

Simulación de ensayo de dureza Brinell para Ti6Al4V empleando métodos numéricos Simulation of Brinell hardness testing for Ti6Al4V using numerical methods

A. González-Vázquez ^a, G. Rosendo-Bacilio ^a, J. Martínez-García ^a, T. de la Mora-Ramírez ^{a*}

^a Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Carretera Toluca –Atlaconulco KM. 44.8 Ejido de San Juan y San Agustín, 50700 Jocotitlán, México.

Resumen

Los biomateriales para el reemplazo de articulaciones deterioradas en el cuerpo humano han llevado al uso de materiales con propiedades mecánicas adecuadas para su comportamiento a largo plazo. La aleación de Ti6Al4V es la más utilizada en la industria ortopédica debido a su baja densidad, módulo elástico y biocompatibilidad. Se realizaron pruebas experimentales de ensayos de dureza Brinell (HRB) al Ti6Al4V, obteniendo diámetros y áreas de la huella dejada por el indentador de bola mediante Microscopía Electrónica de Barridos (MEB). Se usaron ecuaciones para determinar la profundidad de huella y realizar la comparación con la simulación numérica. Por lo que el objetivo de la investigación es la comprobación del ensayo de dureza Brinell para la aleación de Titanio mediante simulación numérica. Demostrando que el modelo utilizado para la simulación y los experimentos realizados con el durómetro para medir la prueba Brinell tienen suficiente exactitud en la deformación plástica producida por la penetración del indentador esférico en la superficie del material.

Palabras Clave: Simulación numérica, dureza Brinell, Ti6Al4V.

Abstract

Biomaterials for the replacement of deteriorated joints in the human body have led to the use of materials with mechanical properties suitable for long-term performance. Ti6Al4V alloy is the most widely used alloy in the orthopedic industry due to its low density, elastic modulus and biocompatibility. Experimental Brinell hardness tests (BH) were performed on Ti6Al4V, obtaining diameters and areas of the footprint left by the ball indenter using Scanning Electron Microscopy (SEM). Equations were used to determine the indentation depth and to make the comparison with the numerical simulation. Therefore, the objective of the research is the verification of the Brinell hardness test for Titanium alloy by means of numerical simulation. Demonstrating that the model used for the simulation and the experiments performed with the hardness tester to measure the Brinell test have sufficient accuracy in the plastic deformation produced by the penetration of the spherical indenter on the surface of the material.

Keywords: Numerical simulation, Brinell hardness, Ti6Al4V.

1. Introducción

En la actualidad el desarrollo de nuevos materiales para aplicaciones en el desarrollo de nuevas tecnologías implica el conocimiento de las propiedades mecánicas, químicas y físicas del material en estudio. Los ensayos de dureza Brinell satisfacen una necesidad vital en la industria metalmeccánica debido a que resultan económicos y fáciles de realizarse, además de que los resultados son inmediatos.

El análisis de elemento finito, también conocido como método de elemento finito (MEF). El MEF como herramienta computacional, tiene una posición firme e incuestionable en todos los aspectos de la ingeniería moderna. En la investigación, el método de los elementos finitos se utiliza con

mucha frecuencia para caracterizar propiedades mecánicas de materiales o estructuras durante la etapa de prediseño o desarrollo de nuevos materiales (Zak *et al.*, 2023).

La dureza se define como la propiedad del material a oponerse a ser deformado, rayado, erosionado o penetrado. También la dureza está relacionada con la resistencia al desgaste, propiedad importante para las prótesis. Existen diferentes escalas para medir la dureza de un material, la utilizada para el proyecto de investigación es el ensayo Brinell (Askeland *et al.*, 2022).

La aplicación de la simulación numérica se ha convertido en una herramienta alternativa de pruebas mecánicas como ensayos de tensión, flexión, compresión y dureza entre otros (Beatove *et al.*, 2014). El autor A.K. Batthacharya utilizó en el

*Autor para la correspondencia: tomas.delamora@tesjo.edu.mx

Correo electrónico: 07alexis.gv@gmail.com (Alexis González-Vázquez), gloriariosendo91@gmail.com (Gloria Rosendo-Basilio), jose.martinez@tesjo.edu.mx (José Martínez-García) y tomas.delamora@tesjo.edu.mx (Tomas de la Mora-Ramírez).

año 1988 simulación basada en el método de elementos finitos y comparó resultados experimentales demostrando que fue capaz de determinar la respuesta carga-profundidad de un ensayo de indentación sub-micrómetro. También se demuestra que la dureza y el módulo elástico del material pueden obtenerse a partir de las partes de carga y descarga de estos resultados simulados (Bhattacharya *et al.*, 1988). Xun Cai determinó que existía en las simulaciones de pruebas de dureza un problema de contacto y fricción, ya que influía en las caras del indentador contra la probeta (Xun, 1993). A. Wakeel comparó la dureza de una aleación de aluminio de manera experimental y simulación numérica mediante el software Abaqus (Wakeel *et al.*, 2018).

Por lo que el objetivo de la investigación es la comprobación del ensayo de dureza Brinell para la aleación de Titanio mediante simulación numérica. Demostrando que el modelo utilizado para la simulación y los experimentos realizados con el durómetro para medir la prueba Brinell tienen suficiente exactitud en la deformación plástica producida por la penetración del indentador esférico en la superficie del material.

2. Metodología

El material utilizado para realizar las pruebas experimentales es el Ti-6Al-4V, debido a que es uno de los más utilizados en la industria de la ortopedia para la fabricación de prótesis, sin embargo, esta posee una baja resistencia al desgaste y malas propiedades tribológicas debido a que muestra elevados coeficientes de fricción (Sempere de Udaeta, 2016). Sin embargo, es de las aleaciones más comerciales para uso biomédico debido a su módulo de elasticidad bajo que evita el efecto de blindaje y sus características mecánicas las cuales son: buena ductilidad, excelente resistencia a la corrosión y su característica principal es la biocompatibilidad con el cuerpo humano. Por ello su utilización en implantes para prótesis articulares (cadera, rodilla, hombro, etc.) y placa para fractura de huesos e implantes dentales entre otras cosas (Askeland *et al.*, 2022).

2.1. Ensayos de Dureza Brinell.

Se ensayaron 9 pruebas de dureza al material utilizando una bola de acero de 2.5 mm de diámetro. Se recortaron 5 probetas de la barra de aleación de titanio de un componente femoral de una prótesis de rodilla, con un disco de diamante, ver Figura 1.



Figura 1. Corte de probetas del Ti 6Al 4V.

Se utilizó un durómetro de la marca CMS metrology, ver Figura 2. Se aplicó una carga de 187.5 (kg-f), en un periodo de 14 segundos.



Figura 2. Durómetro utilizado

En base a la normatividad (ISO 6506-1:2014), se realizaron las pruebas de dureza Brinell para materiales no metálico (Zwick/Roell, 2013). Una vez realizada la prueba de dureza Brinell con las condiciones antes mencionadas se determinó el diámetro de la huella dejada por el indentador a través del software del MEB, ver Figura 3.

La Figura 3A y 3B muestra las medidas transversales de las circunferencias dejadas por la huella de la esfera del indentador dureza Brinell para las muestras probetas *M1* y *M2*, la figura 3C se obtuvo el área dejada por las marcas de la dureza en la Muestra *M3*.

De la ecuación (1) de dureza Brinell se obtuvo el valor sustituyendo las variables:

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2} \left(\frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}} \right) \quad (1)$$

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

Con los diámetros de huellas es posible calcular la profundidad h (mm) de la misma con la siguiente ecuación (2).

$$h = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (2)$$

Referencias bibliográficas indican que la dureza del Ti6Al4V está en el rango de 335 HRB a 380 HRB (Material Properties, 2023).

2.2 Desarrollo de simulación numérica.

Existen diversos softwares que permiten simular pruebas mecánicas por medio de elementos finitos. Sin embargo, se utilizó Abaqus ya que es un programa destinado para resolver problemas de ciencias e ingenierías. El programa puede resolver casi todo tipo de problemas, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales, además de contar con una amplia gama de elementos que se adaptan a las necesidades y geometrías de los experimentos realizados en laboratorio.

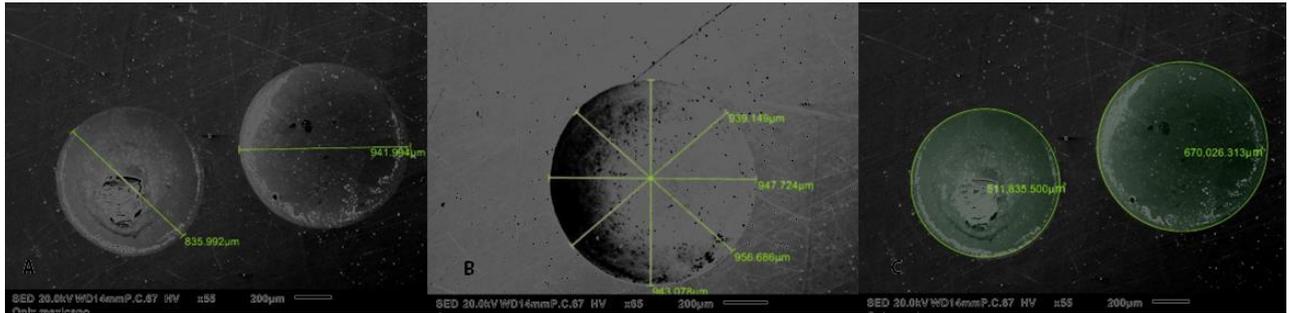


Figura 3. Diámetro de las huellas obtenidas por medio de Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) A y B mediante la medida del diámetro trasversal y C se obtuvo el área de la circunferencia dejada por la huella de indentación.

El modelo utilizado fue simétrico para utilizar condiciones bidimensionales como se muestra en la figura 4. El indentador fue modelado como asimétrico del tipo discreto rígido, lo que significa que el penetrador es más duro que el material de prueba, la esfera del indentador tiene un diámetro de 2.5 mm como lo indica la Norma ISO 6506, y la probeta mide 12 mm de ancho por 10 mm de alto. Las propiedades de la aleación de titanio utilizadas en el software de simulación numérica para la probeta fueron un módulo de Young de 105000 MPa, un coeficiente de Poisson de 0.342 y una densidad de 4.43 e-09 (Ton/mm³) (Planell *et al.*, 2018)

Se utilizó un elemento del tipo CAX4R. El elemento es C por continuo para esfuerzos y desplazamientos, AX axisimétricos, 4 Nodos de integración reducida y bilineal asimétrico para el modelo de la probeta con un tamaño de elemento de 0.2 mm, ver Figura 4.

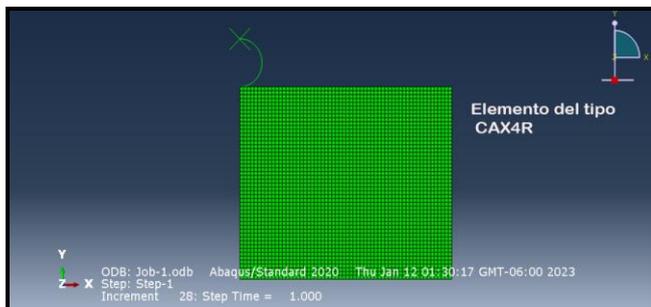


Figura 4. Elemento tipo CAX4R utilizado para la probeta.

Para las condiciones de carga se tomó en cuenta la fricción que ejerce el penetrador contra la probeta al momento de hacer la indentación como lo hizo el autor Daniel Murillo y colaboradores (Murillo *et al.*, 2009). El valor del coeficiente de fricción de la aleación de titanio utilizado en la simulación se obtuvo mediante pruebas de movimiento recíprocante bajo la condición de bola de acero y probeta plana de Aleación de Ti6Al4V, con condiciones de carga de 10 N, 20 N y 30 N dando un valor promedio de 0.5, ver Figura 5.

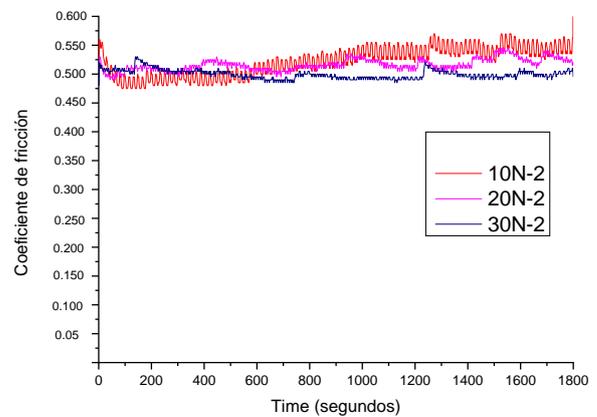


Figura 5. Gráfica del coeficiente de fricción entre una probeta plana de aleación de Titanio y bola de acero.

El valor promedio obtenido durante las pruebas en laboratorio de movimiento recíprocante es cercano al reportado en su investigación por Mamoun Fella quien utilizó los mismos materiales (Fella *et al.*, 2014).

En la Figura 6 se muestra la opción de la ventana en el software donde se colocó el valor del coeficiente de fricción obtenido durante las pruebas de movimiento recíprocante.

Al simular el comportamiento de la fricción, también se tomó en cuenta la formulación por penalización, la cual funciona para la mayoría de los problemas de aplicación de conformado de metales, con un deslizamiento elástico permitido.

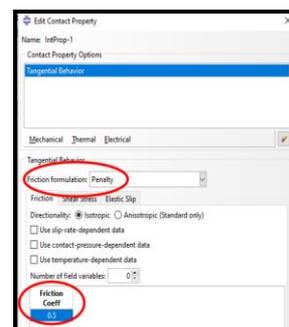


Figura 6. Ventana para colocar el valor del coeficiente de fricción a tomar en cuenta en el ensayo virtual.

Se le aplico una carga en dirección del eje “y” en sentido negativo de 187.5 (kg-f), en el punto de aplicación, ver Figura 7, así mismo se muestra la cara de fijación de la probeta.

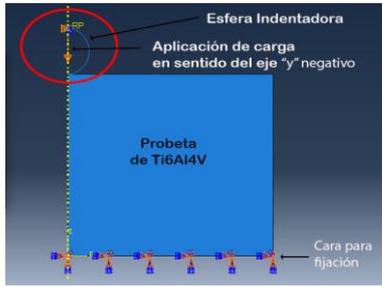


Figura 7. Punto de Aplicación de la carga utilizada durante la simulación y cara de fijación de la probeta.

3. Resultados.

Los resultados de las pruebas de dureza Brinell realizados a las probetas se muestran en la Tabla 1, las condiciones de la prueba se especificaron en la parte de metodología. Se realizó una comparación entre lo real y lo simulado. Obteniendo finalmente el porcentaje de error entre ellos.

Comparando los resultados obtenidos tanto en laboratorio, como en la simulación virtual contra los encontrados en la bibliografía, están por debajo del mínimo que es 335 HB. Esto no podría dar pauta para realizarle un análisis de composición química y ver el porcentaje de elementos de aleación y determinar el porqué del bajo valor de dureza, sin embargo no es el caso de estudio del proyecto.

Tabla 1. muestra las medidas obtenidas de diferentes formas mediante herramientas que contiene el software del MEB

No. de Probeta	Medidas de los diámetros. (mm)	Dureza Brinell (kg-f/mm ²).
Probeta M1	0.947724	256.47
Probeta M2	0.943.078	292.20
	0.835992	
Probeta M3	0.941994	307.44
	Área de las huellas de dureza (mm ²)	
	0.00051183	
	0.00067002	

3.1 Cálculo de profundidad.

Sustituyendo los valores en la ecuación (2).

$$h = \frac{1}{2} (2.5 - \sqrt{2.5^2 - 0.94^2})$$

$$h = 0.091725 \text{ mm}$$

3.2 Simulación numérica.

Los resultados de la simulación numérica muestran en el esfuerzo máxima de von Mises en el punto de contacto entre el penetrador y el plano de la probeta con un valor de 47748.68 MPa, ver Figura 8.

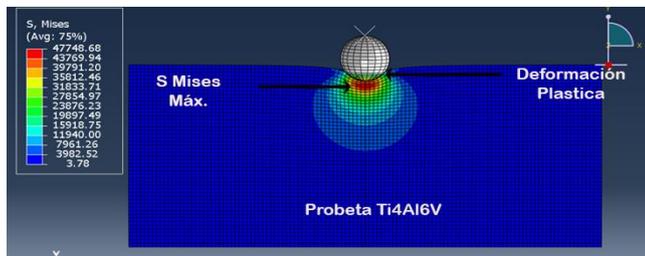


Figura 8. Esfuerzo máximo von Mises en MPa.

La Figura 9 muestra el valor de la profundidad h de la dureza Brinell simulada, obteniendo una medida de 9.093 e-2 mm.

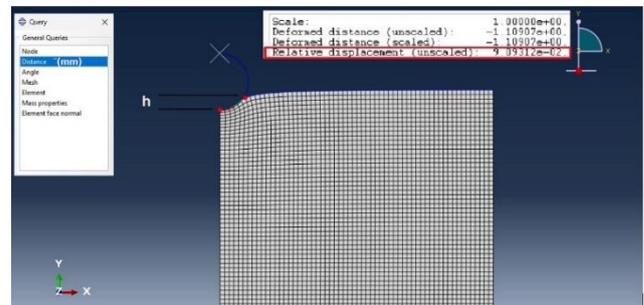


Figura 9. Valor de profundidad h en mm de la simulación de dureza Brinell.

La variable de presión de contacto (CPRESS), es una variable de salida del software de análisis de elemento finito, cuyo objetivo principal es analizar el contacto mecánico entre dos superficies, incluyen la presión de contacto debido a la fuerza normal, el esfuerzo de von Mises y el esfuerzo cortante por fricción. La Figura 10 muestra el resultado de la variable CPRESS, dando un valor de 73827.68 MPa.

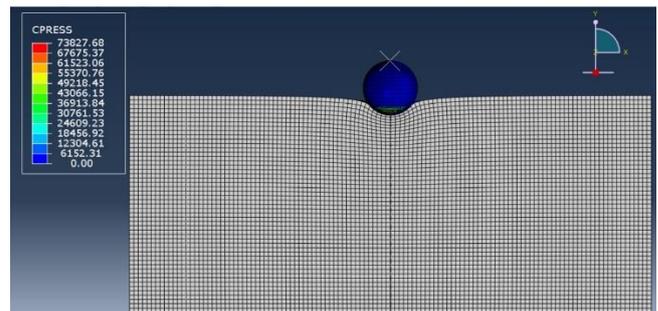


Figura 10. Valor de la variable CPRESS.

El radio obtenido de las pruebas virtuales, ver Figura 11, observando un valor a lo largo del eje X de $4.8362e-1$ mm. Por consiguiente, el valor del diámetro es de 0.9672 mm.

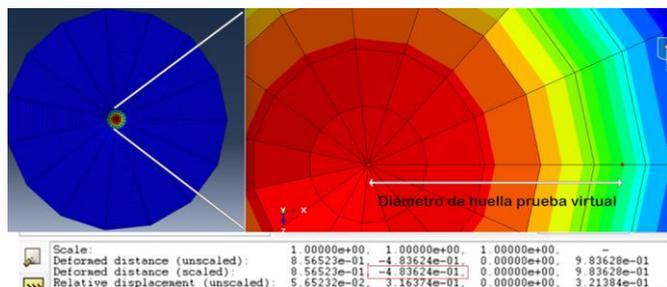


Figura 11. Valor del diámetro dejado por la prueba Brinell virtual.

Las variables que se tomaron en cuenta para determinar si la simulación del ensayo de dureza por método numérico es viable, fueron el diámetro y profundidad de huella. La Tabla 2 nos muestra la comparación entre dichas variables obtenidas de los ensayos en laboratorio y el virtual.

Tabla 2. Comparación de resultados entre lo simulado y las pruebas en laboratorio de los diámetros y profundidades

Ensayo de Dureza	Diámetro de huella (mm)	Profundidad (mm)
Laboratorio	0.9477	0.091725
Virtual	0.9672	0.09093
% de Error	2%	0.8 %

4. Conclusiones.

La comparación de los resultados de las variables de los diámetros de huella y profundidad entre las pruebas de laboratorio y las virtuales utilizando un software de métodos numéricos, se demostró que puede utilizarse como una herramienta alternativa para la caracterización de materiales y en específico para la simulación de pruebas de dureza Brinell.

Se observa que la medida de los diámetros obtenidos por MEB tienden a el valor de 0.94 con dos cifras significativas comparado con el valor de la simulación de 0.90 con un error porcentual del 4.25%.

El valor de la dureza Brinell obtenidos en laboratorio y virtualmente en comparación con los valores reportados en bibliografía está por debajo, de 335 HRB contra 307 HRB con un error porcentual de 8.22 %.

El valor de CPRESS de 73827.68 MPa viene implícito el valor del coeficiente de fricción entre la superficie de ambos materiales. Así mismo el valor nos indica que el a valore mayores de CPRESS el material en este caso la aleación de titanio tiende a tener un mayor porcentaje de desgaste.

La investigación se realizó para la aleación de titanio Ale en condiciones de carga y descarga. Sin embargo, la fuerza de respuesta en el indentador de flexión y el diámetro de indentación se evalúan en la condición de carga. Se ha utilizado la configuración para simular la indentación profunda de materiales elastoplásticos con endurecimiento por deformación utilizando un indentador esférico sin flexión. Como herramienta analítica, la simulación ayuda a reducir el coste y la duración de los estudios experimentales mediante cálculos seguros y rápidos. Como es habitual, concluimos que

la simulación numérica proporciona resultados menos precisos que los experimentales en poco tiempo, pero aun porcentaje de error aceptable. Esto implica que la herramienta de simulación sugerida es adecuada para resolver problemas de perfiles de dureza de un material conociendo sus principales propiedades mecánicas.

Agradecimientos

Agradecemos a la División de Ingeniería Industrial por las facilidades para la realización del proyecto y al Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán por el uso del equipo de laboratorio de pruebas mecánicas y el Microscopio Electrónico de Barrido, Así como el Dr. Tomas de la Mora Ramírez por su apoyo durante las pruebas, escrito del artículo y correcciones de éste.

Referencias

- Askeland R., Wright J., (2022). Ciencia e Ingeniería de Materiales. México: CENGAGE.
- Beatove L. (2014). La simulación numérica en problemas de ingeniería. El hombre y la Máquina(44), 5-6.
- Bhattacharya A. y Willian N. (1988). Finite element simulation of indentation experiments. International Journal of Solids and Structures, 24(9), 881-891.
- Fellah M., Labaiz M, Assala O. y Iost Alain. (2014). Tribological behavior of Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb Alloys for Total Hip Prosthesis. Advances in Tribology, 1-13.
- ISO 6506-1:2014, Metallic Materials, Brinell Hardness test.
- Material Properties. (2023). Obtenido de <https://material-properties.org/>
- Murillo D., Kimberly A., Narvaez C., (2009).. Prospectiva, 7(2), 75-81.
- Planell Estany J. A. y Gil F., (2018). Aplicaciones biomédicas del titanio y sus aleaciones. Biomecánica-Originales, 4(1), 34-42.
- Sempere de Udaeta C. (2016). Estudio de las características mecánicas de aleaciones de Ti conformadas mediante pulvimetalurgia. Universidad Carlos III, 2016, 70-105.
- Wakeel A. y Ali Nasir M. (2018). Experimental and Numerical Simulation of Brinell Hardness Test of Al7075 Alclad T6 in Abaqus. Technical Journal, 23(1), 59-63.
- Xun C. (1993). Effect of friction in indentation hardness testing" a finite element study. Material Science letters, 12, 301-302.
- Zak A. (2023). Análisis de elementos finitos de comportamientos mecánicos y propiedades de materiales y estructuras de ingeniería. Materials, 16, 25-40.
- Zwick/Roell. (30 de diciembre de 2013). Obtenido de Zwickroell: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-brinell-iso-6506/>