: Esquema de la indentación Vickers.

La expresión general de la dureza Vickers viene dada por:

$$HV = \frac{1854,4 \times P}{d^2} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde

HV: Dureza Vickers.

P: Carga aplicada.

d: Diagonal de la huella.

HV se expresa en kgf/mm^2 la carga *P* se da en gf y la diagonal de la huella *d* en μm . A veces, la cantidad de dureza se expresa en GPa. En este caso, la carga *P* se expresa en Newtons (N) en la relación. En la práctica, el valor de la diagonal se obtiene a partir del promedio de las medidas de las dos diagonales. Un parámetro importante que se observa con frecuencia en el estudio de la indentación Vickers es la relación entre la diagonal y la profundidad de la huella o penetración *h*.

2.3.6. Ensayo Knoop (Indentador Piramidal)

El indentador Knoop es un diamante en forma de pirámide cuya base es un rombo. El menor ángulo entre líneas opuestas es de 130° y el mayor ángulo es de $172^\circ 30'$, tal como se detalla en la (*Figura II.4*). La huella que deja la indentación tiene la forma de un rombo alargado (*Figura II.4*).

El valor de dureza se calcula a partir de la relación entre la carga y la proyección de la huella en la superficie de contacto.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

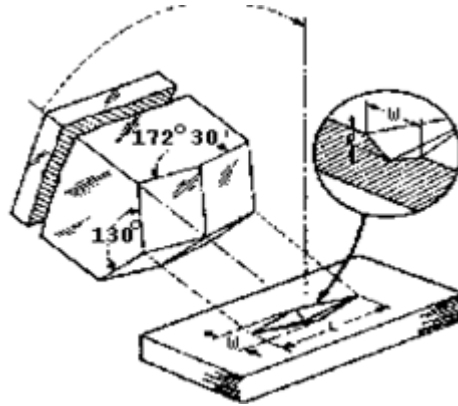


Figura II.4: Esquema del indentador Knoop.

La expresión general de la dureza Knoop viene dada por:

$$HK = \frac{14,229 \times P}{L^2} \quad (Ec. 2.8)$$

Donde

HK: Dureza Knoop.

P: Carga aplicada.

L: Diagonal Mayor.

2.3.7. Ensayo Berkovitch (Indentador Piramidal)

El indentador Berkovitch es un diamante en forma piramidal de base triangular. Como ejemplo, la (Figura II.5) muestra una huella Berkovitch y las deformaciones remanentes después de la prueba.

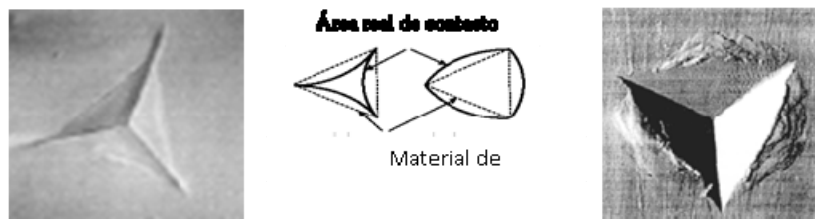


Figura II.5. Huellas piramidales Berkovitch con base triangular.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El ángulo entre una línea y la cara opuesta es de $63,3^\circ$. El valor de dureza se obtiene de la relación entre la carga y la profundidad de la huella, según:

$$H = \frac{P}{(4,95 \times d)^2} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde

H: Valor de la dureza.

P: Carga aplicada.

d: Profundidad de la huella.

2.4. MECÁNICA DE CONTACTO

2.4.1. Historia

Uno de los aportes más importantes en esta área, fue hecho por Heinrich Hertz, pues la mecánica de contactos está basada en sus estudios.

En 1882, Hertz publica estudios basados en esfuerzos de contacto y la deformación entre sólidos elásticos de formas arbitrarias resolviendo problemas de contacto entre dos cuerpos elásticos con superficies curvas. Su preocupación estaba centrada en la naturaleza de las deformaciones localizadas y la distribución de presiones entre dos cuerpos elásticos que se encuentran en contacto.

A través de modelos matemáticos de superficies en contacto que cumplieran con ciertas condiciones de contorno, establece una formulación adecuada a este problema. Realiza un análisis estableciendo una función

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

cuadrática para representar los perfiles de dos superficies opuestas y hace especial énfasis en el caso de esferas en contacto.

La ley que desarrolló, explica que el radio de contacto entre la esfera de un material elástico y una superficie, viene dado en términos del radio de la esfera, la fuerza normal ejercida sobre la esfera y el módulo de Young para el material de la esfera.

No fue sino hasta casi cien años después que Johnson Kendall⁽¹¹⁾ encontró una solución similar para el caso del contacto adhesivo, Teoría JKR. Los avances en este campo se producen en la primera mitad del siglo XX, se pueden atribuir a Bowden y Tabor⁽⁶⁾, quienes son los primeros en destacar la importancia de la rugosidad de la superficie de los cuerpos en contacto. A través de la investigación de la rugosidad de la superficie, se obtuvo que la verdadera área de contacto entre las partes en fricción es inferior al área de contacto aparente mediante la demostración de que la fuerza de fricción estática entre dos superficies deslizantes presentaba una fuerte dependencia al área de contacto real. El aspecto más destacado de su trabajo, fue las teorías de fricción en el contacto de asperezas, donde se discute detalladamente el desgaste adhesivo.

A través de las investigaciones de rugosidad de superficies, el área de contacto real entre los elementos sometidos a fricción fue menor que el área de contacto aparente entre ellos. Este descubrimiento cambió drásticamente la dirección de los estudios en tribología. La contribución de Archard (1957) puede ser mencionada y algunos aseguran que fue el primero en este campo, debido a sus conclusiones acerca de la proporcionalidad existente entre la fuerza normal y el área de contacto, las cuales incluyen la rugosidad de

superficies elásticas. Otras investigaciones de gran importancia fueron aportadas por Greenwood y Williamson (1966), Bush (1975) y Persson (2002).

El principal descubrimiento de estos trabajos fue que la superficie de contacto en materiales rugosos es generalmente proporcionada por la fuerza normal, mientras que los parámetros de micro-contacto individual (como presión y tamaño de contacto) son ligeramente dependientes de la carga.

2.4.2. El contacto Hertziano

En el contacto hertziano se asume una distribución de presión uniforme y parabólica, superficies sin fricción y elástico el comportamiento del material. Las condiciones para la ocurrencia de este tipo de contacto son:

- Los materiales en contacto son homogéneos y el esfuerzo de fluencia no es excedido o sobrepasado.
- El esfuerzo de contacto es causado por la carga que es normal al plano tangente de contacto lo que implica la no existencia de fuerzas tangenciales actuando entre los sólidos.
- El área de contacto es muy pequeña comparada con las dimensiones de los sólidos en contacto.
- Los sólidos en contacto están en reposo y en equilibrio.
- Los efectos de rugosidad de las superficies son despreciables.

2.4.3. Formulación

En el escenario de contacto entre un indentador esférico y una superficie plana se define que el radio de contacto está asociado a la carga y al radio del

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO
CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO
SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

indentador, y a las propiedades elásticas del material. Viene definido por la siguiente ecuación:

$$a^3 = \frac{3 \times P \times R}{4 \times E^*} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde el módulo de Young en contacto viene dado por una relación entre el módulo del indentador y el del espécimen:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu'^2}{E'} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde

a : Radio de contacto.

P : Carga aplicada.

E^* : Módulo de Young del combinado.

E : Módulo de Young asociado al espécimen.

E' : Módulo de Young asociado al indentador.

ν : Módulo de Poisson asociado al espécimen.

ν' : Módulo de Poisson asociado al indentador.

Para el caso cuando el indentador es considerado un cuerpo rígido la ecuación se ve reducida a:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu^2}{E} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

2.4.4. Indentador esférico

Considerando el contacto de una esfera, de radio R' , un módulo de Young E' y de Poisson ν' , respectivamente, con la superficie de un espécimen de radio R_1 con sus constantes elásticas E y ν , sin carga aplicada y con el indentador tocando solamente el espécimen, la distancia entre un punto de la periferia del indentador con la superficie del espécimen como función de la distancia radial es dado por:

$$h = \frac{r^2}{2 \times R} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde el radio equivalente de curvatura del indentador y el espécimen viene dado por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{R_1} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Donde

h : distancia entre un punto de la periferia del indentador y la superficie del espécimen.

r : Distancia radial.

R : Radio equivalente para la curvatura del contacto.

R_1 : Radio del espécimen

R' : Radio del indentador.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Para el caso de interacción de contacto entre un indentador esférico y una superficie plana, se considera que el radio de la superficie es infinito, por lo que la ecuación de radio equivalente se reduce a:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R'} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Se debe asumir que el contacto entre los dos cuerpos es sin fricción y que existe solamente una carga normal entre el indentador y el espécimen.

2.5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

De acuerdo a Zienkiewicz⁽¹⁹⁾ “El Método de Elementos Finitos es una técnica general para la construcción de una solución aproximada a problemas de valores de contorno. El método se basa en dividir el dominio de la solución en un número finito de sub-dominios simples, lo que serían los elementos finitos”. Este método es empleado satisfactoriamente en diversas áreas de la ingeniería, matemática y física, debido a que es un método que proporciona un amplio rango de soluciones a problemas en estas especialidades.

Hoy por hoy el método de elementos finitos se ha convertido en una poderosa herramienta para hallar soluciones numéricas a un amplio rango de problemas a nivel de ingeniería. Es de gran utilidad en el análisis de esfuerzos y deformaciones en áreas tales como la automotriz, aeronáutica, construcción, además de constituir una alternativa para el análisis de transferencia de calor, comportamientos de flujos de fluidos, flujos magnéticos, infiltraciones y otros problemas que involucren la presencia de fluidos. Para establecer otra ventaja para empleo de este método, se puede mencionar que con los avances de la tecnología en computadoras y con el desarrollo de herramientas CAD mucho más completas y con un mayor número de aplicaciones, problemas complejos

pueden ser modelados con relativa facilidad. Varias configuraciones del modelo pueden ser puestas a pruebas en un computador antes de la construcción de cualquier prototipo.

Todo esto sugiere que el método de elementos finitos se encuentra estrechamente relacionado con las herramientas computacionales, por ello es fundamental el entendimiento de la teoría básica, las técnicas para la construcción de los distintos modelos y los aspectos computacionales relacionados con el mismo.

En este método de análisis, una región compleja definida como un continuo es discretizada en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones que las gobiernan, son consideradas sobre estos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los nodos. Un proceso de acople, que considere debidamente las cargas y las restricciones, resulta en un sistema de ecuaciones. La solución de esas ecuaciones nos da la aproximación del comportamiento del continuo.

2.5.1. Desarrollo Histórico

Las ideas básicas del método de elementos finitos se originan de los avances en los análisis de estructuras aeronáuticas. En 1941, Hrenikoff presentó una solución para problemas de elasticidad usando el “Frame Work Method”. El artículo de Courant, en el cual se usa piecewise de interpolaciones polinomiales sobre sub-regiones triangulares para modelar problemas de torsión aparece en 1943. En 1955 Argyris publica un libro relacionado con teorema de energía y método de matrices el cual constituye una base para futuros desarrollos de estudios en elementos finitos. Turner derivó en las matrices rígidas para armaduras, vigas y otros elementos y presentó sus fundamentos en

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

1956. El término elemento finito fue conocido por primera vez y usado por Clough en 1960.

A principios de 1960, los ingenieros utilizaron el método para aproximar soluciones de problemas análisis de esfuerzos, flujo de fluido, transferencia de calor y otras áreas. El primer libro en elementos finitos fue publicado en 1967 por Zienkiewicz y Cheng. A finales de los 60 y principio de los 70, el análisis de elementos finitos fue aplicado para problemas no lineales y amplias deformaciones. El libro de Oden en continuos no lineales aparece en 1972.

Los fundamentos matemáticos son establecidos en la década de los 70. Nuevos desarrollos de elementos, estudios de convergencia y otras áreas relacionadas caen en esta categoría.

2.5.1.1. Procedimiento para la Implementación del Método de Elementos Finitos (MEF)

El MEF es un método numérico que requiere que ciertas condiciones sean cumplidas para garantizar su funcionamiento. Una manera general de expresar la forma de funcionamiento de este método puede resumirse en una entrada de datos en la cual se especifica la geometría de la pieza, el material del cual esta compuesta, las condiciones de contorno, todo esto aplicado a un caso lineal. En la segunda etapa que es la de procesamiento, es donde se procede a la división del dominio en los elementos a ser empleados lo que sería la construcción de la malla y en donde se construyen las matrices de rigidez de cada elemento para luego una vez obtenidas todas las matrices se procede a la ensamblarlas en una matriz global. En la etapa siguiente se procede a resolver el sistema de ecuaciones representadas en forma matricial empleando métodos ya conocidos que pueden ser Gauss, Gauss- Seidel, descomposición LU, entre

otros. Una vez resuelta se llega a la etapa de presentación de resultados, en donde se muestran los valores obtenidos de la resolución del sistema.

El MEF es un método de aproximación de problemas de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos. Los nodos son los puntos de unión de cada elemento con su adyacente.
- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

El MEF se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta aproximación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

2.5.1.2. Funciones de Forma

La interpolación es un elemento clave del MEF, puesto que es a través de las funciones de forma o de interpolación se consigue reducir el problema a

la determinación de los desplazamientos de unos nodos. Estas funciones deben dar valores suficientemente aproximados de los corrimientos de cualquier punto del elemento, en función de los desplazamientos de los nodos.

2.5.1.2.1. Propiedades de las Funciones de Formas

Entre las propiedades de las funciones de forma podemos mencionar las siguientes:

- *Derivabilidad:* Si el operador S es de orden m la función de forma deberá soportar la m -ésima derivada.
- *Integrabilidad:* Para que exista coherencia en la solución por MEF, una vez se realiza la m -ésima derivada, la función de forma debe ser integrable.

Semejanzas con las leyes de distribución de desplazamientos: Las leyes de distribución de desplazamientos son continuas, por lo que también lo deben ser las funciones una vez aplicado el operador S .

Condición de polinomio completo: Si la función de forma escogida es polinómica, lo que suele ser más habitual, para que la función se aproxime hasta el término m -ésimo a la solución real, el polinomio debe ser completo.

2.5.1.3. Pasos a seguir en el cálculo por MEF. Funcionamiento de un programa de elementos finitos

Los programas para cálculos por elementos finitos disponen de tres módulos de trabajo:

- *Pre-Procesador:* Es en esta etapa que se prepara el modelo para el cálculo y donde se realizan las siguientes operaciones:

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

- Dibujo del modelo o importación si se ha generado por medio de un sistema CAD que genere ficheros compatibles.
 - Selección del tipo de elemento o elementos a utilizar. En función del tipo de cálculos a realizar estos programas suelen disponer de diferentes tipos de elementos que son especiales para cada aplicación.
 - Selección de los materiales a emplear.
 - Asignación de elemento y propiedades de materiales a los diferentes componentes del modelo.
 - Aplicación de la malla a los componentes del modelo.
 - Aplicación de las cargas exteriores (puntuales, lineales, superficiales)
 - Aplicación de las condiciones de contorno.
- *Calculador:* En esta etapa se realizan los cálculos por MEF y se generan las soluciones.
 - *Configuración de los parámetros de cálculo:* intervalos de tiempo, norma del error, número de iteraciones.
 - *Inicio del cálculo:* El programa transfiere las cargas al modelo, genera las matrices de rigidez, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución
 - *Post – procesador:* Es la herramienta que permite la representación gráfica de los resultados, así como resultados indirectos que se puedan obtener operando las soluciones del modelo.

2.5.2. Matriz de Deformaciones

Conocidos los desplazamientos de todos los puntos del elemento, se pueden determinar las deformaciones ε en cualquier punto, que vendrá dada por la siguiente relación:

$$\varepsilon = S \times u \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Siendo S un operador lineal adecuado.

Para un análisis bidimensional la matriz de deformación se puede definir como:

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{du}{dx} \\ \frac{dv}{dy} \\ \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} \end{Bmatrix} = S \times u \quad (\text{Ec. 2.17})$$

2.5.3. Matriz de Elasticidad

Para materiales isótropos se tiene una matriz D que puede ser escrita en función de las constantes elásticas usuales, es decir, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

$$D = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \times \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

En general:

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = D \times (\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (\text{Ec. 2.19})$$

2.5.4. Matrices de Rigidez

La matriz de rigidez conceptualmente relaciona los desplazamientos de una serie de puntos o nodos, con los esfuerzos puntuales efectivos en dichos puntos. Desde un punto de vista operativo relaciona los desplazamientos incógnita de una espécimen con las fuerzas exteriores conocidas, lo cual permite encontrar las reacciones, esfuerzos internos y tensiones en cualquier punto del espécimen.

2.5.5. Elementos

El método de los elementos finitos supone que el comportamiento mecánico de un continuo, está conformado por un número finito de partes o elementos. Sobre estas partes o elementos son consideradas las propiedades del material y las relaciones constitutivas, donde a su vez, estos elementos se encuentran conectados entre sí por un número discreto de puntos llamados nodos, localizados en sus contornos.

Antes de seleccionar los tipos de elementos para modelar una estructura, se debe primero dibujar un bosquejo del sistema físico indicando la geometría global, condiciones de frontera, cargas y regiones de discontinuidades de material y de geometría. El bosquejo debe también incluir el sistema de coordenadas globales y las dimensiones de la estructura. Seguido, se debe examinar si la geometría del modelo puede ser reducida. Deformación plana, esfuerzo plano y axisimetría permiten la reducción de problemas tridimensionales a bidimensionales.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Adicionalmente la presencia de planos de simetría permiten modelar solamente una parte de la estructura.

2.5.5.1. Elementos en una dimensión

Estos elementos modelan líneas o rectas. Se usan para resolver problemas de transferencia de calor, sistemas acoplados termo-eléctricos, sistemas estructurales tipo cercha y elementos tipo vigas.

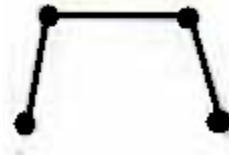


Figura II.6. Elemento en una dimensión.

2.5.5.2. Elementos en dos dimensiones

Modelan superficies, membranas y placas. Se usan para resolver problemas de esfuerzos planos, deformaciones planas, problemas acústicos y presión de poros, entre otros.



Figura II.7. Elemento en dos dimensiones.

2.5.5.3. Elementos en tres dimensiones

Modelan sólidos, placas gruesas y conchas. Se usan para resolver problemas que no pueden ser resueltos por los elementos en dos dimensiones o cuando las cargas a aplicar son complejas.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

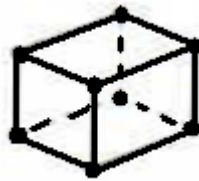


Figura II.8. Elemento en tres dimensiones.

2.5.5.4. Elementos axisimétricos

Siempre que exista simetría respecto a un eje es conveniente utilizar un elemento axisimétrico. Esto reduce en gran cantidad el tiempo de solución comparado a un modelo equivalente realizado en tres dimensiones, y en general lleva a mejores resultados. La sección dibujada para el modelo debe yacer sobre el plano XY, con el eje X siendo el eje radial y el eje Y el eje de simetría del elemento.

2.5.5.5. Elemento CAX4R

Es utilizado un elemento de 4 nodos, cuadrilátero lineal y axisimétrico de integración reducida. La integración reducida significa que solo existe un punto de integración Gaussiana, como se muestra en el elemento 1x de la fig. La integración reducida, generalmente, proporciona resultados más exactos y reduce de forma significativa el tiempo del proceso, especialmente en tres dimensiones. Los elementos con integración reducida tienen un punto menos de integración en cada dirección que los elementos de integración completa.

Para elementos sólidos el nombre depende de la dimensión del elemento, en ABAQUSTM el elemento sólido utilizado se denomina de la siguiente manera:

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

C A X 4 R

C: Continuo para esfuerzos y desplazamientos.

AX: Axisimétricos.

4: Número de nodos.

R: Integración reducida (R).

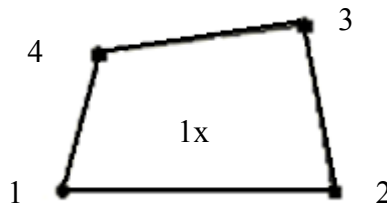


Figura II.9: Elemento CAX4R con un punto de integración Gaussiana

2.5.6. Convergencia del Método

La convergencia del MEF depende de varios factores como la función de forma, la selección del elemento, el tamaño del mismo y por consiguiente de la cantidad de elementos que constituyen la malla, además de las condiciones de borde aplicadas.

La convergencia del MEF implica la manera como varía el error al momento de pasar de un continuo a un medio discreto incrementando el número de elementos del sistema buscando bien sea la estabilización numérica de la solución o determinando el error entre la solución analítica y la numérica.

En cuanto a las funciones de forma y su papel en la convergencia del método, es necesario que estas cumplan ciertas condiciones tales como:

- *Compatibilidad*: Esto implica la continuidad de los desplazamientos dentro de los elemento y en sus fronteras.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

- *Completitud:* La continuidad igualmente debe presentarse dentro del propio elemento. La completitud implica que las funciones de desplazamiento en el elemento deben representar desplazamientos de cuerpos rígidos y estados de deformaciones constantes.

En cuanto a los desplazamientos de cuerpos rígidos estos son los que se producen sin que se generen esfuerzos en su interior. La condición de deformación constante es necesaria, ya que puede presentarse el caso de un número creciente de elementos, a medida que el número de elementos aumenta, el tamaño del mismo debe ser menor, por lo que a medida que el tamaño del elemento disminuye el valor de deformación tiende a alcanzar un valor constante y con esto se puede representar cualquier variación compleja del estado de deformación de un cuerpo.

Adicionalmente existen criterios de convergencia relacionados con las funciones de desplazamiento:

- *Primer Criterio:* Las funciones de desplazamiento de los elementos deben ser tales que no permitan deformaciones de los elementos cuando se esté en presencia de un desplazamiento de conjunto como cuerpo rígido.
- *Segundo Criterio:* Las funciones de desplazamiento deben garantizar que al existir desplazamientos nodales con un estado de deformación se obtenga ese estado de deformación constante
- *Observación:* Cuando el tamaño del elemento tiende a cero, ambos criterios deben ser satisfechos en el límite. (Bazeley et al. 1965)

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

- *Tercer Criterio:* La selección de las funciones de desplazamiento debe ser de tal forma que las deformaciones que se producen en los límites de las separaciones entre los elementos sean finitas.
- En cuanto a la malla, si el número de elementos es mayor y por lo tanto más pequeños, el error debería disminuir. Pero también hay que considerar que un número mayor de elementos implica que se realicen mayor cantidad de iteraciones.
- Las pruebas matemáticas de la convergencia asumen que el proceso de afinamiento de la malla está definido por tres condiciones:
 - La reducción del tamaño de los elementos debe realizarse de tal manera que cada punto del dominio de solución quede siempre dentro de cada malla nueva.
 - Cada nueva malla debe estar contenida dentro de la anterior.
 - Cuando se afina la malla las funciones de forma deben permanecer invariables.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología concerniente a nuestro trabajo. En el mismo se verán reflejados todas las técnicas y procedimientos con los cuales se logró realizar el modelado y posterior cálculo de las propiedades mecánicas de los especímenes aquí descritos.

Haciendo uso del software comercial ABAQUSTM/CAE se realiza la simulación del procedimiento de indentación de un sustrato, en nuestro caso el aluminio AA 6063 T6. El modelo se genera creando generando una proyección axisimétrica, ya que de esta manera se logra reducir el tiempo de solución en comparación a un modelo equivalente realizado en tres dimensiones.

Una vez creadas las partes que definen el modelo se procede a asignar las condiciones de borde de cada una de ellas, asignar los datos del material a ensayar, y las interacciones que existen entre ellas, para luego determinar la dureza del sustrato.

Luego, con los datos experimentales de dureza de un espécimen compuesto por un aluminio AA6063 T6 recubierto con NiP, y con la dureza calculada por simulación a través del software, se procede a determinar la dureza del recubrimiento haciendo uso del modelo Lesage-Pertuz.

3.1. METODOLOGÍA ABAQUSTM/CAE

3.1.1. Crear las Partes

Una vez abierto ABAQUSTM/CAE se procede a crear cada una de las partes del modelo, conformado por un indentador y un sustrato de proyección axisimétrica. Estas partes les debe ser atribuidas forma y dimensiones; el indentador es de forma esférica y tiene un diámetro de 1,6mm., mientras que el sustrato, según investigaciones anteriores, debe tener una dimensión equivalente a 20 veces el radio del indentador; para así garantizar que los bordes del sustrato no se vean afectados por los esfuerzos aplicados en la zona de estudio y así no presenten deformaciones.

Al momento de crear las partes se deben asignar las siguientes condiciones:

- El indentador es totalmente rígido, ya que la deformación que este presenta con respecto al sustrato es despreciable.
- El sustrato se le debe dar un archivo de entrada que defina las propiedades elasto-plásticas del material a usar, que en nuestro caso es el aluminio AA 6063 T6.
- La consideración de utilizar un modelo axisimétrico nos permite reducir los tiempos de cálculo computacional.

3.1.2. Mallado

Para discretizar la geometría del espécimen en estudio se debe realizar una división del mismo en diferentes elementos y consiste en la realización de un dibujo en 2D, en malla de alambre.

3.1.2.1. Importar la Malla

El software ABAQUS™/CAE ofrece las herramientas necesarias para crear una discretización del espécimen a estudiar, presentando la posibilidad de realizar un refinamiento de malla en las direcciones deseadas por el usuario. Debido a que el software presenta herramientas muy básicas de dibujo, resulta más cómodo y eficiente la creación de la malla a través de un software con herramientas de dibujo más avanzadas, para efectos de este modelo se utiliza el software AUTOCAD™, ya que el ABAQUS™/CAE permite la importación de este tipo de archivos bajo la extensión *.dxf* (Drawing Exchange Format), formato de archivo informático para dibujos de CAD, creado fundamentalmente para posibilitar la interoperabilidad entre los archivos *.dwg* (Drawing) usados por el programa AUTOCAD, y el resto de programas del mercado.

3.1.2.2. Generando la Malla

Como se explico anteriormente, la malla del espécimen fue generada con el software AUTOCAD™ 2009.

Se realizó un refinamiento de la zona de contacto, con más de 10,000 elementos de dimensiones menores a 10μ , para de esta manera obtener radios de contacto más precisos, ya que se ha observado que pequeños errores en el cálculo del área de contacto se ven reflejados como grandes errores al momento de calcular los esfuerzos.

Un elemento de forma trapezoidal es utilizado para realizar la transición de áreas de elementos menos densas a las áreas más discretas, lo que permite la asignación de elementos cuadriláteros a las propiedades de la malla sin presentar problemas.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

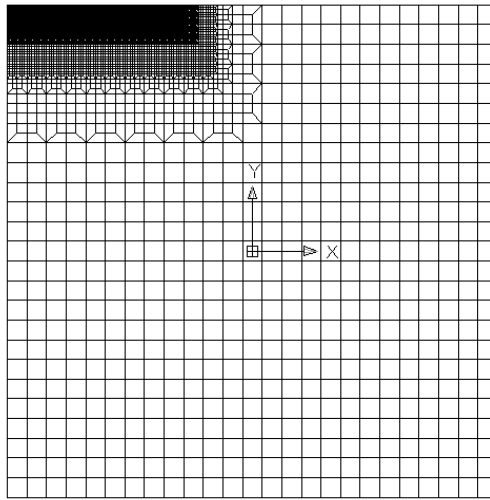


Figura III. 1. Malla hecha con AUTOCAD (17844 nodos).

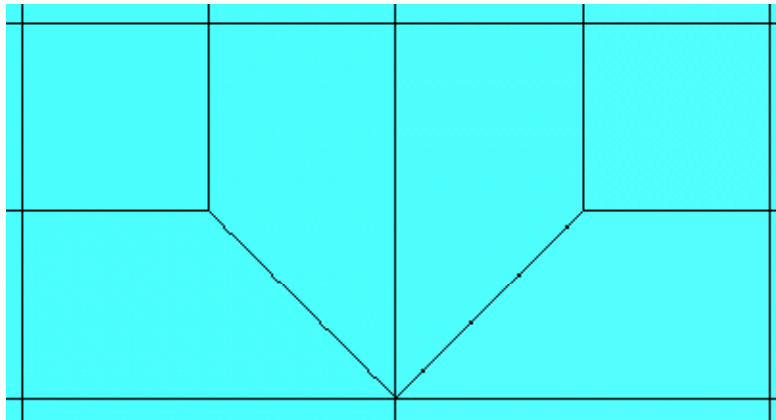


Figura III. 2. Elemento trapezoidal utilizado en el área de transición

3.1.2.3. Generando el mallado (nodos)

Una vez importado el mallado en el software ABAQUSTM/CAE, se debe indicar un tipo de mallado estructurado, en el que el elemento cuadrático es dominante, con un orden geométrico lineal y perteneciente a la familia de elementos axisimétricos, lo que permitirá que el software reconozca cada partición como elementos individuales y cada unión como un nodo.

3.1.2.4. Creando el OrphanMesh

El OrphanMesh es una herramienta del software ABAQUSTM/CAE que permite independizar el estudio, nodo a nodo y elemento a elemento, en el análisis de los resultados. Esta herramienta nos permite realizar la creación de *Sets*, que no son más que la agrupación de una cantidad de nodos o elementos en un conjunto, facilitando así la asignación de las condiciones de borde que rigen al modelo, por ejemplo para evitar el movimiento del sustrato en el instante de la indentación, se crea un *Set* que contenga todos los nodos de la base restringiendo su movimientos en todas las direcciones del sistema de coordenadas global.

3.1.3. Crear las Propiedades Mecánicas

En este paso es donde son asignadas las propiedades mecánicas de material utilizado. El material es un Aluminio 60603 T6 que posee las siguientes propiedades mecánicas:

- Módulo de Elasticidad: 69.000 MPa.
- Modulo de Poisson: 0,33.
- Coeficiente de endurecimiento por deformación: 0,09.
- Punto de fluencia: 223 MPa.

Estos datos representan el archivo de entrada del software, para efectos de el modelo que se describe, se dan las propiedades elasto-plásticas del material. También pueden realizarse estudios netamente elásticos solamente aportando el módulo de elasticidad y el de Poisson, o estudios netamente plásticos, pero para este último se debe aportar la data experimental de la curva esfuerzo-deformación.

3.1.4. Asignar la Sección

Procedimiento a través del cual se asigna al espécimen las propiedades características del material. Se debe especificar que la sección es sólida y homogénea, para que el software identifique el espécimen como un material con propiedades iguales en toda su superficie.

3.1.5. Ensamblando las Partes

Para relacionar las partes del modelo, el software ABAQUSTM/CAE proporciona una herramienta que permite ensamblar las partes creadas. Cada parte que se crea está orientada en su propio sistema coordinado y es independiente de las otras partes presentes en el modelo.

Haciendo uso del módulo **Assembly** se puede definir la geometría del modelo finalizado, a través de la creación de instancias de una parte y luego mediante la ubicación relativa de ellas con respecto a otras, para finalmente ensamblarlas en un sistema global de coordenadas.

ABAQUSTM/CAE coloca la instancia de modo que el origen del dibujo que definió el perfil rectangular del sustrato, coincida con el sistema de coordenada global.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

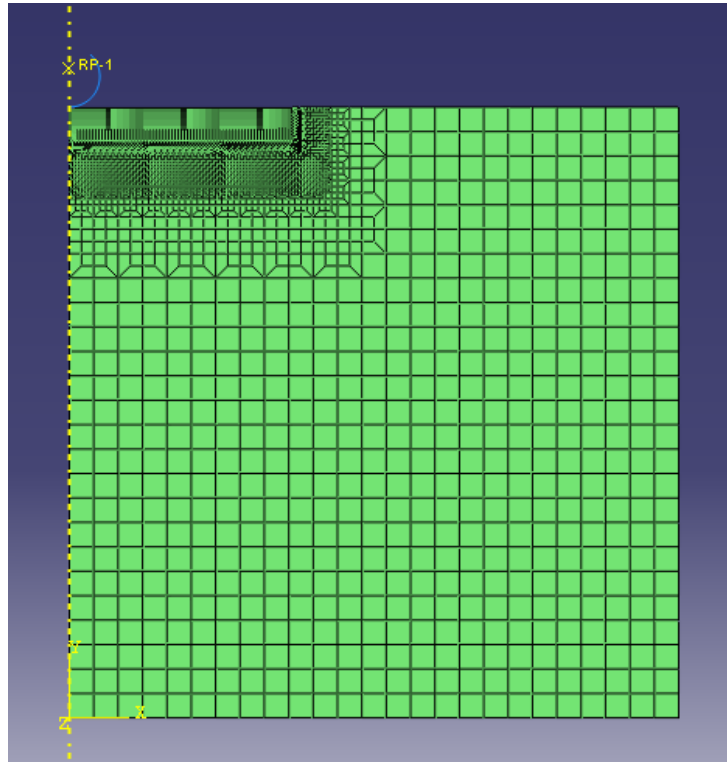


Figura III. 3: Ensamble del Indentador y el Sustrato

En este módulo se realiza la creación del conjunto de elementos y nodos, denominados *Sets*, que facilitarán la asignación de las condiciones de borde que rigen el modelo.

Posteriormente es necesario crear las superficies de contacto, entre el indentador y el sustrato, para que el software reconozca las superficies que estarán interactuando directamente.

3.1.6. Configuración del análisis

Luego de realizar el ensamblado de las partes creadas a través de la herramienta *Asembly*, se procede a acceder al módulo *Step*, donde serán asignadas las condiciones de borde del modelo.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Por defecto, el software crea un Step Inicial, en el que se definen las condiciones de borde iniciales del modelo. Este estado inicial presenta las partes creadas en un estado de contacto pero sin que se presenten fuerzas reactivas entre ellas.

Para el modelo diseñado, se realizaron 2 tipos de análisis, una con los datos elásticos y la segunda con los datos elasto-plásticos.

El primer análisis tiene como fin determinar el número óptimo de nodos y elementos de la malla utilizada para realizar el análisis.

Se crean 11 *Steps* seguidos del *Step initial*, donde el máximo incremento en el desplazamiento del indentador es de $10\mu\text{m}$., esto se hace para garantizar que la indentación sea netamente elástica. Se extraen los valores de carga aplicada para cada desplazamiento y se realiza una gráfica desplazamiento vs carga. Se comparan estos valores numéricos con los valores analíticos, realizando un ajuste con el modelo de Hertz, este análisis se realiza para verificar la idoneidad de la malla, y así determinar el número óptimo de nodos del modelo.

En el segundo análisis se definen las propiedades elasto-plásticas del Aluminio 6063 T6. El esfuerzo y la deformación son determinados utilizando el modelo de Tabor⁽⁶⁾. Se crean 8 *Steps* cada uno con un incremento de 0.04mm ., esto se hace para tener un desplazamiento controlado del indentador.

Al terminar este análisis se alcanza una distancia de 0.32mm ., distancia que corresponde a $1/5$ del radio del indentador.

3.1.6.1. Crear los desplazamientos

En este paso se procede a crear los desplazamientos del indentador, esto se logra creando una condición de borde en el centroide del mismo, cuya

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

función sea la de desplazarse 0.04 mm., en el *Step 1*, y que tenga un incremento constante en los *steps* siguientes. Esto se verá indicado por una flecha en dirección de penetración (*Figura III.4*).

3.1.6.2. Condiciones de Borde

En el *Step Initial* se crean las condiciones de borde que rigen el comportamiento del modelo.

- El indentador se le restringe su movilidad en el eje x , ya que de esta manera se asegura el impacto vertical del sustrato.
- El sustrato se le aplican varias restricciones, en la base se le aplicó un empotramiento, opción que restringe el movimiento en todas las direcciones, y en el eje que define la axisimetría del modelo, se restringe su dirección x . En la *Figura III.4* se muestran las condiciones de borde del modelo.

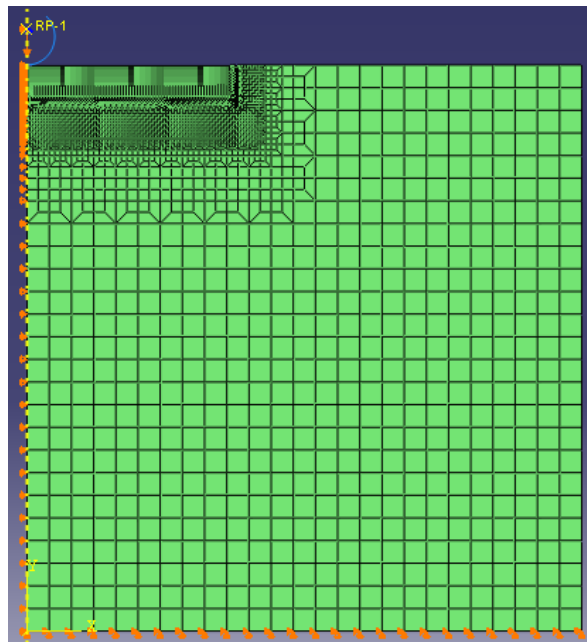


Figura III. 4. Condiciones de borde del modelo

3.1.7. Interacción de las Superficies

En este paso creamos la propiedad de interacción entre la superficie del sustrato y la superficie del indentador, para ello primero hay que seleccionar una como maestra y la otra como esclava, la esclava viene a ser el sustrato, ya que este no se va a mover; y el indentador la maestra, ya que esta es la que se desplaza verticalmente para realizar la indentación.

La selección de estas superficies de forma nodal en el sustrato y superficial en el indentador, porque ésta es rígida, por lo tanto sólo reconoce la superficie.

3.1.8. Extracción de los resultados.

Se usa el módulo Visualization para leer la base de datos de salida que ABAQUS/CAE genera durante el análisis y para ver los resultados del mismo. En este ejemplo, al ser nombrado al trabajo como “Aluminio_17844”, cuando este es creado; ABAQUS/CAE nombra a la base de datos de salida como Aluminio_17844.odb. Cuando se abre una base de datos de salida, ABAQUS/CAE inmediatamente despliega, en pantalla, una rápida representación del modelo que es similar a un dibujo del sistema indentador-sustrato sin deformación. Se visualizara, el modelo deformado y el contorno de esfuerzos de Von Mises.

Esto se hace seleccionando de la barra de herramientas *Query Information*. Luego se despliega una caja de dialogo donde se puede seleccionar la información deseada, por ejemplo el esfuerzo de Von Misses, la información se puede extraer de forma nodal o por elementos, en cada uno de los *steps* configurados.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El análisis arroja los siguientes datos:

- Descripción del trabajo.
- La base de datos de salida desde la cual ABAQUS/CAE lee la data.
- La versión del ABAQUS/Standard ó ABAQUS/Explicit que fue usada para generar la base de datos de salida.
- La fecha en que la base de datos de salida fue generada.

Y un bloque de estado que indica:

- El nombre del paso y la descripción del mismo.
- El incremento dentro del paso.
- El tiempo del paso.
- Cuando se está visualizando una forma deformada, la variable deformada y el factor de escala de deformación.
- Es importante saber que por defecto u omisión ABAQUS/CAE plotea el último paso y el último marco del análisis.

3.1.9. Convergencia de la Malla

Una vez obtenido el resultado de cada simulación, se procede a optimizar el número de nodos con el que se va a trabajar, esto se hace para obtener un resultado preciso de los valores de esfuerzos, cargas, deformaciones; sin necesidad de tener un número muy elevado de nodos y a su vez sin que se vean afectados los resultados que se obtendrán de la simulación.

La convergencia de la malla se realizó aumentando gradualmente el número de nodos y comparando los valores de carga y profundidad obtenidos de la simulación con los resultados analíticos del modelo de Hertz, que relaciona el Módulo de Poisson, diámetro del indentador, profundidad de indentación y la carga; los valores del Módulo de Poisson y el diámetro del

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

indentador son datos que se conocen, mientras que la carga como la profundidad de indentación son valores obtenidos por medio de la simulación con el software comercial. Al graficar los valores de carga vs. profundidad de indentación se pueden comparar con los valores de carga que se obtienen del Modelo de Hertz. Cuando la diferencia de las cargas en cada avance obtenido se hace mínimo y este a su vez no varía al aumentar el número de nodos, se puede afirmar que la convergencia de la malla está lista, por lo que no es necesario aumentar el número de nodos y elementos en el mallado.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE ESFUERZO CONTRA DEFORMACION A PARTIR DE LA INDENTACION.

3.2.1. Determinación del área de Contacto

Para determinar el área de contacto se extrajo del programa ABAQUSTM/CAE una curva de la indentación realizada en proyección axisimétrica como se muestra en la Figura III.5; con la función polinómica de esa curva, se procede a determinar el punto de inflexión, el valor de este punto es el radio de la huella que deja el indentador. Una vez calculado el radio se puede calcular el área de contacto para proceder al cálculo de los esfuerzos y las deformaciones.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

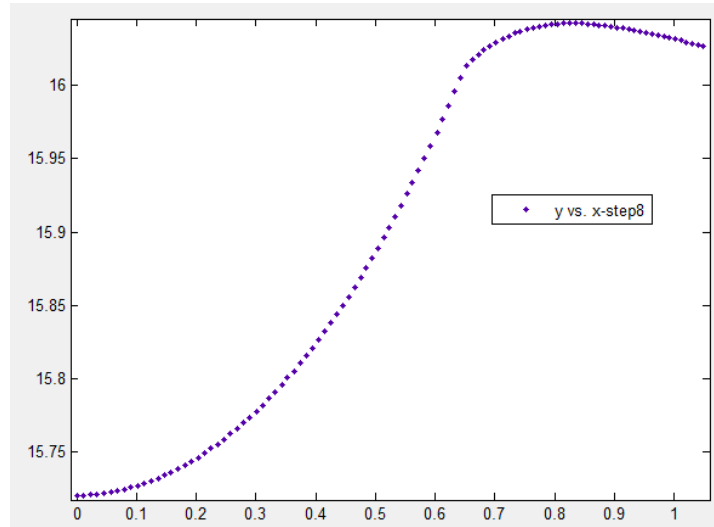


Figura III. 5: Perfil de indentación del Aluminio 6063 T6

3.2.2. Determinación del esfuerzo y la deformación

La deformación de indentación “ $\varepsilon_{\text{indentación}}$ ” fue calculada mediante la ecuación correspondiente (Ec. 3.3). Para el cálculo del esfuerzo de indentación “ $\sigma_{\text{indentación}}$ ” se utilizó el modelo propuesto por Tabor⁽⁶⁾. De la curva esfuerzo deformación, obtenida en el ensayo de tracción, se tomaron valores de esfuerzo correspondientes a las deformaciones de indentación. Luego, los valores de presión media obtenidos en los ensayos de indentación fueron divididos entre los esfuerzos de tracción antes mencionados:

$$P_m = \frac{P}{A_{proj}} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

P_m = Presión media [MPa].

$$\sigma = \frac{P_m}{2,8} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

$$\varepsilon = 0,2 \times \frac{d}{D} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Con los valores de deformación obtenidos mediante la ecuación correspondiente, y los valores de esfuerzo calculados anteriormente, se construyó la curva esfuerzo-deformación por indentación. Posteriormente, se compararon las curvas esfuerzo-deformación obtenidas por el ensayo de tracción con las de indentación. Estos cálculos fueron realizados para el material ensayado (aluminio AA6063T6)

3.3. CURVAS DEL SISTEMA SUSTRATO-RECUBRIMIENTO

Se realizó una comparación entre las curvas esfuerzo-deformación del Aluminio 6063 (sin recubrimiento) con las del aluminio recubierto.

Con los valores del ensayo de indentación (carga, diámetro de la huella) de las probetas sistema sustrato-recubrimiento, se calcularon valores de dureza Brinell mediante la ecuación correspondiente.

Mediante el modelo de Lesage y Pertuz se obtuvieron valores de dureza del recubrimiento. La ecuación que rige este modelo es la siguiente:

$$A \times H_f^2 + B \times H_f + C = 0 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Siendo

$$\begin{cases} A = f^2 \times (f - 1) \\ B = (-2f^3 + 2f^2 - 1) \times H_s + (1 - f) \times H_c \\ C = f \times H_c \times H_s + f^2 \times (f - 1) \times H_s^2 \end{cases} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde

$$f = \left(\frac{t}{d}\right)^m \quad (\text{Ec. 3.6})$$

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El valor de “m” es calculado por el desarrollo de una regresión lineal de todos los puntos experimentales obtenidos para el sistema sustrato-recubrimiento y deducido de la siguiente relación.

$$\ln d = m \times \ln P + d \quad (\text{Ec. 3.7})$$

H_c = Dureza del conjunto.

H_s = Dureza del sustrato.

H_f = Dureza del recubrimiento.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo contiene los resultados y el análisis de resultados de la simulación realizada para el presente trabajo de investigación, los mismos estarán divididos en tres partes, primeramente serán presentados los resultados que corresponden a la obtención de la malla idónea del modelo, luego se mostrarán los resultados del modelo planteado para determinar las propiedades mecánicas del aluminio AA 6063 T6; y finalmente se expondrán los resultados de la dureza del recubrimiento de la superaleación Base Níquel.

Para el análisis adecuado de esta información, es necesario presentarla de manera organizada mostrando los datos más representativos con el objeto de dar respuesta al problema planteado en la investigación.

Los resultados obtenidos serán comparados con los resultados experimentales para así determinar la validez del modelo.

4.1. CONVERGENCIA DEL MALLADO

A continuación se presentan las diversas simulaciones realizadas para obtener la malla idónea con la cual se desarrolla el modelado final. Esta malla se realiza con la finalidad de obtener radios de contacto más precisos ya que pequeños errores en el cálculo de este radio, se traducen en grandes errores en el cálculo de los esfuerzos y las deformaciones.

Esta convergencia de malla otorga una mayor precisión de análisis y se realiza efectuando la comparación entre los datos de carga aplicada obtenidos de las simulaciones con los valores de carga aplicada analíticos que se obtienen

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

a través de la solución analítica de Hertz para un indentador perfectamente rígido que interactúa con una superficie puramente elástica, la cual viene dada por la ecuación:

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{3} \times \frac{E\sqrt{D}}{1-\nu^2} \times h_s^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

P : Carga aplicada.

E : Módulo de Elasticidad del Aluminio.

ν : Módulo de Poisson del Aluminio.

h_s : profundidad de indentación.

Para asegurar que se está trabajando en un régimen completamente elástico se define una profundidad de indentación relativamente superficial, $h_s=10\mu\text{m.}$, esta profundidad es dividida en 10 intervalos iguales, por lo que la comparación vendrá dada entre los valores de carga aplicada simulados y los valores de carga aplicada analíticos.

A continuación se presentan las gráficas y tablas de resultados de cada simulación del modelo de indentación, para mostrar así el proceso de convergencia de la malla.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Las siguientes figuras muestran el proceso de convergencia de la malla, para esto se realizaron 6 mallados en los cuales se varió el número de nodos, incrementando su cantidad en la zona de contacto, la malla inicial posee 877 nodos y esta es refinada hasta una malla de 17.844 nodos.

Cada figura muestra la comparación entre la data obtenida mediante la simulación del modelo de indentación con la solución analítica de Hertz.

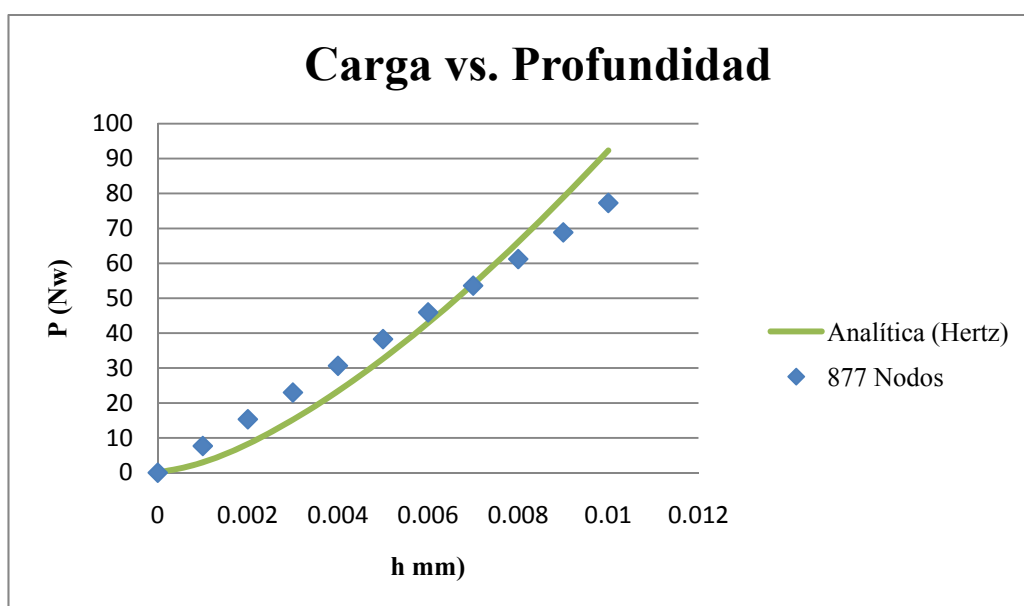


Figura IV. 1: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (877 nodos).

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

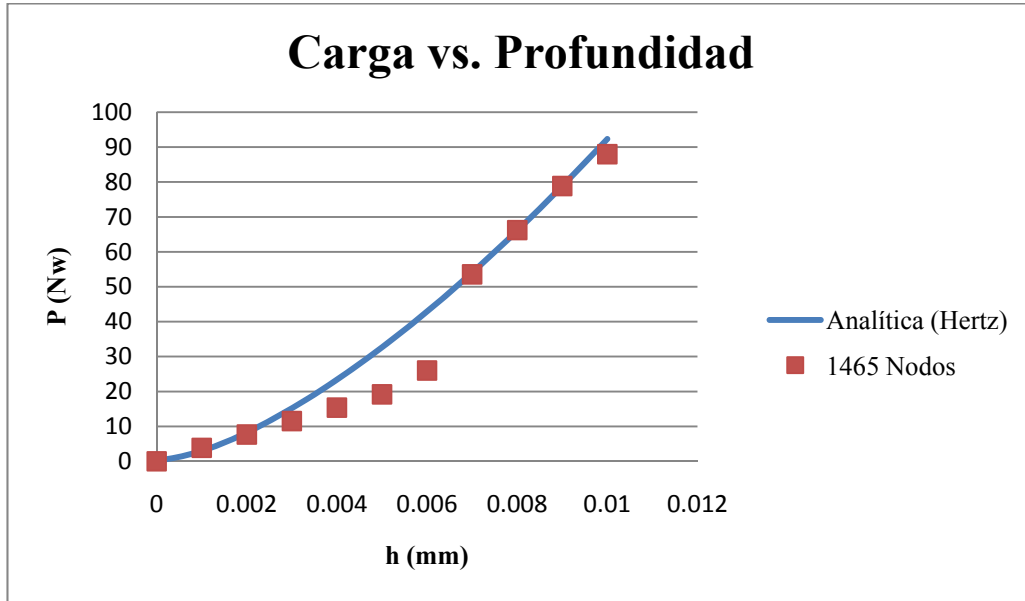


Figura IV. 2: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (1465 nodos).

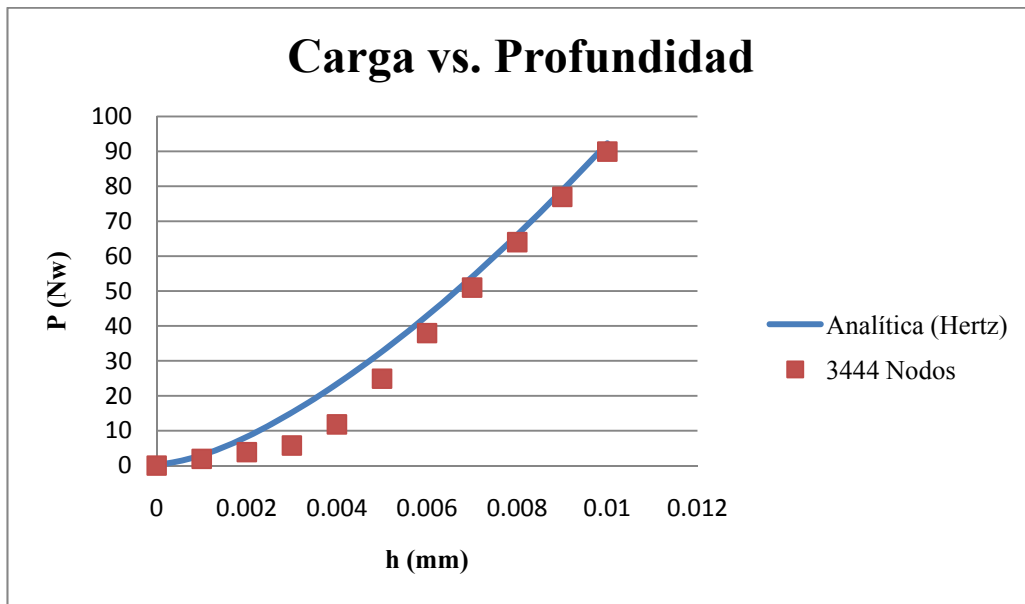


Figura IV. 3: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (3444 nodos).

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

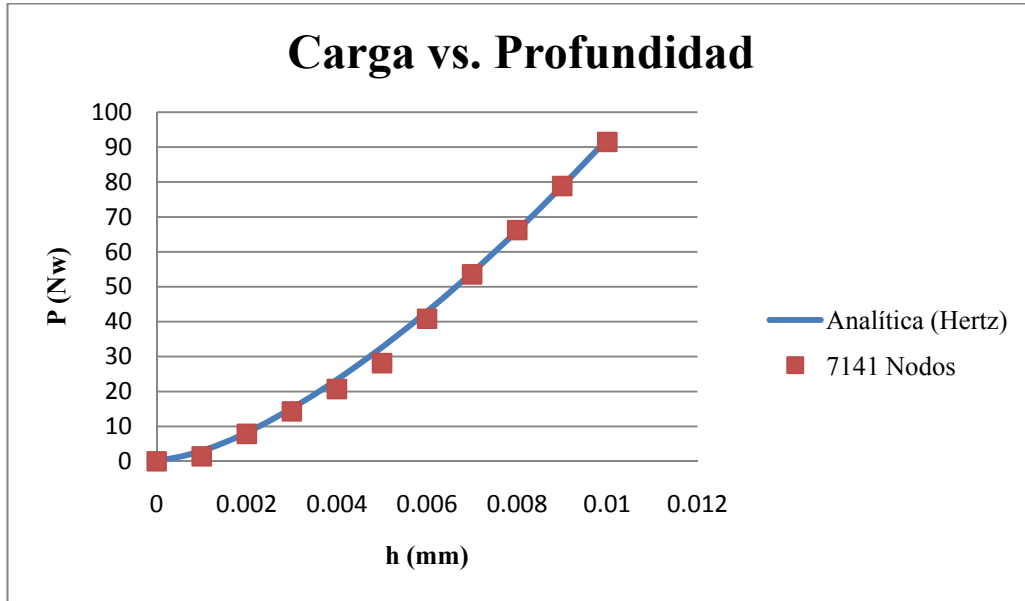


Figura IV. 4: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (7141 nodos).

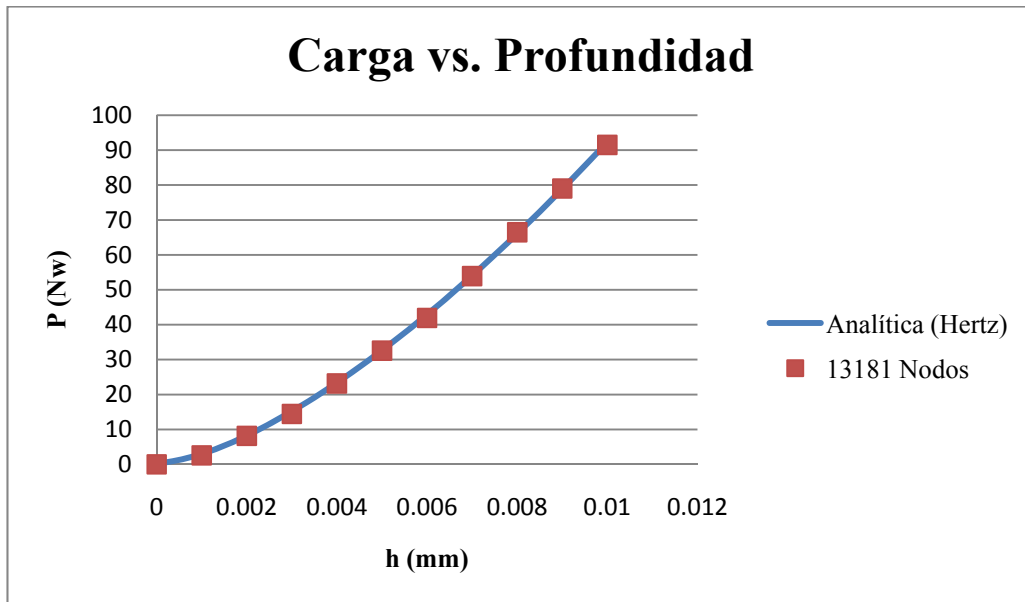


Figura IV. 5: Gráfica comparativa carga vs. profundidad de indentación, entre la solución MEF y analítica (13181 nodos).

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

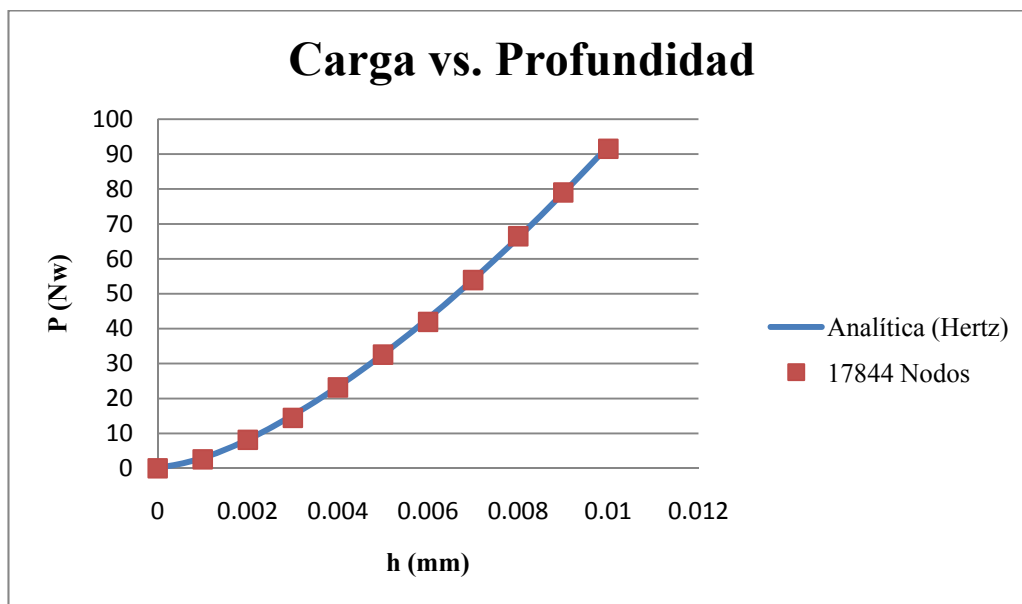


Figura IV. 6: Tabla Comparativa de la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación

Se puede apreciar claramente que a medida que se aumentan el número de nodos, la tendencia de los valores de carga extraídos del modelo se ajusta a la tendencia de los valores de carga obtenidos a través de la solución analítica de Hertz. Esto se debe a que a medida que se refina la malla los nodos en contacto entre la superficie del espécimen con la superficie del indentador son cada vez mayor, lográndose así una mejor aproximación de las fuerzas reactivas que genera el contacto entre ambos cuerpos.

Se observa que las mallas de 13181 nodos y 17844 nodos se ajustan se ajustan completamente a la curva de Hertz, por lo que se puede decir que en un intervalo cercano a los 13 mil nodos la malla empieza converger a un solo valor de carga para una profundidad específica, lo que nos permitiría trabajar con una malla con menos nodos lo que significaría una disminución en el proceso del cálculo computacional del software.

La Figura IV.7 muestra la comparación de todos los mallados realizados con la curva de Hertz con lo que también se aprecia que las mallas de 13181 nodos y 17844 nodos son las que mejor se adaptan a la curva analítica. Aunque

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

a partir de la malla de 13181 nodos la tendencia se ajusta muy bien a la curva analítica, se utilizó la malla de 17844 nodos para validar la convergencia de los valores de la carga aplicada.

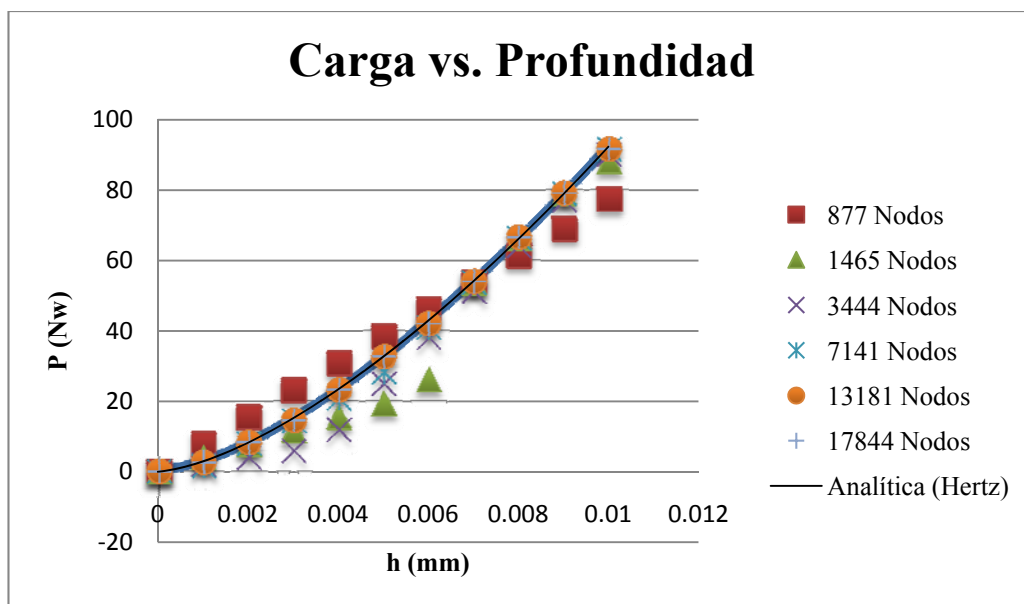


Figura IV. 7: Ajuste de la convergencia de la Malla

Las tablas que a continuación se presentan nos muestran como disminuye el error entre los valores de carga analíticos y simulados, disminuyen a medida que el refinamiento de la malla es cada vez mayor. Como se observará los errores de los mallados muy finos tienen la misma tendencia, lo que confirma que a partir de un intervalo cercano a los 13 mil nodos los valores de la carga convergen hacia uno solo.

Tabla IV. 1: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (877 nodos)

	Analítica	Simulación	
h [mm]	P [Nw]	P [Nw]	Error %
0	0	0	0
0.001	2.9202	7.66837	162.60
0.002	8.2595	15.3329	85.64
0.003	15.1736	22.9935	51.54

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

0.004	23.3613	30.6501	31.20
0.005	32.6484	38.3027	17.32
0.006	42.9174	45.9514	7.07
0.007	54.0821	53.5959	0.90
0.008	66.0756	61.2364	7.32
0.009	78.8443	68.8728	12.65
0.01	92.3435	77.32	16.27

Tabla IV. 2: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (1465 nodos).

	Analítica	Simulación	
h [mm]	P [Nw]	P [Nw]	Error %
0	0	0	0
0.001	2.9202	3.84685	31.73
0.002	8.2595	7.68976	6.90
0.003	15.1736	11.5287	24.02
0.004	23.3613	15.3635	34.24
0.005	32.6484	19.1941	41.21
0.006	42.9174	26.0206	39.37
0.007	54.0821	53.54	1.00
0.008	66.0756	66.22	0.22
0.009	78.8443	78.86	0.02
0.01	92.3435	87.97	4.74

Tabla IV. 3: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (3444 nodos).

	Analítica	Simulación	
h [mm]	P [Nw]	P [Nw]	Error %
0	0	0	0
0.001	2.9202	1.925	34.08
0.002	8.2595	3.847	53.42

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

0.003	15.1736	5.76	62.04
0.004	23.3613	11.806	49.46
0.005	32.6484	24.88	23.79
0.006	42.9174	37.94	11.60
0.007	54.0821	50.98	5.74
0.008	66.0756	64.008	3.13
0.009	78.8443	76.98	2.36
0.01	92.3435	89.94	2.60

Tabla IV. 4: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (7141 nodos).

	Analítica	Simulación	
h [mm]	P [Nw]	P [Nw]	Error %
0	0	0	0
0.001	2.9202	1.416	51.51
0.002	8.2595	7.87	4.72
0.003	15.1736	14.3	5.76
0.004	23.3613	20.7	11.39
0.005	32.6484	28.11	13.90
0.006	42.9174	40.84	4.84
0.007	54.0821	53.54	1.00
0.008	66.0756	66.22	0.22
0.009	78.8443	78.86	0.02
0.01	92.3435	91.48	0.94

Tabla IV. 5: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (13181 nodos).

	Analítica	Simulación	
h [mm]	P [Nw]	P [Nw]	Error %
0	0	0	0
0.001	2.9202	2.568	12.06
0.002	8.2595	8.16	1.20

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

0.003	15.1736	14.439	4.84
0.004	23.3613	23.154	0.89
0.005	32.6484	32.562	0.26
0.006	42.9174	41.939	2.28
0.007	54.0821	53.914	0.31
0.008	66.0756	66.48	0.61
0.009	78.8443	79.015	0.22
0.01	92.3435	91.492	0.92

Tabla IV. 6: Tabla comparativa entre la carga simulada y la carga analítica en función de la profundidad de indentación (17844 nodos).

	Analítica	Simulación	
h [mm]	P [Nw]	P [Nw]	Error %
0	0	0	0
0.001	2.9202	2.568	12.06
0.002	8.2595	8.16	1.20
0.003	15.1736	14.439	4.84
0.004	23.3613	23.155	0.88
0.005	32.6484	32.563	0.26
0.006	42.9174	41.9394	2.28
0.007	54.0821	53.91	0.32
0.008	66.0756	66.4808	0.61
0.009	78.8443	79.016	0.22
0.01	92.3435	91.529	0.88

Se puede observar como a medida que la cantidad de nodos aumenta en el proceso de refinamiento de la malla, el error entre los valores simulados y analíticos son cada vez menores. Ciertos saltos son apreciables en las mallas de 13.181 y 17.844 nodos, específicamente en el primer y en el tercer avance de indentación, que generan errores de 12% y 5% respectivamente, esto se debe a que la selección de los nodos en contacto se hace de forma manual de uno en

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO
CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO
SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

uno, por lo que un error de carácter humano se introduce en el modelado, aun así se puede ver que la mayoría de los errores son menores al 2 %, lo que demuestra una vez más que los valores simulados se ajustan a los valores analíticos.

4.2. INDENTACIÓN PLÁSTICA

A continuación se muestran los valores de esfuerzo vs. deformación obtenidos haciendo uso de la malla de 17844 nodos. La curva analítica se realiza haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_y}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$\sigma = \left(\frac{E}{\sigma_y} \right)^n \varepsilon^n \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde los valores de σ_y , E y n , (esfuerzo de fluencia, módulo de elasticidad y coeficiente de endurecimiento por deformación respectivamente), provienen de la data experimental. De la data experimental también se obtiene el valor de la dureza del ensayo Brinell realizado.

Tabla IV. 7: Tabla de datos experimentales del Aluminio AA 6063 T6

σ_y (MPa)	E (MPa)	n	HBN
223	69000	0,009	73

La curva realizada a través de la simulación es realizada con las ecuaciones de Tabor⁽⁶⁾.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO
CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO
SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

$$\sigma = \frac{P_m}{2,8} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$\varepsilon = 0,2 \times \frac{d}{D} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde los valores de d , D y P_m (diámetro de la huella impresa, diámetro del indentor y presión media respectivamente) son los extraídos de la simulación del modelo en el software ABAQUSTM, como se puede observar en la *Tabla IV.8*.

Tabla IV. 8: Dureza Brinell determinada según la carga aplicada por MEF

P [Nw]	D [mm]	Area [mm ²]	Pm [N/mm ²]	σ [N/mm ²]	ε	HBN [Kgf/mm ²]	Error [%]
97.326	0.4162	0.1360	715.3805	255.4930	0.0520	71.742	1.72
207.65	0.575	0.2597	799.6695	285.5963	0.0719	78.873	8.05
321.28	0.716	0.4026	797.9429	284.9796	0.0895	77.119	5.64
438.52	0.816	0.5230	838.5331	299.4761	0.1020	79.583	9.02
559.49	0.9246	0.6714	833.2931	297.6047	0.1156	77.212	5.77
680.70	0.9962	0.7794	873.3278	311.9028	0.1245	79.425	8.80
805.98	1.1036	0.9566	842.5860	300.9236	0.1380	74.115	1.53
896.26	1.1542	1.0463	856.6087	305.9317	0.1443	73.972	1.33

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores de dureza Brinell obtenidos por simulación con el software ABAQUSTM, se aproximan al valor obtenido mediante ensayos experimentales, con errores menores al 9%.

La siguiente figura muestra una comparación entre las curvas Esfuerzo vs. Deformación del Aluminio AA 6063-T6, una calculada de forma analítica y otra con la data extraída del modelo. Se aprecia que la tendencia de ambas es

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

parecida, por lo que se determina que existe una buena correlación entre los datos analíticos y los datos obtenidos numéricamente.

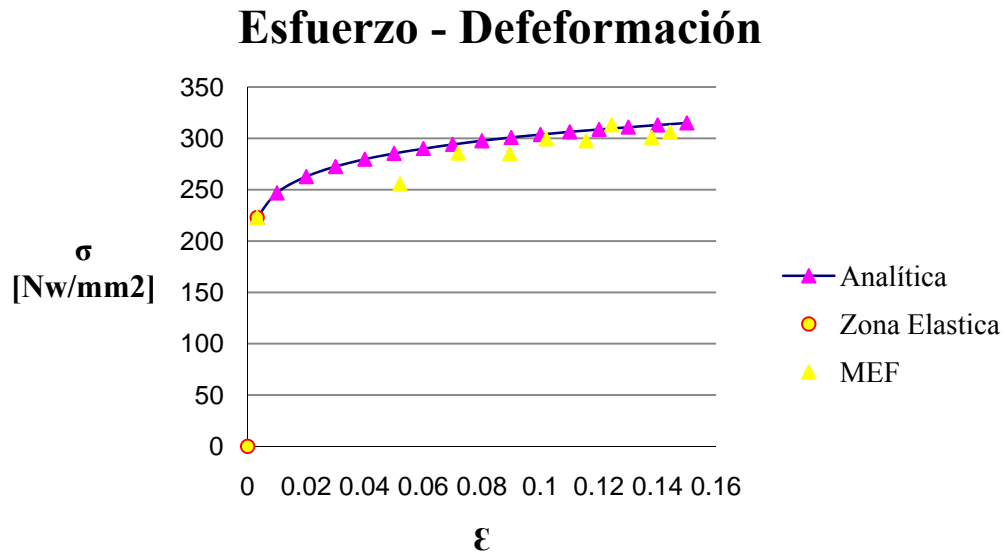


Figura IV. 8: Comparación de la zona plástica por el método analítico y MEF

Realizando un ajuste potencial de ambas curvas se obtiene la ecuación respectiva de cada una de ellas, donde $y = 373,64 X 0,09$ es la ecuación analítica y $y = 357.14 X 0,0856$, es la ecuación obtenida con MEF, donde el exponente que acompaña a la X es el coeficiente de endurecimiento, obteniéndose que para esta variable el error entre la simulación y el de la data es de 4 %.

En la *Figura IV.9*, se muestra la tendencia de la dureza Brinell en función del área de la huella, en el cuál se mantiene un comportamiento que tiende a 77 HBN, el cual se ajusta al valor teórico con una diferencia del 5%.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

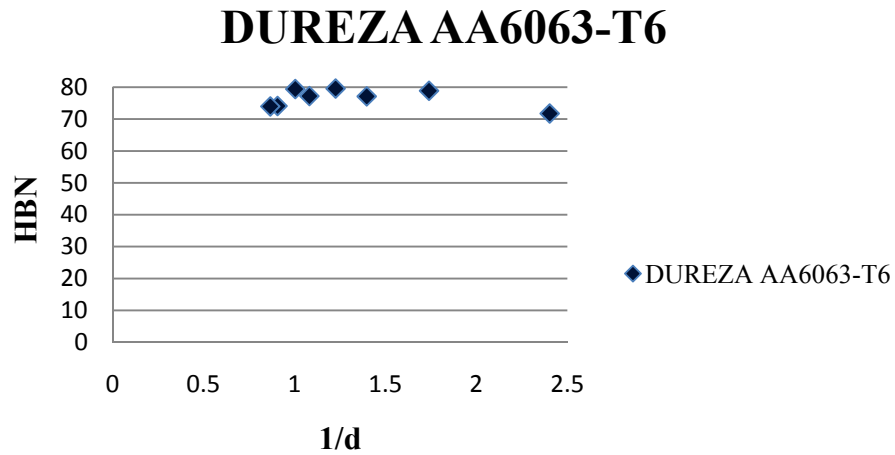


Figura IV. 9: Gráfica de la dureza AA 6063-T6 vs. el inverso del diámetro de la huella.

4.3. DUREZA DEL ALUMINIO 6063-T6 Recubierto

En la *Tabla IV.9* se muestran los valores experimentales de la dureza del sistema sustrato recubrimiento. Por otra parte en la *Figura IV.10* se muestra el comportamiento del conjunto, en función del RID (profundidad relativa de indentación).

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Tabla IV.9: Dureza del Aluminio 6063-T6 recubierto con NiP

Carga [Nw]	Dprom [mic]	Prof [mic]	Hc [GPa]	Hc [Kgf/mm2]	RID
25	9.021	11.63	5.55	565.1731161	0.25844
50	12.888	23.73	5.44	553.9714868	0.52733
100	18.26	47.63	5.42	551.9348269	1.05844
200	25.85	95.46	5.41	550.9164969	2.12133
300	31.799	144.45	5.36	545.8248473	3.21000
500	42.66	259.98	4.96	505.0916497	5.77733
1000	72.955	760.35	3.39	345.2138493	16.89667

Hc vs. RID

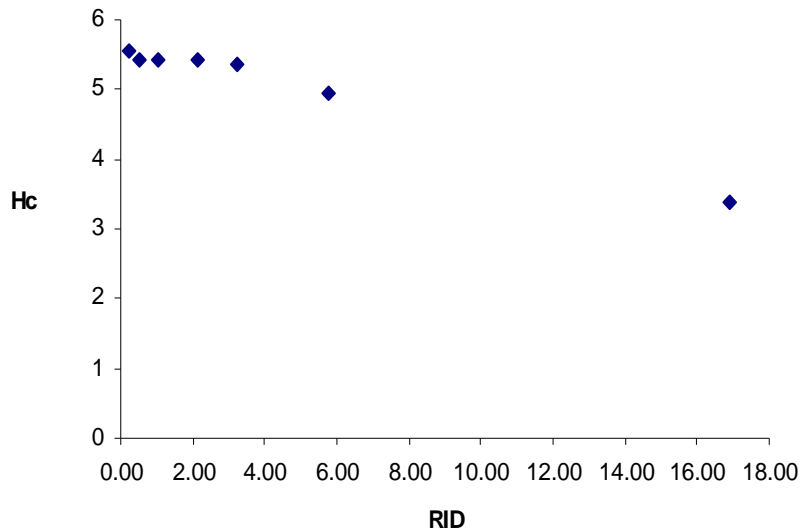


Figura IV. 10: Gráfica de la dureza compuesta vs. la profundidad relativa de indentación.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO
CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO
SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

En la *Figura IV.10* se puede observar como el valor de la dureza disminuye a medida que la profundidad relativa de indentación aumenta, esto debido a que en los primeros incrementos, (aproximadamente hasta 1/10 del espesor del recubrimiento) el recubrimiento es el que tiene mayor influencia sobre el valor de dureza. Al seguir incrementando la profundidad relativa de indentación, la dureza del conjunto se ve influenciada por la dureza del sustrato, disminuyendo así el valor de dureza compuesta.

4.4. DUREZA DEL RECUBRIMIENTO NiP

En la *Tabla IV.10* se muestran los valores obtenidos de la dureza del recubrimiento, haciendo uso del modelo de Lesage-Pertuz⁽⁹⁾.

Tabla IV. 7: Dureza del recubrimiento vs. RID

f	Hf [Gpa]	RID
1.02974	4.86	5.7773
0.9211	4.79	10.642
0.76708	4.70	16.8967

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

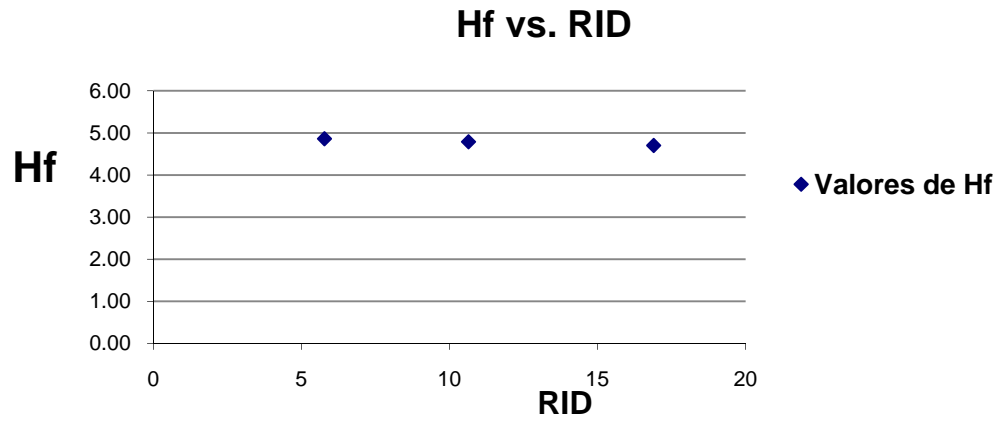


Figura IV. 11: Gráfica de la dureza del recubrimiento vs. RID

Tanto en la *Figura IV.11* y *Tabla IV.11* se pueden observar como el valor de la dureza tiene un comportamiento asintótico en los que tiene un valor promedio de 4,78 GPa., siendo esa la dureza del recubrimiento NiP.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

CONCLUSIONES

- Se determinó numéricamente la dureza Aluminio 6063-T6 con un valor de dureza Brinell con errores menores al 5 %.
- Haciendo uso del modelo Lessage-Pertúz se determinó la dureza del recubrimiento, obteniendo un valor de 4,86 GPa.
- Se determinó que las propiedades obtenidas a través de la metodología propuesta concuerdan de forma satisfactoria con las propiedades experimentales.
- El modelo de Hertz es válido para el análisis del comportamiento del Aluminio 6063-T6 en la zona elástica.
- Las curvas esfuerzo deformación calculadas a través del modelo de indentación hecho con el software ABAQUS/CAE, muestra una buena correlación con la curva esfuerzo-deformación de la Ley Potencial para modelos plásticos del Aluminio 6063-T6.
- Con la metodología propuesta se puede sustituir la prueba de indentación experimental, para la determinación de la dureza de los materiales.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

RECOMENDACIONES

- Realizar el estudio simulado de las propiedades mecánicas de un recubrimiento a través del ensayo de indentación Vickers, debido a que el modelo de Lessage-Pertúz fue construido para ese tipo de ensayo en específico.
- Aplicar otros modelos matemáticos a parte del modelo de Lessage-Pertúz, para la determinación de la dureza del recubrimiento.
- Cambiar el tipo de elemento usado en el sustrato y realizar una comparación de los valores obtenidos.
- Abrir asignaturas relacionada con el Método de Elementos Finitos, para implementar conocimientos en el estudiantado.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

BIBLIOGRAFIA

1. ABAQUS/CAE 6.7.1 version, manual.
2. Alejandro Piñeiro (2005). Estudio del Comportamiento a la Fatiga al Aire y Fatiga Corrosión de una Aleación de Aluminio 60603-T6 Recubierta con un Depósito Autocatalítico de NiP. Trabajo De Maestría, universidad Central de Venezuela.
3. ASM Handbook (1985). Heat Treating. Vol. 4, Ninth edition.
4. D. Montiel (2001). Estudio de la precipitación en una aleación comercial de aluminio 6063 mediante medidas de resistividad eléctrica. Universidad Central de Venezuela.
5. D. Pino (1995). Estudio de la cinética de precipitación del Mg_2Si en la aleación 6063. Universidad de Oriente.
6. D. Tabor (1951). The Hardness of Metals, Clarendon Press, Oxford, United Kingdom.
7. E.T. Moreno, Y.Y. Santana, A.C. Castro, E.S. Puchi-Cabrera, M.H. Staia. (2007) Evaluación de la capacidad de soporte de carga de recubrimientos duros depositados sobre la aleación de aluminio 7075-T6. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Metalurgia.
8. F. Daroqui (1986). Aleación 6063. Proyecto especial Procesos Metalúrgicos OEACORDIPLAN-UCV-IUPEG.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

9. J. Lessage, A. Pertuz, E.S. Puchi-Cabrera, D. Chicot. (2007). A model to determine the surface hardness of thin films from standard micro-indentation tests. www.sciencedirect.com.
10. Kang, Yao, Barbero. (2002). Post-yielding Stress-Strain Determination Using Spherical Indentation. ww.citeulike.org/article/474297.
11. K.L. Johnson. (1985). Contact mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
12. L. F. Mondolfo (1976) Aluminium Alloys: Estructure and Properties. Primera Edición. Butter Worths, London.
13. Konda Bharath. (2005). Methodology to Determine Post Yield Material Mechanical Properties from Spherical Indentation. Trabajo de Maestría, College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University.
14. M. Mata, M. Anglada y J. Alcalá. (2002). Ecuaciones de Dureza para la Caracterización de Metales Mediante Indentación Puntiaguda. www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/105_MATA.PDF
15. Maylett Y. Uzcátegui Flores (2006). ABAQUS, Programa de Elementos Finitos. Disponible Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ALUMINIO 6063 CON RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO CROMO Y SUPERALEACIÓN BASE NÍQUEL, UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

16. M. Mikaty, M. A. Padron, L. Figuera (2005). Instructivo para la presentación de Tesis de Pregrado, Postgrado, Doctorados y Trabajos de Ascenso. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Comisión de Bibliotecas.
17. Riedel, Wolfgang (1991). Electroless Niquel Plating. ASM International Metals Park, Ohio.
18. www.alu-info.dk
19. Zienkiewicz O., Taylor R. (2000). The Finite Element Method. Vol. 1, Fifth Edition.