

Diseño de estructuras tipo panel de abeja basadas en el caparazón de armadillo para un helicóptero ligero

Design of Shell-based Honeycomb Structures Armadillo for a Light Helicopter

Quirino Estrada¹, Dariusz Szwedowicz^{6†}, Elva Reynoso², Julio Vergara-Vázquez⁷,
Lara Wiebe³, Jesús Silva⁴, Alejandro Rodríguez Mendez⁸, Abel Quezada⁵,
Luis A. Mier-Quiroga⁹, Elvis Coutiño¹⁰

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez | Instituto de Ingeniería y Tecnología, Chihuahua, MÉXICO

¹ ORCID: 0000-0003-0623-3780 | quirino.estrada@uacj.mx

² ORCID: 0000-0002-0729-2822 | elva.reynoso@uacj.mx

³ ORCID: 0000-0002-6336-0885 | lara.wiebe@uacj.mx

⁴ ORCID: 0000-0002-1505-500X | jesilva@uacj.mx

⁵ ORCID: 0000-0002-6336-0885 | abquezad@uacj.mx

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Morelos, MÉXICO

⁶ ORCID: 0000-0003-0623-3780 | dariusz.sd@cenidet.tecnm.mx

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Palenque, MÉXICO

⁷ ORCID: 0000-0003-1524-7914 | jvergarav@ipn.mx

University of California at Berkeley, USA

⁸ ORCID: 0000-0002-5252-109X | aleromende@berkeley.edu

Tecnológico Nacional de México | Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, MÉXICO

⁹ ORCID: 0000-0001-8290-4115 | luis.mier@tesjo.edu.mx

¹⁰ ORCID: 0000-0003-2455-2574 | elvis.coutino@tesjo.edu.mx

Recibido 20-01-2023, aceptado 26-04-2023.

Resumen

Actualmente la aplicación de patrones biológicos dentro del diseño de sistemas mecánicos está en incremento debido a su éxito evolutivo. En este sentido tras millones de años de evolución la naturaleza ha proveído estructuras optimizadas a los seres vivos para asegurar su supervivencia ante cambios climáticos o depredadores. A partir de lo anterior el presente artículo describe el diseño y evaluación numérica de estructuras tipo panel de abeja basadas en el caparazón de un armadillo. Las estructuras fueron construidas con aluminio 6063-T5 y evaluadas a través de pruebas de comprensión usando el software de elementos finitos Abaqus. Durante el estudio especial énfasis fue puesto en el diseño de la sección transversal de las estructuras y su efecto en la resistencia al impacto. En este sentido se diseñaron cuatro diferentes estructuras con patrones poligonales y triangulares. De acuerdo con los resultados obtenidos la estructura con base hexagonal/circular mostró un mejor desempeño en cuanto a la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE) con un valor de 0.78. Lo anterior se confirmó al obtener un valor de absorción de energía específica igual a 20.59 J/r. Finalmente, con los hallazgos encontrados se diseñó un panel de absorción de energía para un helicóptero ligero.

Palabras clave: resistencia al impacto, panel de abeja, método de elemento finito.

Abstract

Currently the application of biological patterns within the design of mechanical systems is increasing due to its evolutionary success. In this sense, after millions of years of evolution, nature has provided optimized structures for living beings to ensure their survival in the face of climatic changes or predators. Based on the above, this article describes the design and numerical evaluation of honeycomb-type structures based on the shell of an armadillo. The structures were built with 6063-T5 aluminum and evaluated through comprehension tests using Abaqus finite element software. During the study special emphasis was placed on the cross-sectional design of the structures and its effect on impact resistance. In this sense, five different structures with polygonal and triangular patterns were designed. According to the results obtained, the structure with a hexagonal/circular base showed a better performance in terms of crushing force efficiency (CFE) with a value of 0.78 - the above was confirmed by obtaining an equal specific energy absorption value. at 20.59 J/r. Finally, with the findings found, an energy absorption panel was designed for a light aircraft.

Index terms: crashworthiness, honeycomb, finite element method.

I. INTRODUCCIÓN

Los helicópteros representan uno de los tipos de aeronaves más versátiles dentro de los transportes aéreos. Sin embargo, también son susceptible a accidentes aéreos principalmente por fallas mecánicas o errores humanos durante su operación [1]. En este sentido, anualmente se reportan alrededor del mundo lesiones severas, decesos y pérdidas materiales asociadas a accidentes aéreos. En este sentido al suscitarse la abrupta caída de las aeronaves se producen lesiones en la región cervical, cabeza y extremidades en los pasajeros. Para contrarrestar tales efectos el empleo de estructuras de pared delgada tipo panal de abeja está en incremento [2], [3]. Una estructura tipo sándwich está formada por un núcleo encapsulado por dos cubiertas. Diseñados para deformarse plásticamente estas estructuras son una forma efectiva de obtener una desaceleración controlada durante una colisión. Sus principales ventajas son bajo costo, geometrías simples y efectividad para absorber energía. En este sentido diversas investigaciones numéricas [4], [5], computacionales [6], [7], [8] y teóricas [9], [10] se han desarrollado para optimizar estructuras tipo celular. Yan et al. [11] diseñaron componentes a resistencia al impacto de un avión ultraligero considerando una estructura de absorción de energía. El componente consiste de un cilindro de fibra de carbono con discontinuidades geométricas actuando como iniciadores de deformación. Tal diseño permite la absorción de energía a través de fractura del tubo a lo largo de su eje longitudinal, así como efecto de delaminación y corte. Galehdari et al. [12] diseñaron y analizaron un sistema de absorción de impacto de panal de abeja para un asiento de helicóptero. Al final de las pruebas comprobaron que el desempeño del sistema propuesto cumplió de forma satisfactoria con las regulaciones de aviación. Con el objeto de mejorar aún más su eficiencia actualmente el empleo de la biónica se está incrementando. La biónica consiste en aplicar los patrones biológicos en el diseño de estructuras ingenieriles. Lo anterior se justifica en que tras millones de años de evolución la naturaleza ha optimizado las características físicas de los organismos [13]. En este sentido Yin et al. [14] desarrollaron un análisis de optimización de estructuras jerárquicas de panal de abeja bajo carga axial. Los especímenes evaluados se diseñaron tomando como base un patrón geométrico triangular. Posteriormente se realizó el proceso de optimización a través de los modelos algoritmo genético multiobjetivo y metamodelo de Kriging. Como resultado las estructuras optimizadas mostraron un desempeño de energía específica 2.84 veces superior respecto a las estructuras panal de abeja tradicionales. Niu et al. [15] analizaron numérica y experimentalmente la capacidad de absorción de energía de paneles bioinspirados en el escarabajo Elytra. Durante el estudio se puso especial énfasis en el número y arreglo de costillas en las intersecciones de los perfiles hexagonales interno y externo. Al finalizar el análisis determinaron que las estructuras bioinspiradas mostraron una reducción significativa de la carga pico y un aumento de la resistencia a choques respecto a una estructura convencional. Por su parte Hu et al. [16] investigaron las características de absorción de energía de estructuras de panal de abeja bioinspiradas en la microestructura vascular del bambú sujetas a carga axial. El diseño de las estructuras consistió en un arreglo geométrico conformado por un círculo central el cual se unió a otros seis círculos exteriores en arreglo hexagonal. Los resultados mostraron la dependencia de las características de absorción de energía en función de función del diámetro del círculo central y longitud de los platos de unión. Finalmente, tal y como se ha mencionado la efectividad de las estructuras bioinspiradas tipo panal de abeja para el control de cargas dinámicas ha sido demostrada. Sin embargo, el empleo de estructuras bioinspiradas para la industria aeronáutica ha sido poco explorada. En este sentido el presente trabajo propone el diseño de estructuras bioinspiradas en el caparazón de armadillo de nueve bandas. Las estructuras fueron diseñadas considerando patrones triangulares y hexagonales. Posteriormente las estructuras fueron evaluadas a cargas axiales utilizando el software de elementos finitos Abaqus.

II. INSPIRACIÓN BIÓNICA: ARMADILLO DE NUEVE BANDAS

Millones de años de evolución proveen especialización de los seres vivos permitiendo así su supervivencia ante cambios climáticos, cambios en el régimen alimenticio y depredadores entre otros. En este sentido animales como el armadillo de nueve bandas han evolucionado para protegerse ante el ataque de depredadores. El armadillo de nueve bandas es un pequeño mamífero nativo de América caracterizado por tener un cuerpo cubierto por escamas dérmicas osificadas, dando como resultado un caparazón articulado que cubre la mayor parte de su cuerpo. La cabeza es pequeña del orden de 7 cm de largo con forma alargada, posee patas cortas pero robustas con garras curvas que facilitan el proceso de excavación de sus madrigueras. Los miembros anteriores poseen 4 dedos

mientras que los posteriores presentan 5 dedos. El caparazón del armadillo está dividido en tres regiones la región pélvica, central (bandas) y pectoral cada una con patrones poligonales y triangulares. Las escamas queratinizadas de estas regiones están unidas a través de fibras de Sharpey lo que le confiere flexibilidad al caparazón. A partir de lo anterior el armadillo puede hacer frente a las fuerzas externas provocadas por la acción de los depredadores. Considerando lo anterior el presente artículo propone el uso de estructuras de panal de abeja basadas en la forma geométrica de las escamas dérmicas del caparazón del armadillo.

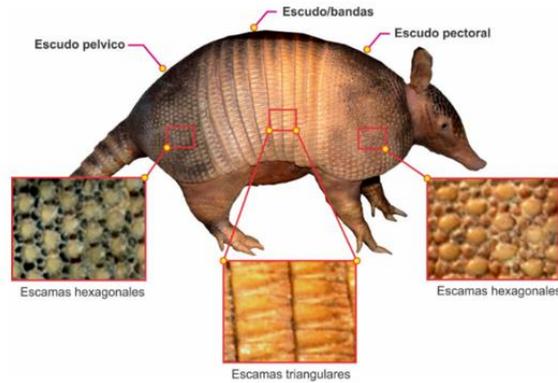


Fig. 1. Armadillo de nueve bandas y patrones de escamas en el caparazón [17].

III. VALIDACIÓN UN PRIMER MODELO DISCRETO: COMPRESIÓN DE UN PERFIL HEXAGONAL

El análisis propuesto en el presente artículo es computacional, por tanto, es necesario la validación de un primer modelo discreto para garantizar la congruencia de los resultados a obtener. El modelo discreto se desarrolló en Abaqus/Explicit y consistió en un ensayo axial de un perfil estructural de forma hexagonal denominado HS-00. Lo resultados fueron comparados con los datos experimentales de [18]. El perfil tiene 32 mm de lado, longitud de 120 mm y espesor de 1.2 mm. Un perfil hexagonal es útil para la validación desde que representa la unidad básica de una estructura de panal de abeja. El perfil se modeló con elementos S4R y propiedades elastoplásticas para aluminio AA6061, con un módulo de elasticidad de 68 GPa, límite de fluencia de 71 MPa, coeficiente de Poisson de 0.33 y densidad de 2700 kg/m³. Por su parte los platos de compresión se modelaron con elementos rígidos R3D4. De acuerdo con [18] el ensayo de compresión se realizó a una velocidad cuasi estática de 0.5 mm/min. Finalmente, a partir de un análisis de sensibilidad de malla, el perfil se discretizó con un tamaño de elemento de 2.5 mm. Detalles del modelo discreto se presentan en la Fig. 2.

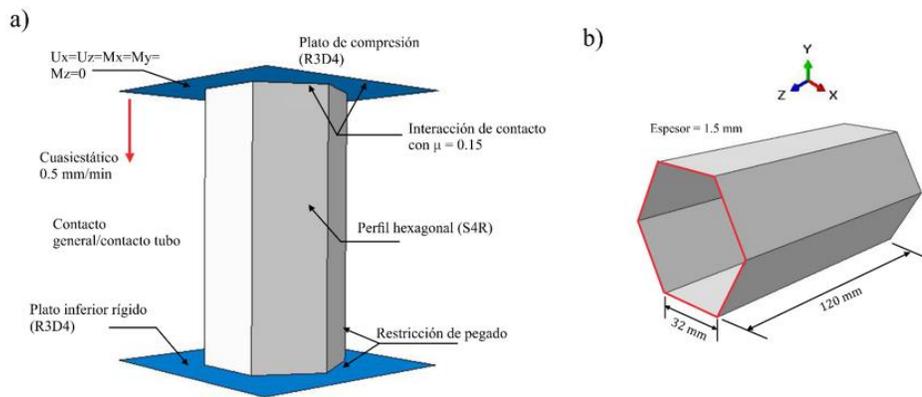


Fig. 2. a) Modelo discreto y b) geometría del perfil hexagonal HS-00.

4

Los resultados experimentales [18] y numéricos se muestran en la Fig. 3 y 4. La Fig. 3a muestra la comparación de la fuerza durante el proceso de compresión del perfil. Como se puede observar la curva es caracterizada por un aumento súbito de la fuerza hasta alcanzar un valor pico (P_{max}) cercano a 21 kN. Posteriormente se inicia un proceso de decaimiento con oscilación de la fuerza. Físicamente esto representa la formación de pliegues plásticos. Por su parte la Fig. 3b muestra la energía absorbida durante el proceso de deformación plástica alcanzando un valor cercano de 0.70 kJ en ambos modelos. El modo de deformación final se presenta en la Figura 4.

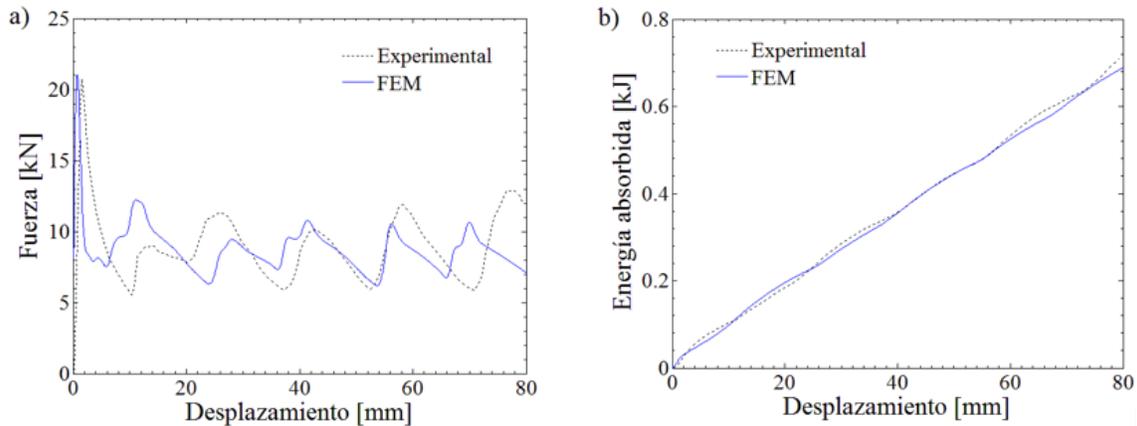


Fig. 3. a) Curva fuerza-desplazamiento y b) energía absorbida para la estructura HS-00.

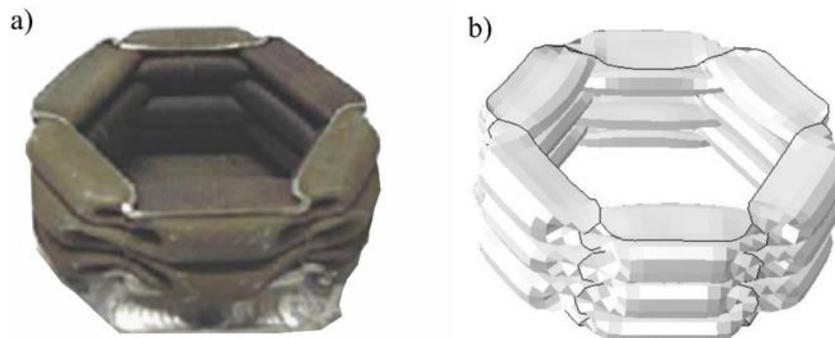
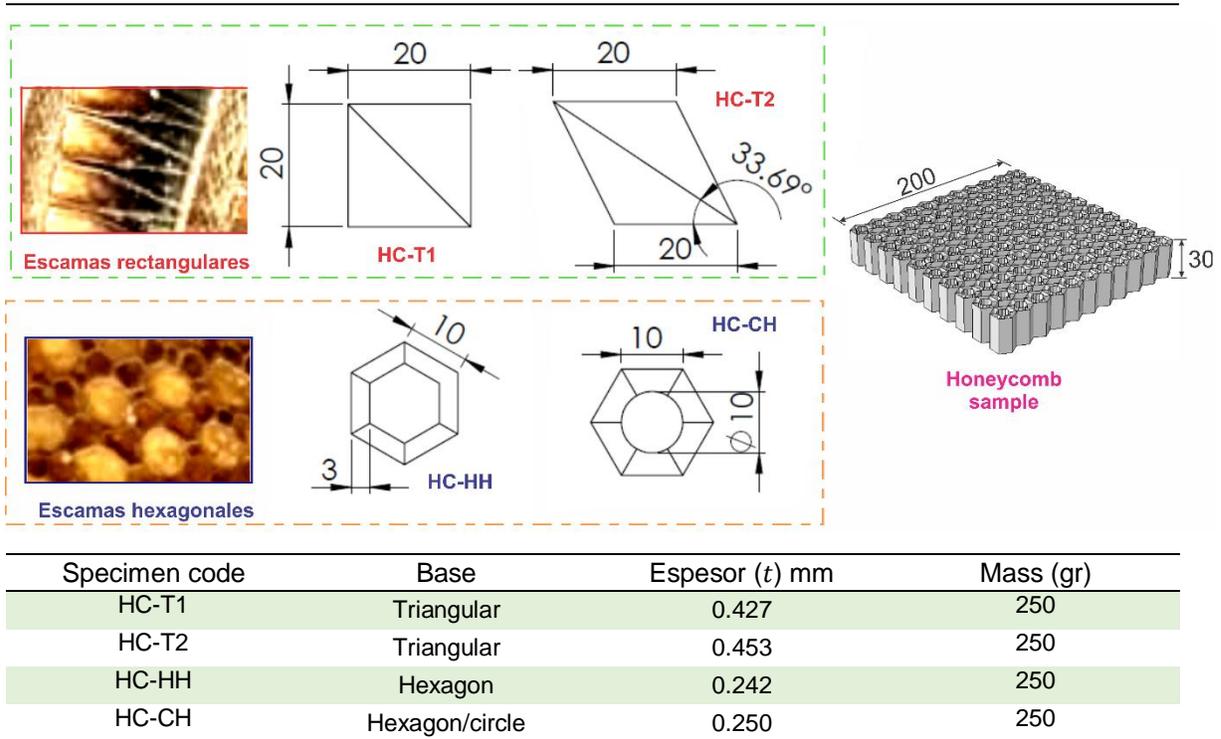


Fig. 4. Modo de deformación final para HS-00 a) experimental [17] b) numérico.

IV. ANÁLISIS NUMÉRICO DE ESTRUCTURAS BIOINSPIRADAS

El principal objetivo del presente artículo es explorar la viabilidad del diseño de estructuras panal de abeja bioinspiradas en el caparazón de armadillo. En este sentido se obtuvieron los patrones geométricos de la sección pectoral y de la región de las bandas del caparazón, las cuales ayudan a contrarrestar las cargas externas durante el ataque de depredadores. En este sentido se observa que los patrones están caracterizados por formas triangulares en la sección media y hexagonales rodeadas por pequeñas formas poligonales en la región frontal y trasera, lo cual confiere al armadillo capacidad para contrarrestar las cargas externas de los depredadores. A partir de esto se diseñaron cuatro estructuras bioinspiradas tipo panal de abeja (BTWS) cuyas dimensiones generales son $200 \times 200 \times 30$ mm, las cuales fueron evaluadas a través de una prueba de cuasi-estática de compresión. Con el objeto de realizar una comparación objetiva todas las estructuras presentan un mismo valor de masa igual 250 g. Detalles de las estructuras se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1
DETALLES DE LAS ESTRUCTURAS BIOINSPIRADAS EN EL CAPARAZÓN DEL ARMADILLO.



V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de las estructuras panel de abeja basadas en el caparazón del armadillo (BTWS) se realizó a través de parámetros de resistencia al impacto (véase Tabla 2). Donde F es la fuerza de aplastamiento, δ es el desplazamiento y m es la masa.

TABLA 2
PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL IMPACTO.

Carga Pico [P_{max}] kN	Fuerza promedio [P_m] kN	Energía absorbida [E_a] kJ	Eficiencia de la fza de aplastamiento [CFE]	Absorción de energía específica [SEA]
Obtenido de la curva	$P_m = \frac{E_a}{\delta}$	$E_a = \int_0^\delta F. d\delta$	$CFE = \frac{P_m}{P_{max}}$	$SEA = \frac{E_a}{m}$

RESULTADOS PARA ESTRUCTURAS PANAL DE ABEJA BIOINSPIRADAS

El comportamiento mecánico y resistencia al impacto de las estructuras tipo panel de abeja se obtuvo a través de la curva esfuerzo deformación. Tal y como se observa en la Fig. 5 las estructuras basadas en hexágonos presentaron una mayor resistencia a la deformación respecto a las estructuras triangulares alcanzando valores de hasta 450 kN. Todas las estructuras presentaron un aumento súbito de la fuerza al inicio de la compresión,

posteriormente una disminución de la misma hasta estabilizarse. Sin embargo, a partir de 10 mm de desplazamiento se observó una densificación de las estructuras lo cual incrementó nuevamente el valor de la fuerza, siendo más visible para las estructuras HC-HH y HH-CH. El menor desempeño lo presentó la estructura con base triangular irregular (HC-T2) con un valor cercano a 2.18 kN.

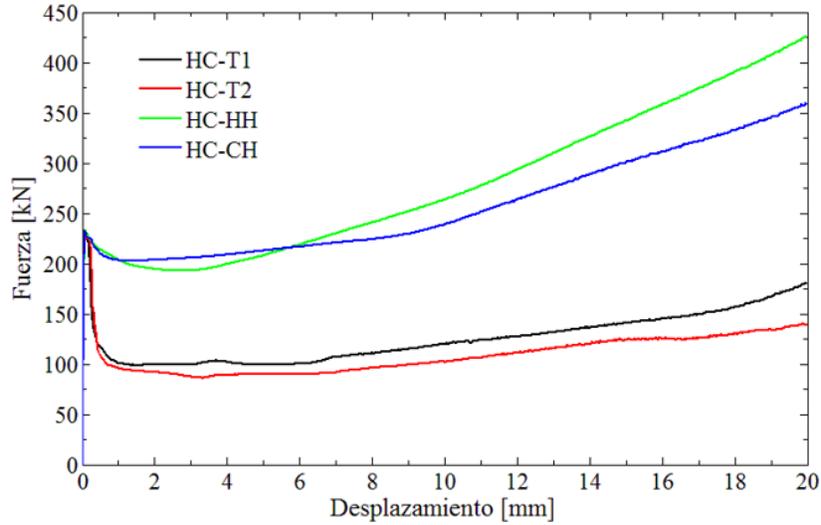


Fig. 5. Comparación de las curvas fuerza vs deformación para las estructuras panal de abeja bioinspiradas en el caparazón del armadillo.

Respecto a la energía absorbida (E_a) se calculó con la integración del área bajo la curva de las gráficas fuerza vs desplazamiento y se presenta en la Fig. 6. Tal y como se mencionó anteriormente las estructuras tipo panal de abeja con base hexagonal mostraron una mayor absorción de energía por deformación. El mejor resultado de E_a se obtuvo para la estructura con un hexágono central rodeado por trapecios más pequeños con un valor aproximado de 5.5 kJ. Tal valor indica que referida geometría contribuyó a una mejor capacidad de carga, lo cual brinda estabilidad. Por tanto, se obtuvo una mayor área bajo la curva.

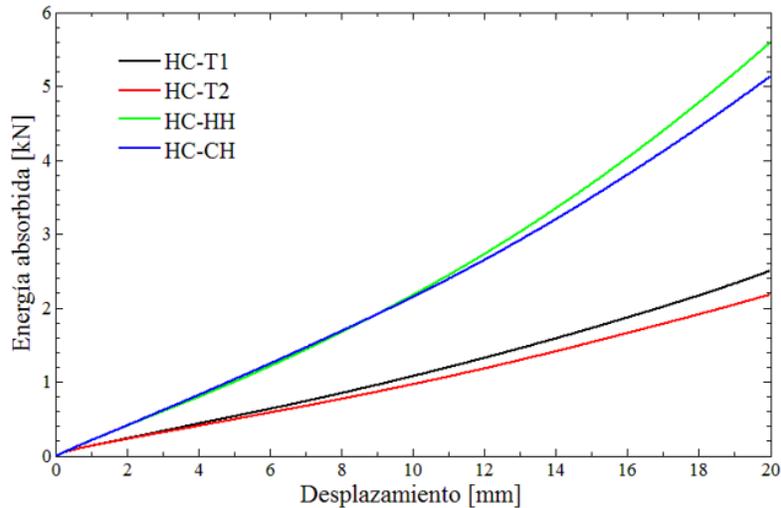


Fig. 6. Comparación de la energía absorbida (E_a) para las estructuras bioinspiradas tipo panal de abeja.

La resistencia al impacto, así como la absorción de energía depende principalmente del modo de deformación de las estructuras bioinspiradas. El modo de deformación es determinado a su vez por la rigidez de la estructura la cual es provista por la geometría de la misma. En este sentido durante la compresión de las estructuras se formaron líneas plásticas estáticas y dinámicas. El modo de deformación para las estructuras bioinspiradas se presentan en la Fig. 7 y 8. En todas las estructuras la formación de pliegues plásticos fue observada. Sin embargo, para las estructuras con base triangular (HC-T1 y HC-T2) se observó un fenómeno de pandeo, lo cual contribuyó a una menor resistencia al impacto. De igual forma el fenómeno de pandeo, provoca una menor deformación plástica desde que se forman una menor cantidad de pliegue estáticos y dinámicos. Este efecto se observa en la vista isométrica del panel HC-T2.

7

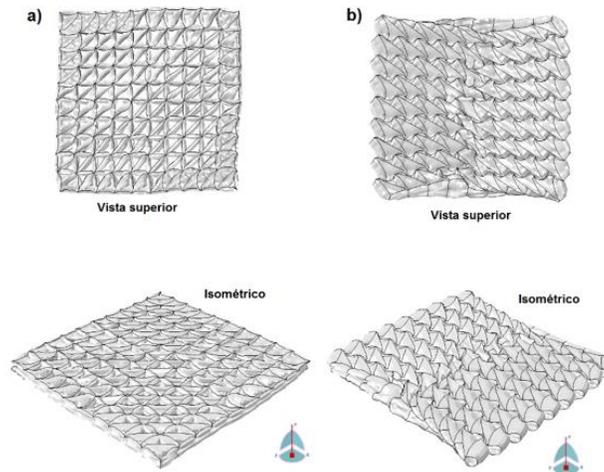


Fig. 7. Modo de deformación final donde a) HC-T1 y b) HC-T2.

El modo de deformación de las estructuras con base hexagonal HC-HH y hexagonal/circular HC-CH se presenta en la Fig. 8. En este sentido se observó una mayor deformación plástica de los paneles con una mayor interacción entre las paredes de las celdas, lo cual ayudó a incrementar su resistencia a la deformación. Al deformarse de forma aleatoria se produjo una mayor formación de pliegues plásticos lo que incrementó la absorción de energía.

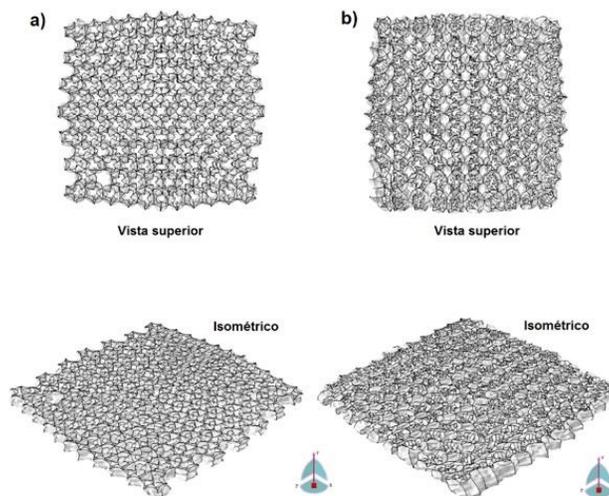


Fig. 8. Modo de deformación final donde a) HC-HH y b) HC-CH.

Un resumen de los resultados calculados para las estructuras bioinspiradas tipo panal de abeja se presenta en la Tabla 3. En todos los casos las estructuras presentaron la misma masa igual 250 g. Respecto a la mayor resistencia a la compresión esta se obtuvo con la estructura hexagonal (HC-HH) cuyo valor de P_{max} fue 424.01 kN. Mientras que la menor resistencia fue calculada para la estructura bioinspirada HC-T2 con 227.31 kN. Tales comportamientos se confirmaron al analizar la carga promedio (P_m) donde las estructuras con base hexagonal tuvieron una mejora de hasta 156% respecto al valor más bajo igual a 109.10 kN. Físicamente, al realizarse la compresión, los vértices de la forma hexagonal permiten incrementar la capacidad de carga a través de una mejor distribución de esfuerzos. Considerando la energía absorbida (E_a), el menor desempeño se obtuvo con la estructura de patrón triangular irregular igual a 2.18 kJ. Tal valor indica inestabilidad de la forma geométrica triangular al momento de ser cargada, lo cual provoca el colapso prematuro de la misma. Mientras que el valor más alto fue de 5.59 kJ lo cual representó un aumento de 156.42%. El mismo comportamiento se obtuvo para la absorción de energía específica (SEA) por unidad de masa (g) en donde el valor más alto (22.36 J/g) fue para la estructura HC-HH.

TABLA 3
RESUMEN DE RESULTADOS NUMÉRICOS PARA ESTRUCTURAS BIOINSPIRADAS.

Código	Fuerza Pico P_{max} (kN)	Fuerza promedio P_m (kN)	Energía absorbida E_a (kJ)	Absorción de energía específica SEA (J/g)	Eficiencia fza de aplastamiento CFE
HC-T1	234.01	124.50	2.49	9.96	0.532
HC-T2	227.31	109.10	2.18	8.75	0.479
HC-HC	424.01	256.50	5.13	20.59	0.604
HC-HH	358.01	279.50	5.59	22.36	0.780

A pesar de que los indicadores analizados anteriormente dan cuenta del comportamiento mecánico de las estructuras analizadas, el parámetro más importante es la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE), donde un valor cercano a la unidad representa el valor óptimo. Este valor es deseable desde que físicamente ayuda a disminuir las aceleraciones bruscas al momento de las colisiones. Por tanto, la gravedad de las lesiones en los pasajeros puede ser minimizada. En este sentido las estructuras con base triangular presentaron valores bajos de CFE de entre 0.479-0.532. Esto significa que la fuerza de aplastamiento no se mantuvo durante el proceso de compresión, por lo cual no se encontró una eficiencia. Sin embargo, las estructuras HC-HC y HC-HH mostraron un mejor desempeño hasta alcanzar un valor de CFE. El valor más alto de CFE igual 0.78 se obtuvo para la estructura cuya celda es formada por un círculo central con un hexágono externo unido a través de costillas de rigidez. Tal patrón geométrico permitió una mayor resistencia a la formación de los pliegues plásticos, así como una mejor estabilidad estructural. Este valor de CFE representó una mejora de 62.83% respecto al valor más bajo. A partir de lo anterior la estructura HC-CH es ampliamente recomendada para aplicaciones de seguridad de pasajeros bajo condiciones de carga axial.

VI. APLICACIÓN: SISTEMA DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN HELICÓPTERO

En esta sección se presenta el diseño alternativo de un sistema de absorción de energía para un helicóptero ultraligero de 300 kg, el cual fue diseñado a partir de los principales hallazgos del presente artículo. En este sentido se diseñó una estructura de pared delgada (HC-CH) manteniendo la misma relación de aspecto descrito en la Tabla 1. La estructura bioinspirada se colocó en la parte inferior del fuselaje de la cabina del helicóptero. Posteriormente se simuló una condición de caída de la aeronave contra el suelo con una velocidad horizontal y vertical de 36 km/h. Para todos los componentes se utilizó aluminio AA6061. Detalles del modelo discreto se presentan en la Fig. 9.

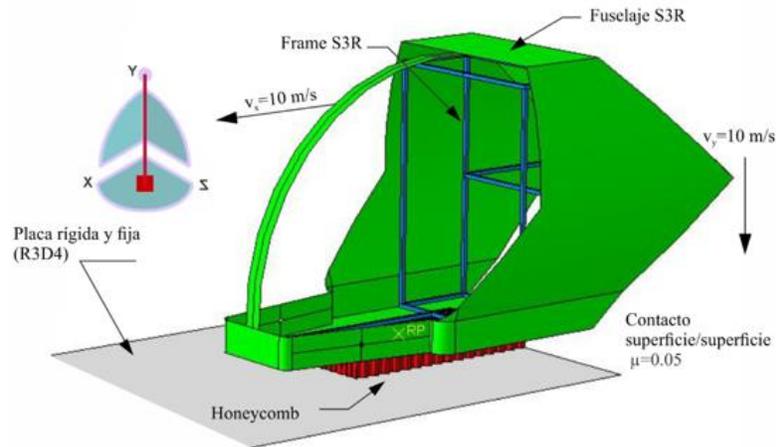


Fig. 9. Modelo discreto de la implementación de la estructura tipo panal de abeja bioinspirada en el fuselaje de un helicóptero.

El resultado obtenido para el historial de fuerza respecto al tiempo se presenta en la Fig. 10. En este sentido se observa una carga pico de 1400 kN la cual corresponde a la fuerza necesaria para romper la rigidez inicial del sistema incluyendo armazón/fuselaje y sistema panal de abeja. Posteriormente existe una disminución súbita de la fuerza, físicamente en este punto se ha alcanzado la falla de la estructura. Posteriormente se inicia el proceso de deformación por compresión de la estructura bioinspirada. En este punto se mantiene una fuerza con un valor aproximado de 1000 kN, lo cual indica la formación de pliegues plásticos estáticos y dinámicos, así como la interacción de las celdas del sistema panal de abeja. Posteriormente, la fuerza de impacto es controlada hasta disminuir gradualmente a cero en un tiempo de 2.5 ms.

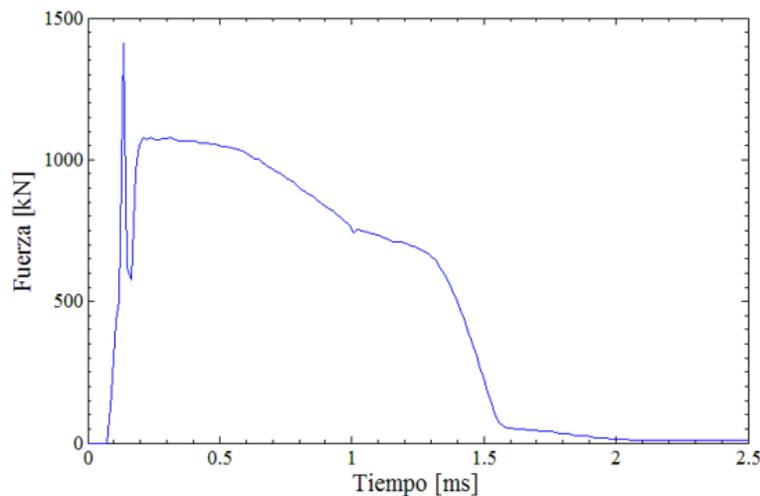


Fig. 10. Fuerza de impacto registrada para el sistema cabina/sistema de absorción de energía.

El modo de deformación tanto de la cabina, así como de la estructura bioinspirada tipo panal de abeja se presentan en la Fig. 11. En este sentido se observa que la mayor deformación plástica es sufrida por la estructura de pared delgada, lo cual se traduce como una mayor absorción de energía permitiendo reducir los daños en el

fuselaje y lesiones en los pasajeros. A partir de lo anterior se valida la efectividad del diseño bioinspirado en el caparazón de armadillo de la estructura (HC-CH).

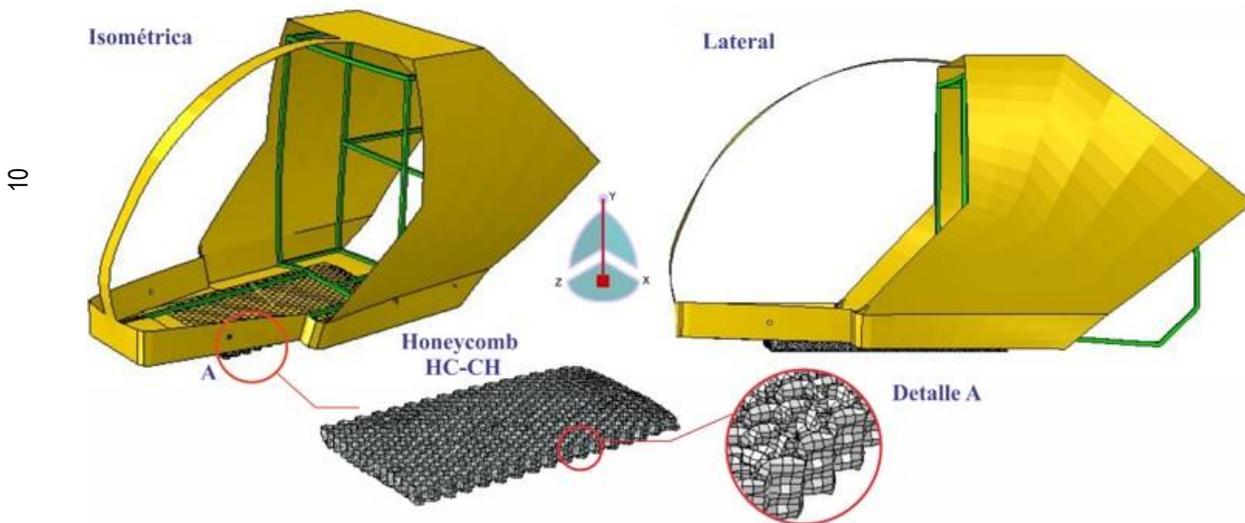


Fig. 11. Fuerza de impacto registrada para el sistema cabina/sistema de absorción de energía.

VII. CONCLUSIONES

En este artículo se analizó la factibilidad del diseño de estructuras panel de abeja basadas en el caparazón de armadillo. En este sentido se analizaron numéricamente a través de una prueba de compresión cuatro estructuras bioinspiradas (BTWS) con geometrías poligonales. A partir de los resultados numéricos se encontraron las siguientes conclusiones.

1. La resistencia al impacto de las BTWS está directamente relacionado a la geometría presentada seguido del arreglo interno de la celda, y finalmente del número de costillas de unión.
2. Las estructuras bioinspiradas en la parte central del caparazón del armadillo (bandas) tiene una menor resistencia al impacto respecto a las estructuras de pared delgada basadas en las escamas frontales y traseras del caparazón cuya geometría está basada en polígonos (hexágonos).
3. Respecto a la resistencia al impacto (P_{max}) las estructuras panel de abeja (HC-HH y HC-CB) permitieron incrementar el desempeño hasta un 87% comparado con la estructura HC-T2.
4. Respecto a la energía absorbida el mejor desempeño (5.59 kJ) se obtuvo con la estructura cuya celda está formado por hexágonos (HC-HH). Esto represento una mejora de 156.2%.
5. Finalmente, considerando que una estructura optima es aquella cuya CFE es igual a uno, el mejor desempeño lo obtuvo la estructura HC-CH con un valor de 0.78. Esto represento una mejora de 62.83%. Por tanto, esta estructura es altamente recomendada para el diseño de sistemas de absorción de energía.
6. La efectividad del sistema bioinspirado propuesto quedó validada desde que se pudo dar una aplicación real y cuya respuesta denota la efectividad para contrarrestar cargas de impacto.

REFERENCIAS

- [1] X. Yang, J. Ma, D. Wen, J. Yang, “Crashworthy design and energy absorption mechanisms for helicopter structures: A systematic literature review,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 114, no. 100618, p. 100-618, 2020
- [2] J. Fu, Q. Liu, K. Liufu, Y. Deng, J. Fang, Q. Li, “Design of bionic-bamboo thin-walled structures for energy absorption,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 135, pp. 400–413, 2019.
- [3] P. Hao, J. Du, “Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb column thin-walled structure under impact loading,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 79, pp. 301–308, 2018.
- [4] P. Astori, M. Zanella, M. Bernardini, “Validation of numerical models of a rotorcraft crashworthy seat and subfloor,” *Aerospace*, vol. 7, no. 12, p. 174, 2020.
- [5] V. F. González-Albuixech, M. Rodríguez-Millán, T. Ito, J. A. Loya, M. H. Miguélez, “Numerical analysis for design of bioinspired ceramic modular armors for ballistic protections,” *Int. J. Damage Mech.*, vol. 28, no. 6, pp. 815–837, 2019
- [6] J. Paz, L. Romera, J. Díaz, “Crashworthiness optimization of aircraft hybrid energy absorbers enclosing honeycomb and foam structures,” *AIAA J.*, vol. 55, no. 2, pp. 652–661, 2017.
- [7] Q. He, D. Ma, Z. Zhang, L. Yao, “Crushing analysis and crashworthiness optimization design of reinforced regular hexagon honeycomb sandwich panel,” *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 625–639, 2016.
- [8] K. M. Park, K. S. Min, Y. S. Roh, “Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements,” *Materials*, vol. 15, no. 1, 97, 2022.
- [9] S. E. Sadiq, S. H. Bakhy, M. J. Jweeg, “Crashworthiness behavior of aircraft sandwich structure with honeycomb core under bending load,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 881, no. 1, p. 012046, 2020.
- [10] D. Hu, Y. Wang, B. Song, L. Dang, Z. Zhang, “Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing,” *Compos. B Eng.*, vol. 162, pp. 21–32, 2019.
- [11] T. Yan, J. Wang, “Crashworthy component design of an ultra-light helicopter with energy absorbing composite structure,” *Procedia Eng.*, vol. 80, pp. 329–342, 2014.
- [12] S. A. Galehdari, H. Khodarahmi, “Design and analysis of a graded honeycomb shock absorber for a helicopter seat during a crash condition,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 21, no. 3, pp. 231–241, 2016.
- [13] Q. Chen, N. M. Pugno, “Bio-mimetic mechanisms of natural hierarchical materials: a review,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 19, pp. 3–33, 2013.
- [14] H. Yin, X. Wang, G. Wen, C. Zhang, W. Zhang, “Crashworthiness optimization of bio-inspired hierarchical honeycomb under axial loading,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 26, no. 1, pp. 26–37, 2021.
- [15] X. Niu, F. Xu, Z. Zou, T. Fang, S. Zhang, Q. Xie, “In-plane dynamic crashing behavior and energy absorption of novel bionic honeycomb structures,” *Compos. Struct.*, vol. 299, no. 116064, p. 116064, 2022.
- [16] D. Hu, Y. Wang, B. Song, L. Dang, Z. Zhang, “Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing,” *Compos. B Eng.*, vol. 162, pp. 21–32, 2019
- [17] J. St. John, “File: Dasypus novemcinctus (nine-banded armadillo) 1 (15543283797).jpg,” Wikimedia.org. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dasypus_novemcinctus_%28nine-banded_armadillo%29_1_%2815543283797%29.jpg. [Accessed: 29-Dec-2022].
- [18] N. Qiu, Y. Gao, J. Fang, Z. Feng, G. Sun, and Q. Li, “Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases,” *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 104, pp. 89–101, 2015.