

Simulación numérica de casco mediante interacción de elementos 2D y 3D

Numerical simulation of helmet through interaction of 2D and 3D elements

Iván Lenín **Cruz Jaramillo**¹, Martín **Domínguez Sánchez**²
María del Carmen **López Hernández**³, Víctor Manuel **Ferreyra Coroy**⁴

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Tlaxiaco
Departamento de Ingeniería Industrial, MÉXICO

¹ORCID: 0000-0002-7832-1686 | breaking_182@hotmail.com

²ORCID: 0009-0005-4725-2664 | martin_industrial@test.edu.mx

³ORCID: 0009-0003-1133-2107 | carmen.lopez@test.edu.mx

⁴ORCID: 0009-0009-7934-4546 | victor_fc@test.edu.mx

Recibido 12/08/2024, aceptado 24/11/2024.

Resumen

Las lesiones en la cabeza causadas por accidentes de motocicleta son una de las principales causas de mortalidad grave, siendo el traumatismo craneoencefálico, las lesiones cerebrales, la lesión en la médula espinal, las lesiones faciales y en el cuello las más comunes. El casco es un componente esencial para proteger la cabeza durante un accidente. Un casco moderno generalmente cuenta con una carcasa exterior rígida fabricada en termoplástico o fibra de vidrio, diseñada para reducir la energía del impacto inicial. El modelado 3D en CAD permite diseñar la carcasa del casco, generando un discretizado controlado con elementos hexaédricos para 3D y cuadráticos para 2D, para realizar simulaciones numéricas bajo las condiciones de frontera especificadas en la norma PROY-NOM-206-SCFI/SSA2-2016. Cada simulación se ejecuta manteniendo las mismas condiciones de frontera y propiedades mecánicas tanto para el casco de ABS como para el bloque de acero A36, variando únicamente los elementos 2D y 3D en cada pieza (casco y bloque). Las simulaciones, realizadas durante 20 ms, permiten obtener deformaciones unitarias, esfuerzos y energía interna. Los resultados muestran que, al emplear un material rígido, el tiempo de cómputo es similar independientemente del tipo de elementos (2D o 3D). No obstante, al utilizar elementos 2D para materiales deformables, el tiempo de cómputo se reduce en un 88.4% en comparación con los elementos 3D. Las variaciones observadas se reflejan principalmente en la rigidez del material y la energía interna, debido a la mayor cantidad de elementos en el espesor del material cuando se utilizan elementos 3D. Sin embargo, el esfuerzo máximo y la deformación unitaria máxima son iguales, independientemente del tipo de elemento empleado. La interacción entre elementos 2D y 3D no genera variaciones significativas, excepto en el tiempo de iteración, que aumenta en 0.05 ms, debido a que los elementos 2D, al tener menos elementos en el espesor, requieren más tiempo para generar la interacción. Sin embargo, este incremento es insignificante.

Palabras clave: simulación numérica, método elementos finitos, dinámica estructural, elementos 3D, elementos 2D.

Abstract

Head injuries resulting from motorcycle accidents are a leading cause of severe mortality, with the most common injuries being traumatic brain injury, brain lesions, spinal cord injuries, facial injuries, and neck injuries. The helmet is a critical component for protecting the head during a motorcycle accident. A modern helmet typically features a rigid outer shell made from thermoplastic or fiberglass, designed to reduce the initial impact energy. 3D CAD modeling allows for the design of the helmet shell, creating a controlled discretization with hexahedral elements for 3D and quadratic elements for 2D to perform numerical simulations under the boundary conditions specified by the PROY-NOM-206-SCFI/SSA2-2016 standard. Each simulation is conducted with the same boundary conditions and mechanical properties for both the ABS helmet and the A36 steel block, with only the 2D and 3D elements of each piece (helmet and block) varying. The simulations, performed over 20 ms, provide unit deformations, stresses, and internal energy. The results show that, when using a rigid material, the computation time is similar regardless of the element type (2D or 3D). However, when 2D elements are used for deformable materials, the computation time is reduced by 88.4% compared to 3D elements. The observed variations mainly reflect differences in material rigidity and internal energy, due to the higher number of elements in the material thickness when using 3D elements. Nevertheless, the maximum stress and maximum unit deformation are the same, regardless of the element type used. The interaction between 2D and 3D elements does not result in significant variations, except in the iteration time, which increases by 0.05 ms. This is due to 2D elements, having fewer elements in the material thickness, requiring more time to generate interaction. However, this increase is insignificant.

Index terms: numerical simulation, finite element method, structural dynamics, 3D elements, 2D elements.

I. INTRODUCCIÓN

El casco de protección ha sido un elemento esencial para salvaguardar la integridad física de los motociclistas, evolucionando a lo largo de la historia para adaptarse a diferentes tipos de impactos. La necesidad de desarrollar cascos específicamente para motociclistas surgió poco después de la popularización de la motocicleta a inicios del siglo XX. Marcas como Triumph en Inglaterra y Harley-Davidson en Estados Unidos lideraron la innovación en respuesta a los requerimientos de seguridad de este nuevo medio de transporte, que ofrecía una alternativa más económica al automóvil [1].

Conducir una motocicleta implica un riesgo considerable de accidentes fatales, especialmente entre conductores inexpertos [2]. Las lesiones en la cabeza resultantes de accidentes de motocicleta son una causa significativa de morbilidad y mortalidad [3], destacándose entre las más comunes el traumatismo craneoencefálico, lesiones cerebrales, daños en la médula espinal, lesiones faciales y cervicales [4].

A lo largo del tiempo, la evolución de los cascos ha estado vinculada al desarrollo de nuevos materiales y procesos de fabricación, los cuales han permitido avances significativos en la protección ante impactos [5]. Actualmente, los motociclistas disponen principalmente de tres tipos de cascos: integral, abierto y de media cobertura, siendo este último el que ofrece una menor protección ante lesiones craneales. Los cascos modernos están diseñados con una carcasa externa rígida, fabricada generalmente en termoplástico o fibra de vidrio, con el objetivo de reducir la energía del impacto inicial [6].

Los componentes clave de un casco incluyen el revestimiento de espuma y la carcasa. La espuma tiene la función de absorber la mayor parte de la energía generada por el impacto, mientras que la carcasa actúa como barrera protectora, evitando la penetración de objetos extraños y distribuyendo la fuerza del impacto sobre una superficie más amplia, lo que aumenta la capacidad de absorción de energía del revestimiento [7].

En México, el uso de motocicletas ha experimentado un crecimiento exponencial, pasando de un millón ochenta mil unidades en 2008 a más de cuatro millones en 2018. Este aumento ha sido impulsado en parte por el auge del autoempleo en actividades de distribución de alimentos, entrega de paquetes y compras en línea, fomentado por aplicaciones móviles como Uber, Beat, DiDi y Cabify [8].

La importancia del casco en la protección de los motociclistas es innegable. En este estudio, se utiliza Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) como material para la fabricación de la carcasa de un casco, con el fin de evaluar su comportamiento frente a impactos mediante análisis comparativos utilizando elementos 2D y 3D. Estos análisis se comparan con los valores obtenidos previamente en el trabajo de P.K. Pinnoji et al. [9], explorando las variaciones y la interacción de los elementos 2D y 3D, bajo las mismas condiciones de impacto.

II. METODOLOGÍA

El presente estudio se implementa el diseño de un casco de protección en talla mediana de 7.5 pulgadas (equivalente a talla 60 en el sistema europeo) [10]. El modelado de la carcasa se llevó a cabo utilizando un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés). A través de las herramientas de modelado de superficies, se realizó una extrusión a partir del croquis del casco. Las tres secciones principales del casco (mandíbula, parte media y parte superior) fueron unidas mediante la operación de cosido en el programa SolidWorks (véase Fig. 1).

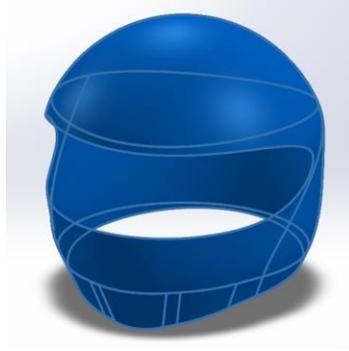


Fig.1. Modelado de carcasa de casco.

Posteriormente, se aplicó un espesor de 4 mm al modelo y se exportó en formato .iges al software HyperMesh 14.0, donde se llevó a cabo el proceso de discretización, obteniendo un modelo tipo shell (sin espesor) compuesto por elementos 2D (véase Fig. 2). La discretización 2D se utilizó para generar un mapeado que permitió la creación de elementos 3D. Los modelos 2D y 3D fueron posteriormente exportados al software LS-DYNA, donde se configuraron los escenarios para los análisis de impacto.

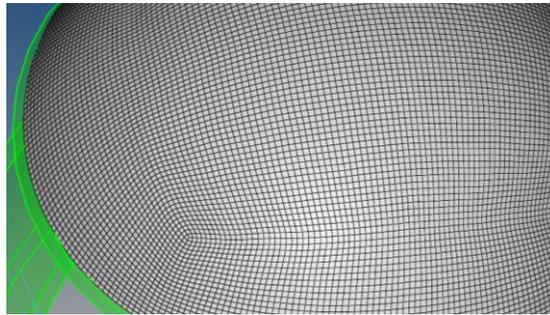


Fig. 2. Proceso de discretizado 2D en HyperMesh.

Las condiciones de frontera se establecieron de acuerdo con la norma PROY-NOM-206-SCFI/SSA2-2016. Para los ensayos de impacto, se seleccionó un bloque plano con un diámetro de 127 mm y un espesor de 25 mm, el cual fue modelado en LS-DYNA como un cilindro sólido. La discretización del bloque se realizó utilizando 72 elementos a lo largo del diámetro y 10 elementos en el espesor (véase Fig. 3).

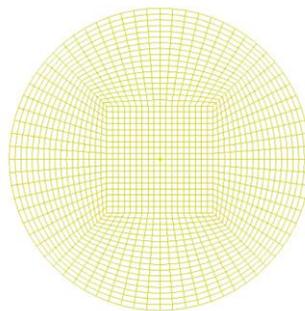


Fig.3. Discretizado de bloque impactador plano.

4

Para el análisis, se asignó al bloque de impacto el material acero A36, cuyas propiedades mecánicas son: densidad de 7.85×10^{-6} kg/mm³, módulo de Young de 200 GPa, límite elástico 0.25 GPa y una relación de Poisson 0.32 [11]. En el caso del casco, se empleó Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) como material, con las siguientes propiedades mecánicas: densidad de 1.2×10^{-3} g/mm³, módulo de Young de 2 GPa, límite elástico 34.3 MPa y una relación de Poisson 0.37 [12].

Las condiciones de frontera se establecieron posicionando el casco a una distancia inicial de 0.1 mm respecto al bloque, con una velocidad de impacto de 7.5 mm/ms. Una vez definidas las propiedades de los materiales, la velocidad del bloque y la gravedad se procedió a montar los escenarios de impacto. El bloque fue restringido en su parte inferior para mantenerlo fijo durante la colisión con el casco.

El análisis se replicó en cuatro configuraciones distintas para evaluar la interacción entre los modelos 2D y 3D: casco 3D contra bloque 3D, casco 2D contra bloque 3D, casco 3D contra bloque 2D, y casco 2D contra bloque 2D (véase Fig. 4).

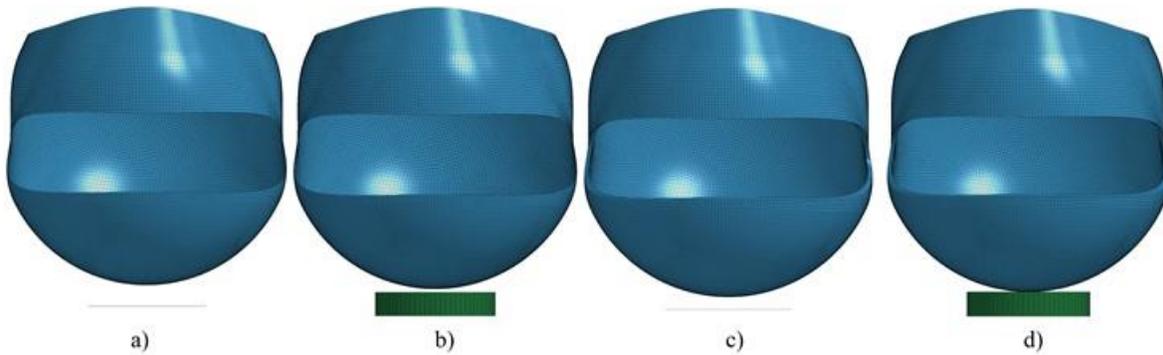


Fig. 4. Escenarios de simulación con carcasa de casco de 4 mm: a) Casco 2D-Boque 2D, b) Casco 2D-Bloque 3D, c) Casco 3D-Bloque 2D, d) Casco 3D-Bloque 3D.

Aunque la distancia entre el casco y el bloque se establece en 0.1 mm, en la Fig. 5 se observa una separación mayor en los escenarios que utilizan elementos 2D. Esta diferencia se debe a las características de los elementos tipo shell, a los cuales se les asignan propiedades de espesor. El espesor de los elementos shell se distribuye simétricamente alrededor de su plano medio, por lo que la mitad del espesor se aplica a cada lado del objeto. Esto genera la apariencia de una mayor separación entre el casco y el bloque en comparación con el modelo de elementos sólidos 3D. Este fenómeno es más evidente cuando se modifica la visualización de los elementos tipo shell, asignándoles un espesor visual, lo que permite apreciar mejor las diferencias en la separación (Fig. 5). La representación gráfica con espesor ayuda a comprender mejor la geometría y la interacción de los elementos en los escenarios de impacto.

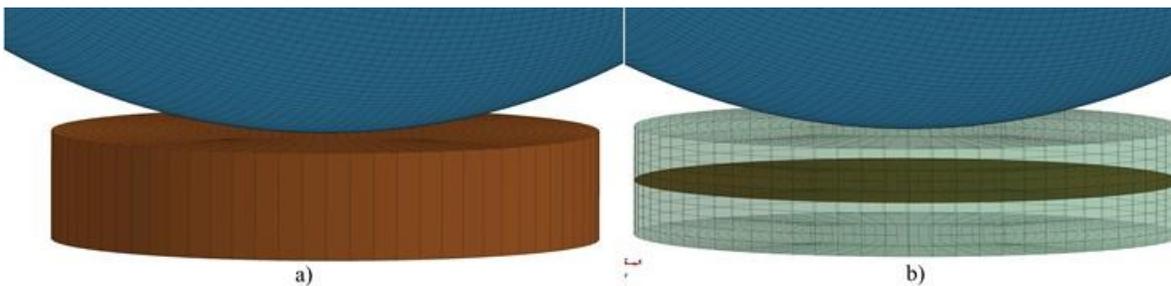
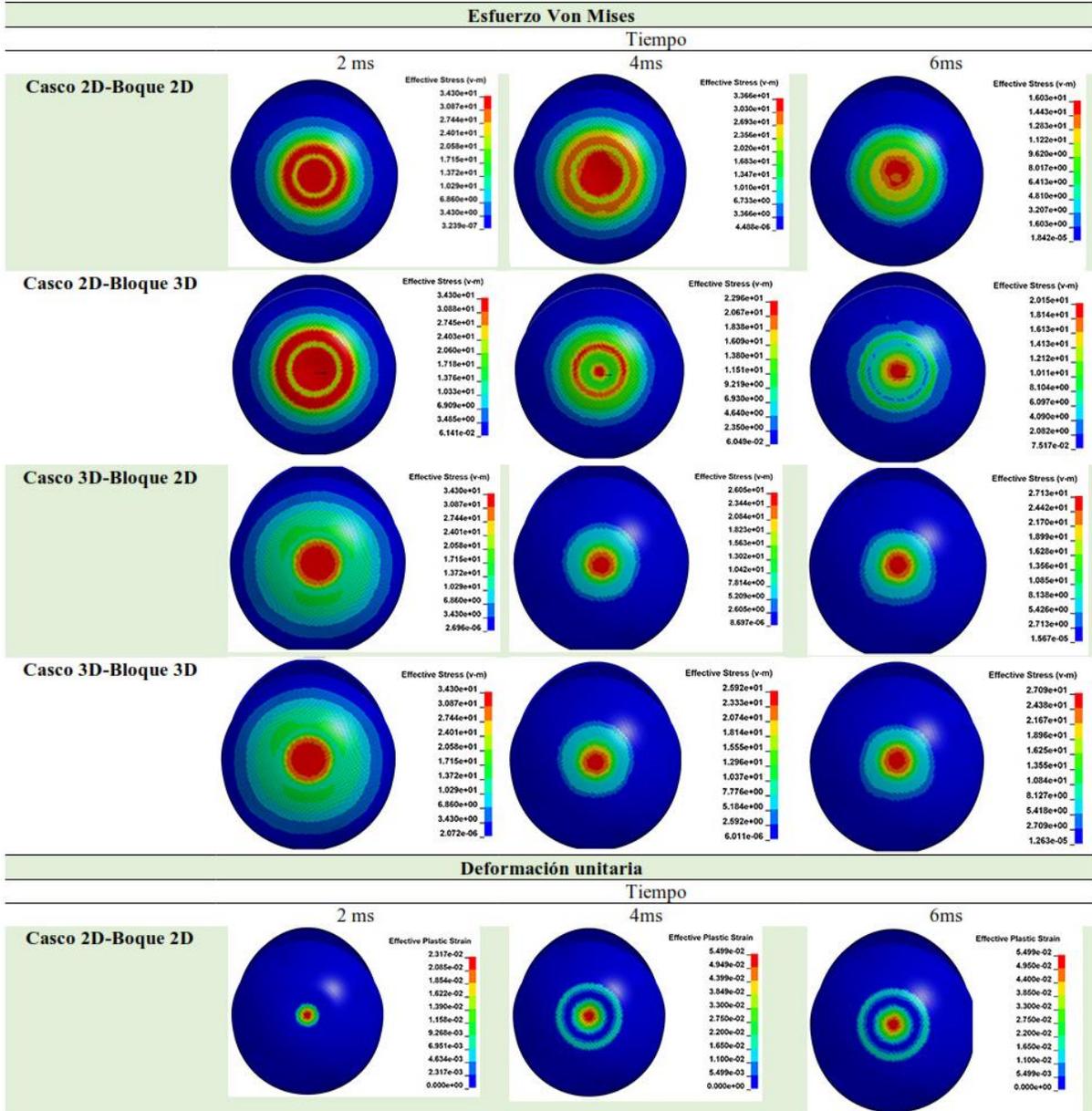


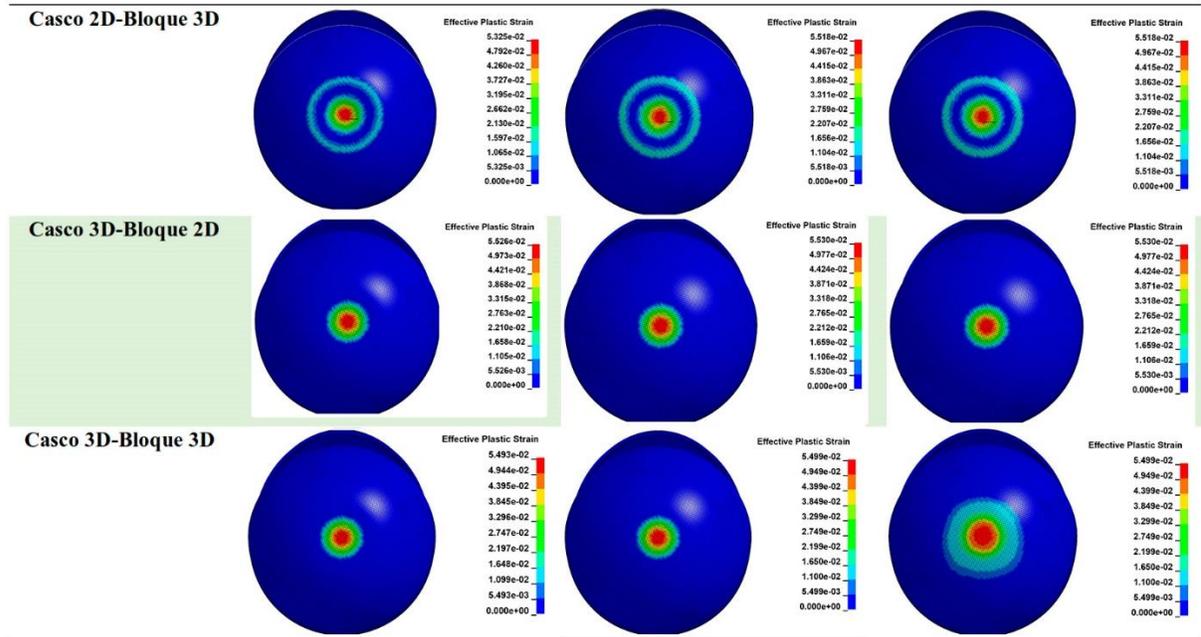
Fig. 5. Elementos tipo shell: a) Bloque con visualización de espesor, b) Elemento Shell central con espesor simétrico.

III. RESULTADOS

Las simulaciones se llevan a cabo durante 20 ms, capturando la cinemática del impacto desde el inicio de la colisión entre el bloque y la carcasa, que ocurre a los 2 ms. A partir de este momento, se observa un incremento de 2 ms en los intervalos hasta llegar a los 6 ms, momento en el cual se produce el rebote del casco. Se presentan los esfuerzos y las deformaciones unitarias, generados en las carcasas de los cascos (véase Tabla 1).

TABLA 1
CINEMÁTICA DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES UNITARIAS.





En la Tabla 1 se observa que al emplear elementos 2D para el casco, se presentan ligeras variaciones en los esfuerzos al cambiar los elementos del bloque de 2D a 3D. No obstante, cuando se utilizan elementos 3D para el casco, los valores de los esfuerzos permanecen consistentemente similares, independientemente de los elementos empleados para el bloque. Además, el comportamiento de las deformaciones unitarias muestra una mayor congruencia al usar elementos 3D para el casco. Aunque las variaciones en el caso al utilizar elementos 2D son más notables, estas diferencias no son significativas.

Las gráficas de esfuerzo-deformación para cada uno de los análisis realizados (véase Fig. 6) se generaron a partir de los valores máximos de esfuerzos y deformaciones unitarias obtenidos en intervalos de un milisegundo durante los 20 ms de la simulación.

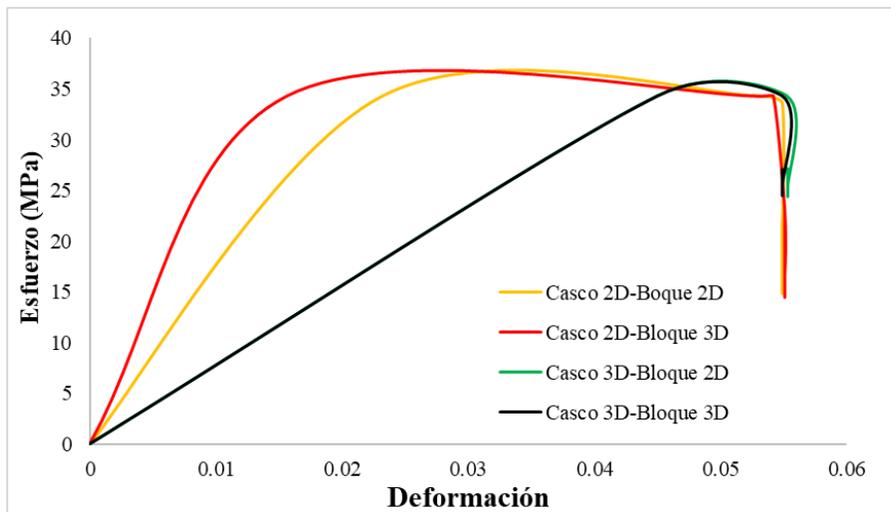


Fig. 6. Gráfica esfuerzo-deformación.

Como se observa en la Fig. 6, el impacto provoca que el esfuerzo alcance el límite elástico del ABS, de 34.3 MPa. Sin embargo, al utilizar elementos 2D en el análisis del casco, se obtiene una mayor rigidez en comparación con el uso de elementos 3D. Esta diferencia se debe a que, en el caso con los elementos 3D, el espesor del material se discretiza en cuatro elementos con un tamaño de 1 mm cada uno, mientras que los elementos 2D representan todo el espesor con un solo elemento, lo que influye en la variación de la rigidez. A pesar de las diferencias en los elementos utilizados, en todos los casos se observa una deformación unitaria máxima de 0.055.

7

Un parámetro clave a considerar es la energía interna de la carcasa del casco, ya que un mayor valor de energía interna refleja una mayor capacidad de absorción del impacto, lo que reduce la transmisión de energía al cráneo y, por tanto, disminuye el riesgo de lesiones. La Fig. 7 presenta una comparación de la energía interna correspondiente a cada una de las carcasas de casco analizadas.

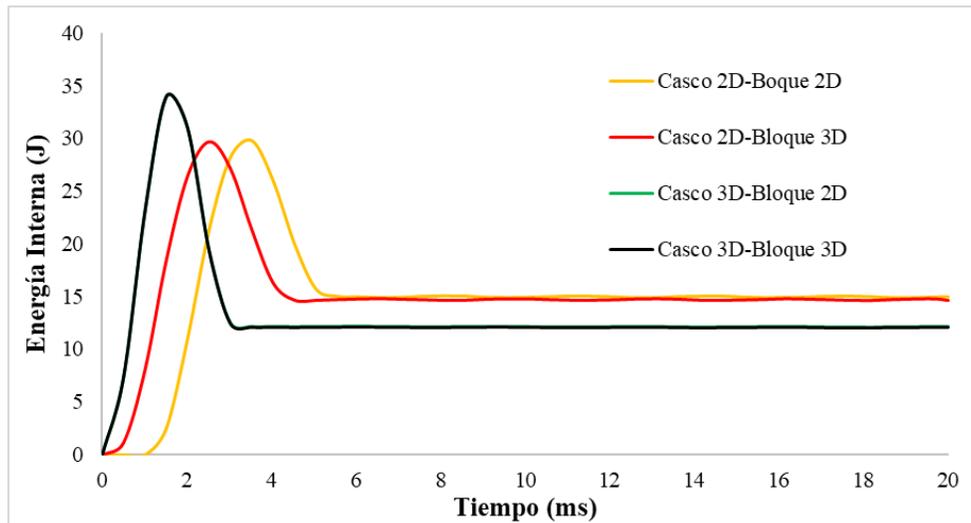


Fig. 7. Energía interna del casco.

Cuando el casco se modela con elementos 3D, su comportamiento es consistente, independientemente de los elementos utilizados para el bloque. En cambio, con el casco modelado con elementos 2D, la interacción con un bloque 3D ocurre ligeramente más rápido, iniciando al milisegundo, mientras que con un bloque 2D el inicio se retrasa 0.5 ms. No obstante, ambos modelos alcanzan el mismo pico de energía interna de 29.7 J, estabilizándose en 14.8 J. La variación en los picos de energía interna entre los cascos modelados con elementos 3D y 2D es de 4.3 J, siendo mayor en los modelos 3D, mientras que la energía estabilizada difiere en 2.6 J, siendo mayor en los modelos 2D.

Los tiempos de cómputo de las simulaciones también varían según el tipo de elementos utilizados, como se detalla en la Tabla 2.

TABLA 2
TIEMPOS DE CÓMPUTO

Análisis	Tiempo
Casco 3D-Bloque 3D	26 minutos 34 seconds
Casco 2D-Boque 2D	2 minutos 34 seconds
Casco 3D-Bloque 2D	26 minutos 34 seconds
Casco 2D-Bloque 3D	3 minutos 45 seconds

Como se muestra en la Tabla 2, el uso de elementos 2D en comparación con elementos 3D reduce el tiempo de cómputo en un 88.4%. No obstante, cuando se aplican elementos 2D en materiales rígidos, como en el caso del bloque, el tiempo de cómputo es similar al de los elementos 3D, dado que en estos casos el bloque no genera datos adicionales y solo transmite la energía del impacto.

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en esta investigación en comparación con los reportados por Pinnoji et al. [9]. Esta comparación valida la consistencia de los resultados y respalda la fiabilidad del modelo empleado en este estudio.

∞

TABLA 3
COMPARATIVO DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO CASCO DE 4 MM DE ESPESOR

Casco	Deformación unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Energía interna en la cáscara antes del rebote (J)
Pinnoji	0.04	34.3	30.5
Casco 3D-Bloque 3D	0.055	34.3	33.9
Casco 2D-Bloque 2D	0.055	34.3	29.7
Casco 3D-Bloque 2D	0.055	34.3	33.9
Casco 2D-Bloque 3D	0.055	34.3	29.7

Como se muestra en la Tabla 3, no se observan variaciones en las deformaciones unitarias entre los análisis realizados. Sin embargo, en comparación con el estudio de Pinnoji, existe una diferencia de 0.015. En cuanto a los esfuerzos, los resultados obtenidos en todos los análisis son consistentes con los reportados por Pinnoji. Respecto a la energía interna de la carcasa antes del rebote provocado por el impacto contra el bloque, se registra una variación de 0.8 J inferior al usar elementos 2D, y de 3.4 J superior al usar elementos 3D, en comparación con los valores reportados por Pinnoji.

IV. CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre la utilización de elementos 2D y 3D en la simulación del comportamiento estructural del casco de ABS revela diferencias en términos de rigidez, precisión de los resultados y tiempos de cómputo. Al emplear elementos 2D para el casco, se observan ligeras variaciones en los esfuerzos al modificar los elementos del bloque de 2D a 3D, aunque dichas variaciones no son significativas. En contraste, al utilizar elementos 3D para el casco, los esfuerzos y las deformaciones unitarias muestran una mayor consistencia, independientemente de los elementos utilizados en el bloque. Los materiales rígidos, independientemente de si se utilizan elementos 2D o 3D en su modelado, transmiten la misma cantidad de energía.

En cuanto a los tiempos de cómputo, la implementación de elementos 2D resulta significativamente más eficiente, con una reducción del 88.4% en comparación con los elementos 3D. Sin embargo, en materiales rígidos como el bloque, esta ventaja en el tiempo de cómputo desaparece, ya que ambos tipos de elementos muestran tiempos similares.

Los resultados de los análisis indican que la implementación de elementos 2D es más factible para piezas de bajo espesor, ya que las variaciones obtenidas con respecto a los elementos 3D no son significativas y los tiempos de cómputo se reducen considerablemente. Esto permite obtener resultados numéricos viables en las simulaciones sin comprometer la precisión del análisis.

Los análisis de elemento finito permiten desarrollar pruebas de problemas complejos no lineales reduciendo tiempos y costos respecto a las pruebas experimentales, sin embargo, pese a ello las simulaciones dinámicas conllevan tiempos elevados de cómputo, por lo cual es necesario implementar la combinación de elementos 2D y 3D para sistemas grandes y complejos para disminuir tiempo de cómputo.

REFERENCIAS

9

- [1] J. Newman, “The biomechanics of head trauma and the development of the modern helmet. How far have we really come,” *In Proceedings of the IRCOBI Conference*, 2005, September 21-23, Prague, Czech Republic pp. 10. Available: <https://wblldb.lievers.net/10041415.html>
- [2] K. Kardamanidis, A. Martiniuk, R. Q. Ivers, M. R. Stevenson, K. Thistlethwaite, “Motorcycle rider training for the prevention of road traffic crashes”. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 10, CD005240, 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD005240.pub2>
- [3] B. C. Liu, R. Ivers, R. Norton, S. Boufous, S. Blows, S. K. Lo, “Helmets for preventing injury in motorcycle riders”. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 1, CD004333, 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD004333.pub3>
- [4] M. Tabary, S. Ahmadi, M. H. Amirzade-Iranaq, M. Shojaei, M. S. Asl, Z. Ghodsi, V. Rahimi-Movaghar, “The effectiveness of different types of motorcycle helmets—A scoping review,” *Accident Analysis & Prevention*, 154, 106065, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106065>
- [5] F. A. O. Fernandes, R. A. De Sousa, “Motorcycle helmets—A state of the art review,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 56, pp.1-21, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.011>
- [6] W. Y. Yu, C. Y. Chen, W. T. Chiu, M. R. Lin, “Effectiveness of different types of motorcycle helmets and effects of their improper use on head injuries,” *International journal of epidemiology*, vol. 40, no.3, pp. 794-803, 2011, doi: <https://doi.org/10.1093/ije/dyr040>
- [7] F. M. Shuaeib, A. M. S. Hamouda, M. M. Hamdan, Umar, R. R. Umar, M. S. J. Hashmi, “Motorcycle helmet: Part II. Materials and design issues,” *Journal of materials processing technology*, Vol.123, no. 3, pp. 422-431, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00047-X)
- [8] A. L. Gutiérrez, “Las motos en México se multiplican por 4... y tus “antojos” serían la razón”. *El Financiero*. <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/las-motos-en-mexico-se-multiplican-por-4-y-tus-antojos-serian-la-razon/> (accessed Oct. 22, 2024).
- [9] P. K. Pinnoji, P. Mahajan, N. Bourdet, C. Deck, R. Willinger, “Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: Experiments and numerical modeling,” *International Journal of Impact Engineering*, vol.37, no. 3, pp. 274-284, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.05.013>
- [10] DOF - Diario Oficial de la Federación. “Gob.mx” https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5524337&fecha=29/05/2018 (accessed Jun. 8, 2024).
- [11] R.C. Hibberler, *Mecánica de materiales*, 6th ed., Pearson Educación: Naucalpan de Juárez, México, pp. 894, 2006.
- [12] S. K. Totla, A. M. Pillai, M. Chetan, C. Warad, S. K. Vinodkumar, A. Y. Patil, B. B. Kotturshettar, “Analysis of helmet with coconut shell as the outer layer,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 32, pp. 365-373, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.047>