

Simulación del ensayo de dureza Brinell para la aleación de aluminio 2024-t4 empleando el método de elementos finitos

Simulation of the hardness test Brinell for the alloy of aluminium 2024-t4 using the method of finite elements

Daniel Murillo¹, Kimberly Ávila², Carlos A. Narvárez³

1,2. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás. Carrera 9 No 51-11, Bogotá-Colombia. 2050515@usantotomas.edu.co.
3. Centro de Investigación y Desarrollo de la División de Ingenierías CIDIUSTA. Universidad Santo Tomás.

Recibido 15/10/09, Aceptado 3/12/09,

RESUMEN

El aluminio es uno de los elementos más abundantes en la tierra y sus aleaciones son frecuentemente utilizadas como materiales de ingeniería por su ductilidad, conformabilidad y baja densidad, entre otras propiedades. La aleación del sistema Aluminio-Cobre 2024 es una de las más empleadas por las industrias automotriz y aeronáutica para la fabricación de piezas por conformado plástico ya que la reducción de peso es un requerimiento primordial de diseño. El desarrollo de modelos computacionales para la predicción de fallas por fatiga ante cargas cíclicas en los componentes fabricados con la aleación 2024-T4 requiere la estimación de la curva de deformación-vida a partir de ensayos mecánicos que involucren las propiedades plásticas del material, entre ellos los de dureza.

El objetivo de esta investigación es simular computacionalmente el ensayo de dureza Brinell para la aleación 2024-T4, empleando un modelo plástico no lineal de endurecimiento isotrópico, el cual es solucionado mediante el método de los elementos finitos. Se demostró que el modelo plástico no lineal de endurecimiento isotrópico simula con suficiente exactitud la deformación plástica producida por la penetración del indentador esférico en la superficie del material.

Palabras clave: Aleación de aluminio 2024-T4, Dureza Brinell, Método de los elementos finitos, Plasticidad.

ABSTRACT

Aluminium is one of the most abundant materials in the earth, and its alloys are frequently used as engineering materials because their ductility, formability and low density, among other properties. The 2024 Aluminium-Copper Alloy is commonly used by the automotive and aerospace industries for plastic forming manufacturing processes, searching for a necessary weight reduction in the design. The development of computational models for predicting fatigue failures due to cyclic loading in aluminium 2024-T4 parts, requires the determination of the strain-life curve from mechanical tests involving plastic properties, as the Brinell hardness test.

The purpose of this paper is to simulate the plastic behaviour of the 2024-T4 alloy due to a Brinell indentation test, using a non linear isotropic hardening model that is solved with the finite element method. It is showed that the isotropic hardening model simulates with sufficient accuracy the plastic strain produced by the spherical indentor on the material surface.

Key words: Aluminium alloy 2024-T4, Brinell hardness, Finite elements method, Plasticity.

NOMENCLATURA

d	Diámetro de la huella [mm]	F	Profundidad de la huella [mm]
D	Diámetro del indentador [mm]	HB	Número de dureza Brinell [kg-f/mm ²]
		P	Carga aplicada[kg-f]

Introducción

La dureza de un material se define como la resistencia que éste presenta a la penetración. Generalmente la dureza está relacionada con la resistencia al desgaste, siendo importante en distintas aplicaciones de ingeniería. Para medir la dureza de un material se emplean diferentes ensayos como Rockwell, Vickers, Knoop, Shore, Rosiwal, Rockwell superficial y Brinell; este último fue propuesto por el ingeniero sueco Johan August Brinell en el año 1900 [1] siendo uno de los métodos más antiguos para medir dureza; todos los métodos mencionados anteriormente se diferencian en el tipo de indentador empleado, la carga de indentación y los materiales a los que pueden ser aplicados [2].

El ensayo Brinell consiste básicamente en la aplicación de una fuerza conocida mediante un indentador esférico con un diámetro determinado durante un periodo de tiempo de entre 30 y 60 segundos sobre una probeta del material a analizar; ésta presión deja una marca o huella con un diámetro y una profundidad cuantificables y con los que es posible calcular la dureza en unidades HBN (Hardness Brinell Number) utilizando la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \left[\frac{Kg - f}{mm^2} \right] \quad (1)$$

Donde P es la carga aplicada[kg-f], D el diámetro del indentador [mm] y d el diámetro de la huella. Las unidades del número Brinell obtenido son [kg-f/mm²].

En la actualidad, los diseños de ingeniería en industrias como la aeronáutica deben realizarse con amplia certeza sobre las propiedades del material empleado para su manufactura. Los ensayos de dureza permiten comprobar la relación esfuerzo deformación de un material determinado como se presenta en trabajos como los de M. Beghini et Al [3]. En el presente trabajo se pretende tomar datos experimentales de un ensayo Brinell y compararlos con los resultados computacionales del método de los Elementos Finitos para modelar ensayos por indentación que se se emplea desde cerca del año 1990 [4] y desde esa época a incrementado su uso para determinar la exactitud del modelo de plasticidad a condiciones reales partiendo de los

conceptos presentados en trabajos como los de Pane I. y Blank E [5] quienes exponen la relación entre las curvas esfuerzo- deformación con las curvas de dureza de indentación frente a cargas monotónicas, Kucharski S y Mróz Z [6] quienes presentan un nuevo modelo por las características del radio de límite de contacto y M. Mata et Al [7] quienes presentan un modelo de indentación basado en la analogía de expansión de la cavidad esférica que se produjo partiendo del comportamiento plástico por experimentación con indentaciones cónicas y piramidales.

Metodología

Presentación del problema

Para el análisis computacional del comportamiento a fatiga de los materiales es necesario tener la curva de relación esfuerzo-deformación que se da por las condiciones de trabajo y las propiedades de cada material como por la relación de estas con la dureza; por lo que se requiere la caracterización del material experimentalmente pero esto generara costos elevados ya que se hace necesario realizar pruebas para cada condición, por lo que se acude a paquetes computacionales con los que se puedan generalizar las condiciones con un bajo porcentaje de error y en los que se relacionen características de ensayos de dureza y condiciones de esfuerzos.

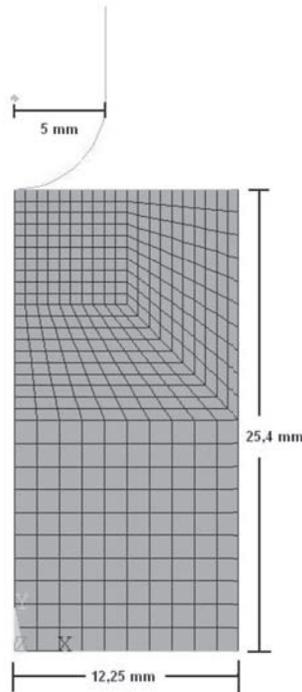
Selección de geometría

El modelo geométrico consiste en una probeta cilíndrica de diámetro de 25.4 mm (1 in) y altura 25.4 mm (1 in), la cual se encuentra soportada en la parte inferior por una superficie plana y es penetrada por un indentador esférico de 10 mm de diámetro, de acuerdo a las especificaciones ASTM (ASTM E 10) [1]. Dado que se emplean condiciones de axisimetría, se realiza un modelo bidimensional como se ilustra en la figura 1.

Características del material

Las aleaciones de aluminio se encuentran clasificadas por series según sea el concentración de los elementos aleantes; en la industria aeronáutica son empleadas las aleaciones de aluminio tratables térmicamente por su baja densidad y su buena resistencia mecánica, estas aleaciones son

Figura 1. Dimensiones y enmallado de la probeta y del indentador.



Fuente: Autor.

las pertenecientes a las series 2XXX y 7XXX. La aleación de aluminio 2024-T4 tiene un alto contenido de Silicio (0,5), Hierro (0,5), y Cobre (3,8-4,9)¹ [8], es tratada por solución y envejecida naturalmente [9], tiene una alta resistencia a la fatiga y una baja densidad; es utilizada frecuentemente en partes constitutivas de aeronaves como el mástil del rotor de un Helicóptero Bell UH-1H [10], fuselajes de aeronaves, pistones y ruedas para camión. Las propiedades mecánicas se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades Mecánicas del material

Propiedad	Valor	Unidad
Esfuerzo último de Tensión	470	MPa
Límite Elástico	325	MPa
Esfuerzo de cizallamiento	285	MPa
Resistencia a la Fatiga	140	MPa
Módulo de Young	73	GPa
Relación de Poisson	0.33	

Fuente: Referencia [3].

¹ Valores dados en porcentaje de masa.

Tomando como referencia valores determinados para ensayos de dureza Brinell [1] presentados en la tabla 2, se calcula el diámetro y profundidad de la huella; adicionalmente se presenta la curva esfuerzo deformación para el material seleccionado, figura 2, los datos empleados se presentan en la tabla 3.

Tabla 2. Resultados experimentales de un ensayo Brinell

HB [kgf/mm ²]	120
P [kgf]	500
D [mm]	10

Fuente: Autor

Tabla 3. Datos curvas esfuerzo – deformación del Aluminio 2024-T4.

DEFORMACIÓN [mm/mm]	ESFUERZO [kgf/mm ²]
0.0025013	14.203011
0.00498754	14.5979639
0.00895974	15.2932855
0.01291623	15.8657101
0.01685712	16.4421765
0.01980263	17.0060122
0.02858746	17.8319103
0.03633193	18.54686
0.04018179	18.8287779
0.04401689	19.059516
0.05164323	19.5512302
0.5543471	19.6789016
0.05826891	19.8365079

Fuente: [11]

Tomando la ecuación (1) y despejando el diámetro de la huella d , se tiene:

$$d = \frac{2 * \sqrt{D^2 * HB * \pi * P * \sqrt{P}}}{D * HB * \pi} \quad (2)$$

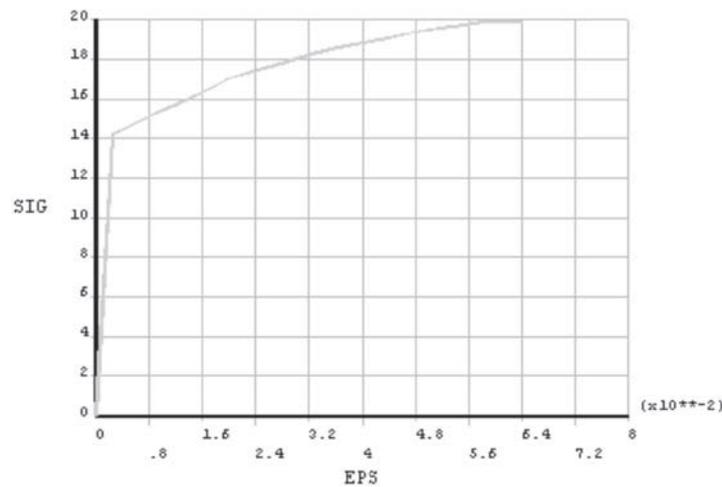
utilizando los valores experimentales en la ecuación (2):

$$d = \frac{2 * \sqrt{10^2 * 120 * \pi * 500 * \sqrt{500}}}{10 * 120 * \pi}$$

$$d = 2.287 \text{ mm}$$

Con el diámetro de la huella es posible calcular la profundidad f de la misma, con unidades en milímetros, mediante la siguiente expresión:

Figura 2. Gráfica esfuerzo deformación para Aluminio 2024-T4. En la horizontal se presenta la deformación y en la vertical los valores de esfuerzo.



Fuente: Autor

$$f = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (3)$$

Reemplazando los valores en la Ec. 3 se obtiene que:

$$f = \frac{1}{2} \left(10 - \sqrt{10^2 - 2.287^2} \right)$$

$$f = 0.132 \text{ mm}$$

Método de elementos finitos

El desarrollo computacional para el análisis estructural se llevó a cabo en ANSYS utilizando el elemento Plane 82 (Solid / Quad 8 node 82) con comportamiento axisimétrico para material lineal-elástico-isotrópico.

Para el enmallado se definieron cuatro áreas cada una con 100 elementos, para un total de 400 elementos en la probeta, y 33 adicionales en el indentador. Para la región en la que se presenta la deformación se procuró obtener elementos regulares y de tamaño relativamente pequeño. Para la solución el indentador y la base fueron elegidos como pares de contacto rígido, debido a que el primero aplica la presión sobre la muestra, y el segundo la soporta; adicionalmente se definieron las líneas horizontales de la probeta como superficies de contacto, las superiores con el indentador y la inferior con la base con un coeficiente de fricción de 0.47. Para la solución no lineal se definió un número de 100 sub pasos, con 1000 como máximo y 10 como mínimo.

Presentación y análisis de resultados

La solución se realiza utilizando las restricciones colocadas para cada uno de los pasos de carga. Para la restricción

en Y del indentador se crearon varios pasos de carga basado en la penetración sobre la probeta de 0.0264 mm para un total de 5 divisiones llegando a los 0.132 mm, el cual es la profundidad total de la huella.

Tabla 4. Desplazamientos en Y según el paso de carga.

Número de Paso de Carga	Desplazamiento en Y [mm]
1	-0.0264
2	-0.0528
3	-0.0792
4	-0.1056
5	-0.132

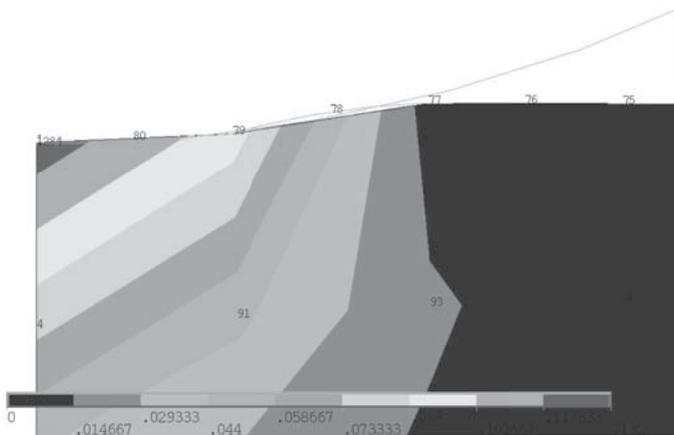
Fuente: Autor

Las figuras 3 y 4 presentan los desplazamientos nodales en donde se observa la penetración total del indentador.

De los resultados obtenidos, y que se pueden observar en la Figura 3 y 4, el desplazamiento de la superficie en el sentido -Y o vertical hacia abajo, se presenta con mayor magnitud hasta el nodo N°77, por ello se tomó este nodo como el límite de la huella de indentación y sus coordenadas pueden ser observadas en la Tabla 5, de donde es posible calcular el diámetro de la huella hallada numéricamente (Tabla 7). También se referencian las coordenadas y los desplazamientos de los nodos N°1 y N°1284, los cuales se encuentran en el punto de mayor penetración.

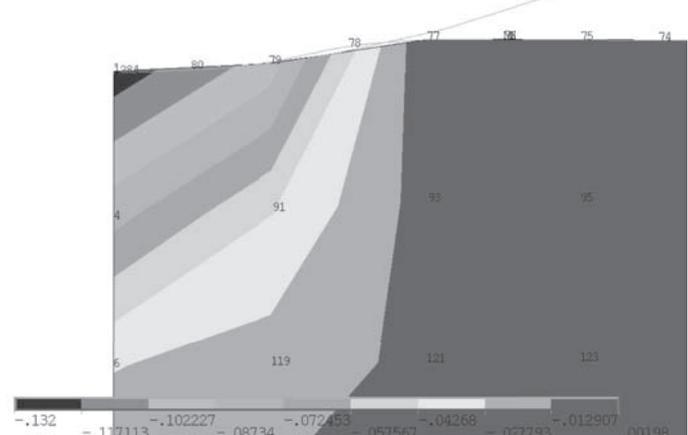
Fue posible también observar el fenómeno descrito por una variedad de autores como S. Biwa et. Al [12] y M.R Rosenberger et Al [2], en el cual se presenta una "cintura"

Figura 3. Desplazamientos Nodales.



Fuente: Autor.

Figura 4. Desplazamientos Nodales en Y



Fuente: Autor.

después del borde del área de indentación, y en donde hay un desplazamiento positivo de los nodos próximos a la huella en el sentido de Y, como en el caso del nodo N°76.

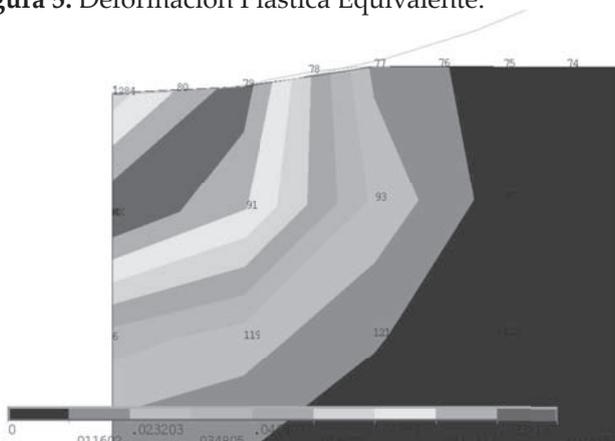
La distribución de la deformación plástica equivalente concuerda con estudios anteriores de otros autores, como el de I. Pane et Al [5], en el cual se observa que la máxima deformación plástica equivalente se encuentra bajo la zona de penetración, y se distribuye con la misma geometría que el indentador; un comportamiento similar al presentado en la Figura 5.

Tabla 5. Desplazamiento nodal del nodo N° 77 en X.

Nodo	Desplazamiento en X (mm)	Posición Inicial (X)	Posición Final en (X)
77	0.85662E-2	1.225	1.2258662

Fuente: Autor.

Figura 5. Deformación Plástica Equivalente.



Fuente: Autor.

Tabla 6. Desplazamiento nodal de los nodos N°1 y N°1284 en Y.

Nodo	Desplazamiento en Y (mm)	Posición Inicial (Y)	Posición Final en (Y)
1	-0.12574	25.4	25.27426
1284	-0.132	25.4	25.268

Fuente: Autor.

Dado que los datos experimentales en los cuales se basó el análisis de elementos finitos fueron el diámetro y la profundidad de la huella, se compararán éstos con los desplazamientos nodales. Para la comparación del desplazamiento en X del nodo N° 77, tabla 5, con el diámetro de la huella se toma en cuenta que la posición en X de este nodo corresponde al radio de la huella, por lo tanto el diámetro de la huella hallado numéricamente corresponde al doble de la distancia al eje Y.

Tabla 7. Comparación de los diámetros de huella hallados analítica y numéricamente.

d [(Posición del nodo N°77)*2]	d Hallado con los Datos Experimentales
d = 2.4517324 mm	d = 2.2879 mm
Error=	6.682%

Fuente: Autor.

La comparación de los datos de la tabla 7 demuestran que la simulación de la deformación plástica del ensayo Brinell tiene una buena exactitud, inclusive utilizando un emallado poco fino, se tiene un error de 6.682% valor que no muy significativo.

Tabla 8. Comparación de la profundidad de huella hallada analítica y numéricamente.

f [Huella analítica]	-0.132 mm
Posición Indentador [Posición nodo N° 1284]	-0.132 mm
f [Huella o posición nodo N°1]	-0.12574mm
Error=	4.98%

Fuente: Autor.

De la misma manera en la que se comparan los diámetros de huella, se analiza la profundidad y el error de cálculo como se presentan en la tabla 8. En este caso se observa que la posición del indentador es exactamente igual al valor de la huella hallada analíticamente, mostrando así que la simulación de la penetración del indentador fue correcta y el porcentaje de error entregado no marca gran diferencia. Sin embargo la posición del nodo N°1, tabla 6 y figura 4, debería ser igual a la del indentador, produciendo un error de cálculo del 4.98%, esto debido a el tamaño de los elementos sometidos a contacto con el indentador no son lo suficientemente pequeños y por ello no pueden simular con exactitud la deformación del material.

Al tomar los resultados numéricos de las reacciones en cada uno de los nodos y evaluarlas en Y, es posible comparar la fuerza total de reacción sobre el eje Y con la fuerza teórica utilizada para los cálculos de profundidad y diámetro de la huella, Tabla 9.

En los resultados de la tabla 9 se aprecia que la fuerza de reacción se asemeja mucho a la fuerza utilizada para el cálculo del diámetro y la profundidad de la huella, con una diferencia del 5.48%.

Figura 6. Posiciones de los nodos N°1 y N°1284.



Fuente: Autor.

Tabla 9. Comparación de la fuerza real aplicada y la fuerza de reacción hallada.

Fuerza de Reacción Total en Y (kg-f)	Fuerza Aplicada Real (kg-f)
529.018	500
Error=	5.48%

Fuente: Autor.

Conclusiones y recomendaciones

Después de analizar los resultados obtenidos se puede afirmar que es posible simular eventos en los cuales se involucra la deformación plástica con una alta exactitud, sin embargo es necesario tener mucho cuidado con el modelado y mucho más con la construcción del enmallado, ya que los resultados dependen de los resultados obtenidos por el método de elementos finitos. Por otro lado, es de vital importancia el proceso de colocación de cargas y de restricciones, al igual que el manejo de las propiedades y comportamiento del material. Adicionalmente cabe destacar la facilidad de modelado y de análisis al utilizar la axisimetría.

En este caso se analizó el ensayo tomando como base el valor de la profundidad de la huella y definiendo un desplazamiento en la dirección -Y del indentador. Otra opción posible en vez de realizar el análisis tomando en cuenta el desplazamiento, es utilizar el indentador como medio de aplicación de la carga sobre la probeta de aluminio con el fin de hallar el diámetro y la profundidad de la huella como se haría en un ensayo real.

Bibliografía

- [1] Groover M. Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, procesos y sistemas. Prentice Hall Hispanoamericana S.A, 1997, pp 57-61.
- [2] M.R. Rosenberger, E. Forlerer, Carlos E. Schvezov. Modelado de la microdureza de materiales compuestos. ANALES AFA La Plata, Vol 17, 2005, pp 222-227.
- [3] M. Beghini, L. Bertini, V. Fontanari. Evaluation of the stress-strain curve of metallic materials by spherical indentation. International Journal of Solids and Structures 43, 2006, pp 2441- 2459.
- [4] Jaroslav Mackerle. Finite element modelling and simulation of indentation testing: a bibliography. Engineering Computations, Vol. 21 No. 1, 2004, pp. 23-52.
- [5] Ivindra Pane, Eberhard Blank. Role of plasticity on indentation behavior: Relations between surface and sub-

surface responses. *International Journal of Solids and Structures* 43, 2006, pp 2014–2036.

[6] S. Kucharski, Z. Mróz. Identification of yield stress and plastic hardening parameters from a spherical indentation test. *International Journal of Mechanical Sciences* 49, 2007, pp 1238–1250.

[7] M. Mata, O. Casals, J. Alcala. The plastic zone size in indentation experiments: The analogy with the expansion of a spherical cavity. *International Journal of Solids and Structures* 43, 2006, pp 5994–6013.

[8] ASM Handbook, Volume 2. Properties and selection: Non ferrous alloys and special- purpose materials. ASM International.

[9] Askeland D, Phulé P. Ciencia e ingeniería de los materiales. International Thompson Editores, S.A, 2004, pp 595.

[10] Análisis de de Fatiga en la Estructura del Helicóptero Bell UH-1H por medio del Software Afdrow. Trabajo de grado Universidad Austral de Chile.

[11] Tutorial educativo “Simulación de una probeta utilizando el software Ansys”.

[12] S. Biwa, B. Storakers. An analysis of fully plastic Brinell indentation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol 43, N°8, pp.1303-1333, 1995.