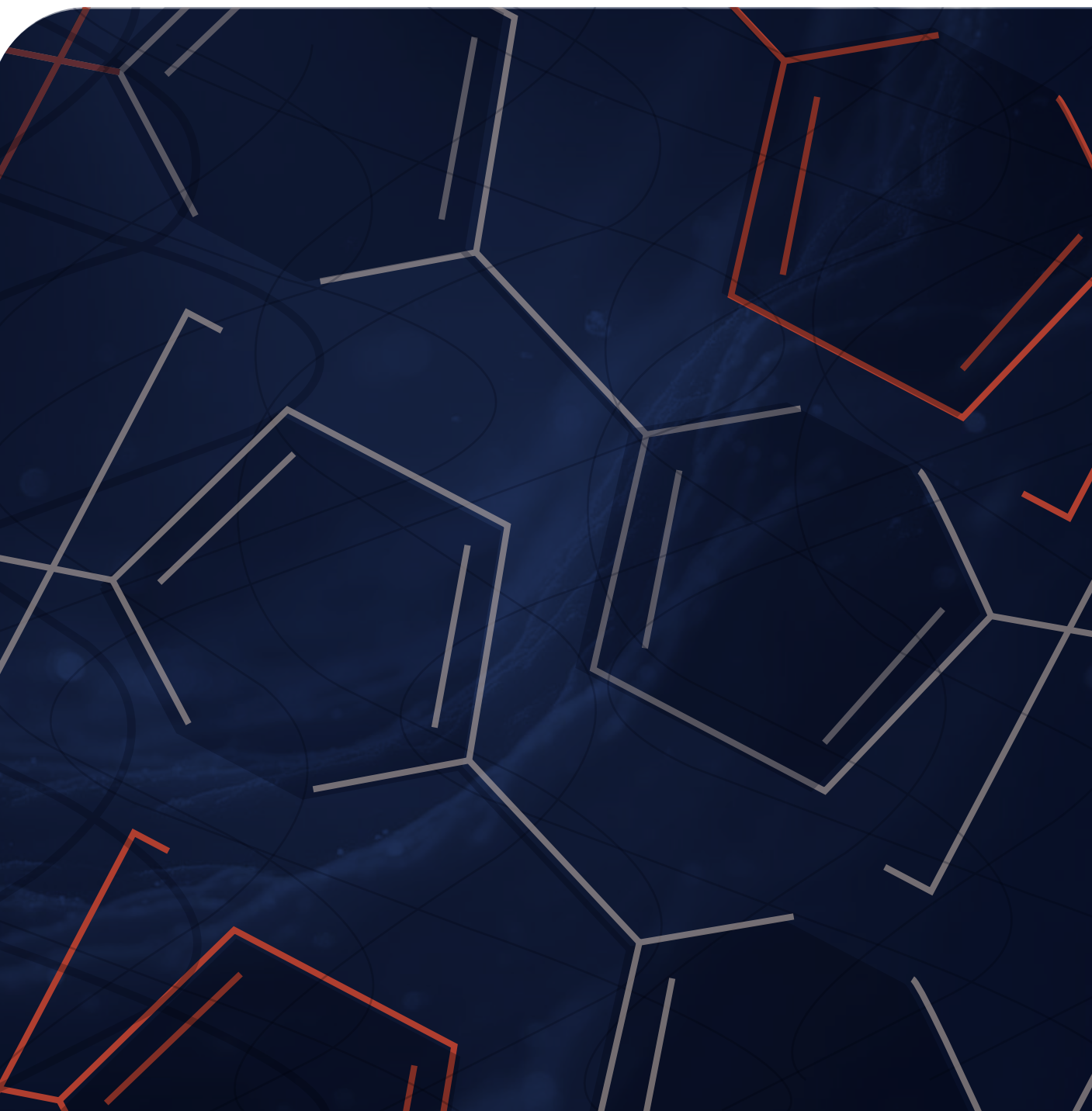




PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

15



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

JULIO-DICIEMBRE 2025

VOLUMEN 8, NÚMERO 15

DIRECTORIO

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano

RECTORA

Dra. Oliva Solís Hernández

SECRETARIA ACADÉMICA

Dr. Manuel Toledano Ayala

SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y POSGRADO

Lic. Diana Rodríguez Sánchez

DIRECTORA DEL FONDO EDITORIAL UNIVERSITARIO

Lic. Ivonne Álvarez Aguillón

COORDINADORA DE PUBLICACIONES PERIÓDICAS

Dra. María de la Luz Pérez Rea

DIRECTORA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

JEFE DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Lic. Cristian Emanuel Tovar Navarro

COORDINADOR DEL DESPACHO DE PUBLICACIONES
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología, Vol. 8, Núm. 15, julio-diciembre 2025, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas, s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro., Tel. (442) 1921200 ext. 6023, <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas>, perspectivasci@uaq.mx. Editores responsables: Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez, Christopher Alexis Cedillo Jiménez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2021-81011485000-102, ISSN: 2683-3107, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: Christopher Alexis Cedillo Jiménez, Cerro de las Campanas, s/n Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro. Fecha de última modificación: 31 de julio de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido, siempre y cuando se atribuya la fuente y se proporcione un enlace al original. Esta obra está bajo Licencia Creative Commons: Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).



Esta revista está actualmente registrada en el Directorio





PERSPECTIVAS DE LA **CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA**

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Universidad Autónoma de Querétaro, México

DIRECTOR

Dr. Christopher Alexis Cedillo Jiménez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Dra. Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez

Investigadora independiente, Estados Unidos

Dr. Jesús Alejandro Franco Piña

Universidad Nacional Autónoma de México, México

EDITORES RESPONSABLES

COMITÉ ASESOR CIENTÍFICO

Dr. Manuel Toledano Ayala

Universidad Nacional Autónoma de México, México

ÁREA: SISTEMAS EMBEBIDOS

Dra. Marcela Vargas Hernández

Universidad Nacional Autónoma de México, México

ÁREA: BIOSISTEMAS Y BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA

Dra. Mónica Ledesma Motolinía

Universidad Autónoma de Puebla, México

ÁREA: FÍSICA E INGENIERÍA DE MATERIALES

Dra. Angélica Godínez Oviedo

Universidad Autónoma de Querétaro, México

ÁREA: MICROBIOLOGÍA E INOCUIDAD ALIMENTARIA

Dr. Saúl Tovar Arriaga

Universidad Autónoma de Querétaro, México

ÁREA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL

EQUIPO EDITORIAL

Lic. Karla Guillén Mancilla

Universidad Autónoma de Querétaro, México

DISEÑO EDITORIAL Y PORTADA

Jesús Abraham Salinas Sánchez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

AUXILIAR EDITORIAL

Andrea Cristina Garza Sandoval

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Ing. Soid Ruiz Ramírez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

CORRECCIÓN DE ESTILO



CONTENIDO

ARTÍCULOS

Obtención de velocidad con una simulación de dinámica de fluidos computacional: método de comprobación teórica6

 José Alberto Sebastián Mena Santiago

 Enrique Rico García

Determinación del módulo tangencial en probetas recubiertas con polipirrol18

 Christopher René Torres San Miguel

 Juan Carlos Axayácatl Morales Guadarrama

 Carlos Alberto Espinoza Garcés

Multibody simulation of an Osteogenesis Imperfecta Child model fit over Harmonic Dynamic System..... 32

 Miguel Ángel Martínez Miranda

 Jose Luis Torres Ariza

 Christopher René Torres San Miguel

Análisis experimental de la propagación de ondas sísmicas en suelos finos que contienen una inclusión fluida49

 Jovan Ezequiel Basaldúa Sánchez

 María de la Luz Pérez Rea

Diseño de una máquina para pruebas biaxiales en tejido blando73

 Jesús Ariel Gómez Martínez

 Christopher René Torres San Miguel



Obtención de velocidad con una simulación de dinámica de fluidos computacional: método de comprobación teórica

Calculating velocity with a computational fluid dynamics simulation:
theoretical verification method

 José Alberto Sebastián Mena Santiago

 Enrique Rico García*

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México

* ricog@uaq.mx

01

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

J. A. S. Mena Santiago y E. Rico García, "Obtención de velocidad con una simulación de dinámica de fluidos computacional: método de comprobación teórica", *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 8, núm. 15, pp.6 -17, 2025.



Resumen

La dinámica de fluidos computacional (CFD, en inglés) es una herramienta que permite resolver problemas sobre el comportamiento de un fluido dentro de una geometría dada, considerando parámetros como su presión, densidad y velocidad. Resulta valiosa en el desarrollo de motores, turbinas y sistemas de distribución hidráulica, por mencionar algunas aplicaciones. El presente análisis se enfoca en una tubería de agua que muestra una reducción del diámetro, lo que deviene en diferencias de presión a lo largo del sistema. El objetivo de este trabajo es conocer la efectividad de la CFD respecto de un sistema de ecuaciones basado en los principios de continuidad y de Bernoulli para encontrar las velocidades de entrada y salida tomando en cuenta los diámetros internos del conducto. Se realizó una simulación CFD de un modelo de flujo laminar en el software Fluent para desarrollar la solución del problema y posteriormente comparar las velocidades determinadas por dicha simulación contra la respuesta calculada mediante el sistema de ecuaciones. Se encontró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9 y una precisión promedio del 95.12 % en velocidad de entrada y 95.11 % en la de salida; dicha información se ilustra por medio de un gráfico de dispersión.

Palabras clave: ANSYS Fluent, CFD, dinámica computacional de fluidos, ecuación de Bernoulli, ecuación de continuidad, hidráulica.

Abstract

Computational fluid dynamics (CFD) is a tool that allows solving problems related to the behavior of a fluid within a given geometry, considering parameters such as fluid pressure, density and velocity. It is valuable in the development of engines, turbines and hydraulic distribution systems, to mention a few applications. This analysis focuses on a water pipeline that presents a reduction in diameter, resulting in pressure differences along the system. The objective is to gauge the effectiveness of CFD with respect to a system of equations based on the principles of continuity and Bernoulli's equation to find the inlet and outlet velocities taking into account the internal diameters of the pipe. A CFD simulation of a laminar flow model was performed in the Fluent software to develop the solution of the problem and then compare the velocities determined by the simulation against the response calculated by the afore mentioned system of equations. A coefficient of determination (R^2) of 0.9 was found and an average accuracy of 95.12% for inlet velocity and 95.11% for outlet velocity; this information is illustrated by means of a scatter plot.

Keywords: ANSYS Fluent, CFD, computational fluid dynamics, Bernoulli's equation, continuity equation, hydraulics.



Introducción

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta auxiliar en la solución de problemas y la simulación de escenarios complejos relacionados con la mecánica de fluidos. Aplica modelos matemáticos enfocándose en propiedades como la densidad, la velocidad y la presión a las que está sometido un fluido; además, su desarrollo requiere la generación de un enmallado que permita representar el movimiento de dicho elemento dentro de un espacio de interés [1]. Para tal fin, el enmallado debe contar con una forma geométrica que facilite la interacción del fluido con cada nodo del escenario [2]. Una vez que la calidad del enmallado es aceptable, el programa se suele alimentar con datos reales para simular el comportamiento del flujo, con base en principios físicos como la conservación de la masa, la energía y la cantidad de movimiento [3]. El software emplea dicha información para alcanzar una solución por medio de iteraciones.

Gracias a su versatilidad para recrear todo tipo de escenarios, se han realizado trabajos sobre el efecto del fuego en casas y edificios, dentro de los cuales destacan los de Roy y Matsagar [4], quienes simularon la distribución de las llamas en un muro de concreto; a su vez, Li *et al.* [5] simularon los aumentos de temperatura ocasionados por un incendio urbano para observar la dispersión de humo dentro de la estructura. En especial, Sun *et al.* [6] detallaron mediante la CFD la distribución térmica de un área en constante incineración, y utilizaron una cámara termográfica para monitorear la temperatura durante una prueba empírica con las mismas características; al final, registraron una similitud del noventa y cinco por ciento entre los datos reales y los simulados, demostrando la confiabilidad de este método para los análisis de distribución térmica.

Otro trabajo relacionado es el de Pucciarelli *et al.* [7], quienes revisaron los lineamientos generales en sistemas acoplados de control térmico. En su investigación efectuaron un análisis del comportamiento de un fluido que entra e interactúa con una estructura conformada por componentes independientes que, debido a su funcionamiento, actúan como una sola entidad. En su estudio, se realizan cálculos de velocidad y temperatura para demostrar la certeza de la CFD al predecir el comportamiento de un fluido dentro de geometrías complejas. Un análisis similar en el área de la termo-hidráulica es la de Min Seop Song *et al.* [8], el cual modela la geometría de un reactor APR1400 para evaluar las pérdidas de presión y los cambios de velocidad en el flujo del refrigerante empleado. Dicho estudio mostró que el caudal calculado por el código MARSKS era muy similar al que se predijo en la simulación CFD. En otra instancia, Singh y Joshi [9] aplicaron la CFD



para validar los códigos de termohidráulica de los sistemas de reactores comparando los resultados arrojados por el programa con las mediciones de un velocímetro real; sus datos fueron clave para optimizar el diseño de los reactores en búsqueda de mayor seguridad industrial. Dentro del campo de la hidráulica se encuentran investigaciones como la de Wei y Honra [10], quienes desarrollaron una técnica de simulación numérica para describir el campo de flujo al fondo de un pozo geotérmico; su meta fue detallar el comportamiento del fluido en sus tres estados para mejorar el diseño de sus canales de distribución y prolongar la vida útil de las brocas con que se perforan.

Cabe destacar que las aplicaciones de la CFD no se limitan a escenarios de pérdida de presión o velocidad; Quiroz Pérez y Lira Flores [11] emplearon la herramienta para modelar la dispersión de gases en una planta química. Como se puede observar, este método facilita la simulación de fenómenos, siempre y cuando se tenga una visión clara de cómo aplicarlo, qué principios utilizar y datos que permitan la validación de los resultados, por lo que es imprescindible auditar su precisión. Así, el presente trabajo busca cuantificar la variación que existe entre una simulación CFD y los cálculos obtenidos por el método analítico en una tubería que presenta cambios en su diámetro.

Metodología

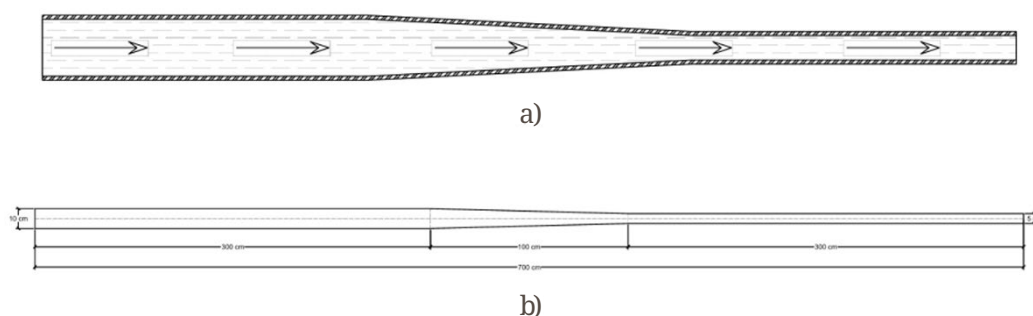
Geometría

Las simulaciones CFD requieren de una base de datos con las cuales evaluar la confianza de los resultados arrojados. Sergeev *et al.* [12] recomiendan que los datos en estudios comparativos provengan de geometrías simples que ilustren el comportamiento del fluido en los puntos de interés. En esta línea, Aridi *et al.* [13] añaden que las geometrías deben tener longitudes grandes de modo que los cambios de velocidades sean más claros. En la presente se trabaja con una tubería larga comúnmente empleada en los sistemas de distribución hidráulicos (Figura 1a). El conducto consta de tres secciones: una de 50 cm de longitud y 10 cm de diámetro, una de 100 cm con reducción diametral constante de 10 a 5 cm, y un tramo restante de 50 cm con un diámetro de 5 cm (Figura 1b). Esta tubería tiene una presión inicial de 90 kPa y final de 70 kPa.


FIGURA 1.

Dirección del flujo y propiedades geométricas del elemento de estudio.

Fuente: elaboración propia.



Ecuaciones teóricas

Para obtener los datos del modelo teórico, se parte del estudio de Taur *et al.* a [14], quien utiliza la ecuación de continuidad (1) para conocer la velocidad de bombeo de un corazón humano. La ecuación indica que la cantidad de flujo volumétrico es igual en el punto inicial y el punto final sin importar los cambios geométricos, como la variación de los diámetros del sistema. En ella, se describe que el producto de la velocidad de entrada de un fluido (V_i) por el área por la que se infiltra al conducto (A_i) equivalen al producto de la velocidad de salida (V_j) por el área que atraviesa al salir (A_j).

$$V_i A_i = V_j A_j \quad (1)$$

Dado que para este problema solo están disponibles los datos de presión y área, fue menester calcular las velocidades de entrada y salida por medio de la combinación de la Ecuación 1 con la ecuación de Bernoulli (2) [15] para articular el sistema de ecuaciones necesario.

$$p_i + \rho g h_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 = p_j + \rho g h_j + \frac{1}{2} \rho v_j^2 \quad (2)$$

Donde:

- p_i presión inicial
- ρ densidad
- g gravedad
- h_i altura
- v_i velocidad inicial
- p_j presión final
- ρ densidad
- g gravedad
- h_j altura final
- v_j velocidad final

A continuación, se despeja la velocidad inicial en ambas ecuaciones (1 y 2):



$$v_i = \frac{v_j A_j}{A_i} \tag{3}$$

$$v_i = \sqrt{\frac{2(p_j - p_i)}{\rho} + v_j^2} \tag{4}$$

Se utilizó el sistema formado por las Ecuaciones 3 y 4 para calcular las velocidades inicial y final del sistema propuesto en 1a. Los datos con los que se llevaron a cabo los cálculos se muestran en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

TABLA 1.

Valores de (1).

Fuente:
elaboración propia.

	UNIDADES	VALORES
Velocidad inicial	m/s	1.634
Velocidad final	m/s	6.537
Área inicial	m ²	0.007854
Área final	m ²	0.001963

TABLA 2.

Valores de (2)

Fuente:
elaboración propia..

	UNIDADES	VALORES
Presión inicial	Pa	80 000
Presión final	Pa	60 000
Velocidad inicial	m/s	1.634
Velocidad final	m/s	6.537
Altura inicial con respecto a un punto base	m	1
Altura final con respecto a un punto base	m	1
Densidad	kg/m ³	998.2
Área final	m/s ²	9.81



Modelo de CFD

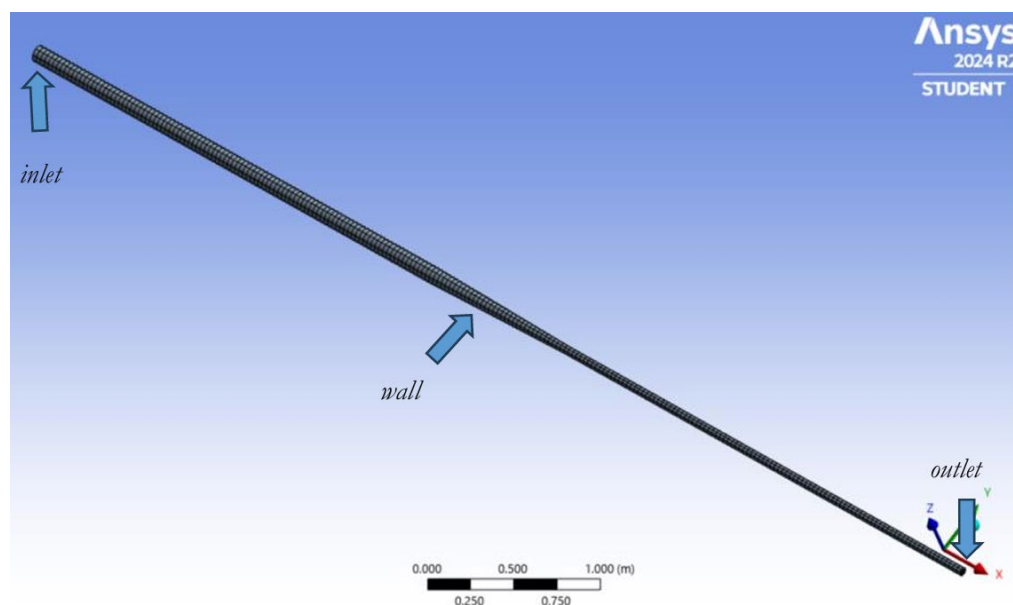
Se recurrió al software ANSYS Fluent, el cual ha sido utilizado anteriormente en investigaciones similares con desempeños satisfactorios [11]. El proceso comenzó con la generación de la geometría, seguido del trazado del enmallado y la configuración del modelo; en últimas, se analizaron los resultados.

Para la creación del modelo geométrico, se delineó un boceto tridimensional en SpaceClaim a partir de las dimensiones mostradas en la Figura 1b. Una vez terminado esto, se procedió a la aplicación del enmallado en ANSYS, colocando las condiciones de frontera al extremo de mayor diámetro (*inlet*), al extremo con diámetro reducido (*outlet*) y a todo el cuerpo de la tubería (*wall*) (Figura 2). Se adoptó la propuesta de enmallado generada por el programa, debido a su forma simple y constante.

FIGURA 2.

Enmallado y ubicación de límites de frontera del element de estudio.

Fuente: elaboración propia.

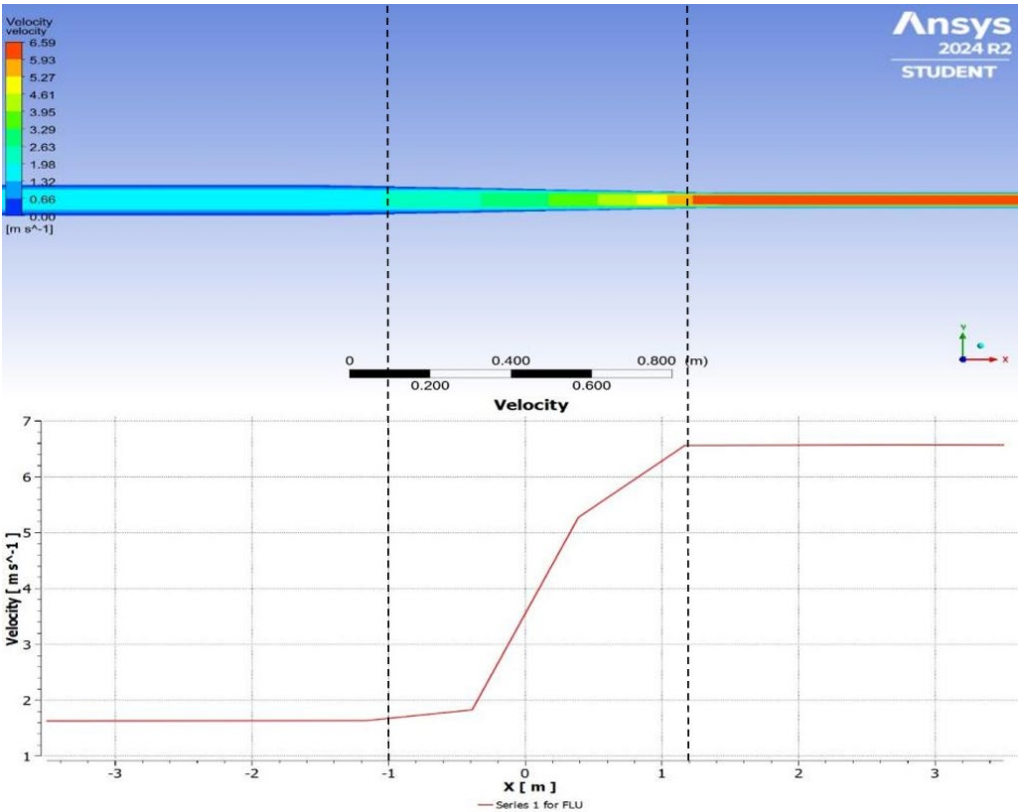


El modelo generado se exportó a la aplicación Fluent, donde se le asignaron los valores predeterminados del software. En cuanto a la especificación del modelo matemático a utilizar, se optó por el de flujo laminar libre de turbulencias puesto que es recomendable para problemas de tuberías constantes sin cambios drásticos de dirección, mientras que el modelo turbulento se sugiere en los casos donde sí existen cambios importantes [16]. Dentro del software se asignó una presión de 90 kPa en el *inlet*, de 70 kPa en el *outlet* y ningún movimiento en el *wall*. Respecto a los materiales, se seleccionó el agua en estado líquido como fluido para el cuerpo interno de la estructura, con las propiedades que el programa tiene cargadas en su biblioteca por defecto. En lo que concierne a la composición del cuerpo de la tubería, se escogió la opción de aluminio. Por ende, para calcular la solución en ANSYS,



se crearon reportes gráficos de las velocidades de entrada y salida del sistema (Figura 3).

FIGURA 3.
Gráficos de velocidad de la simulación CFD.
Fuente: elaboración propia.



Como se puede observar, la velocidad se mantiene constante al inicio. Sin embargo, a medida que el diámetro de la tubería disminuye, la velocidad aumenta progresivamente hasta estabilizarse en una velocidad mayor de salida, superior a la de entrada.

Resultados y discusión

Una vez adquiridos el modelo teórico y el modelo CFD, se procedió a realizar una comparación entre las velocidades calculadas con el sistema de ecuaciones y con las simulaciones. Se registró una similitud del 95.12 % para el *inlet* y del 95.14 % para el *outlet*. En seguida, para verificar la alta correlación entre ambas técnicas, se utilizó la misma geometría para calcular el comportamiento del fluido en distintos escenarios a diferentes presiones de entrada y salida. De ese modo, se recopiló una cantidad mayor de muestras, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.

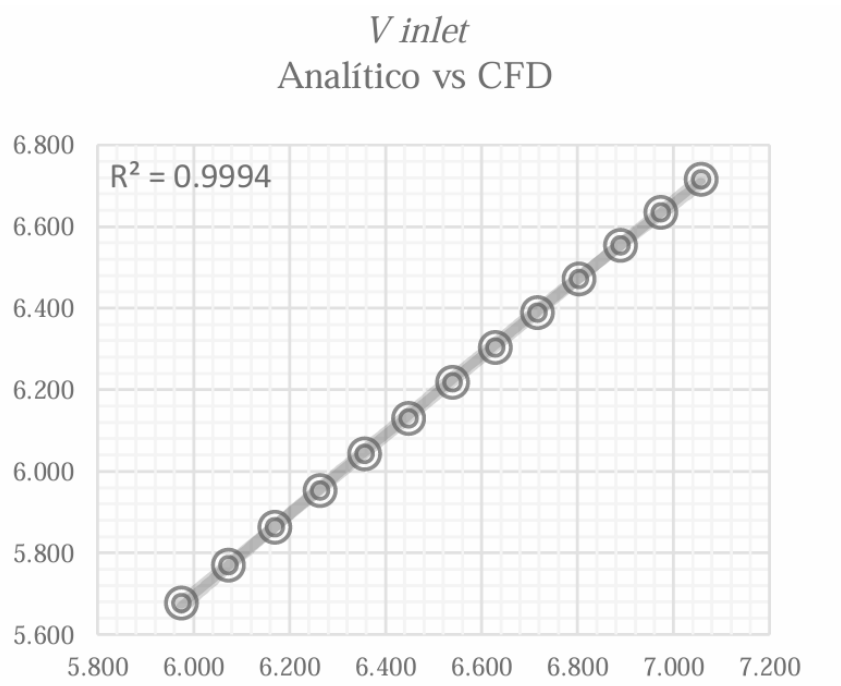


TABLA 3.
Cuadro comparativo
de velocidades obtenidas
de forma analítica
y por simulación CFD.
Fuente:
elaboración propia.

CONDICIONES DE FRONTERA		MÉTODO ANALÍTICO		SIMULACIÓN		CONFIABILIDAD	
PINLET [PA]	POUTLET [PA]	VINLET [M/S]	VOUTLET [M/S]	VINLET [M/S]	VOUTLET [M/S]	% INLET	% OUTLET
29700.00	53000.00	7.057	1.764	6.718	1.679	95.20	95.17
34750.00	57500.00	6.973	1.743	6.637	1.659	95.18	95.17
39800.00	62000.00	6.888	1.722	6.556	1.639	95.18	95.18
44850.00	66500.00	6.802	1.701	6.473	1.618	95.16	95.15
49900.00	71000.00	6.715	1.679	6.390	1.597	95.16	95.13
54950.00	75500.00	6.627	1.657	6.305	1.576	95.14	95.12
60000.00	80000.00	6.538	1.634	6.219	1.555	95.12	95.14
65050.00	84500.00	6.447	1.612	6.132	1.533	95.11	95.11
70100.00	89000.00	6.356	1.589	6.044	1.511	95.10	95.10
75150.00	93500.00	6.262	1.566	5.955	1.488	95.09	95.04
80200.00	98000.00	6.168	1.542	5.864	1.466	95.07	95.07
85250.00	102500.00	6.072	1.518	5.772	1.443	95.06	95.06
90300.00	107000.00	5.974	1.494	5.678	1.419	95.04	95.01

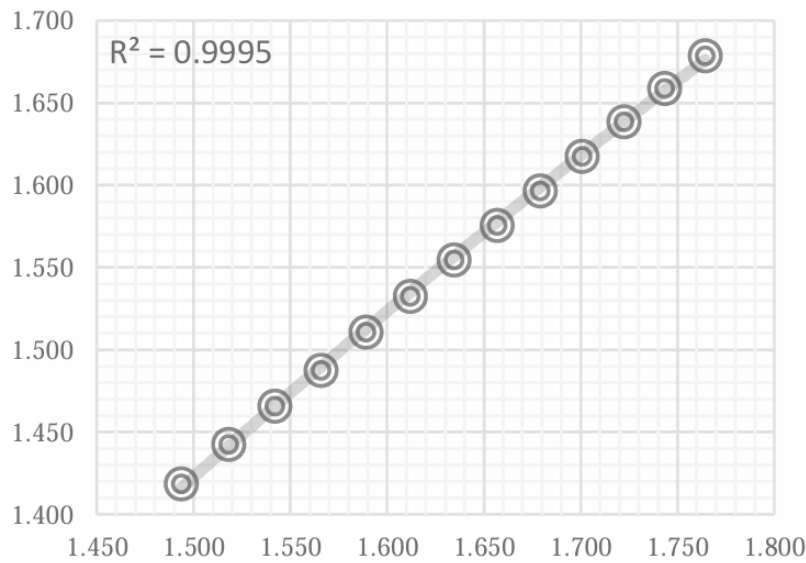
Estos datos se representaron en gráficos de dispersión para facilitar su visualización y análisis (Figura 4).

FIGURA 4.
Gráficos comparativos
de velocidad.
Fuente:
elaboración propia.





V_{outlet} Analítico vs CFD



Es evidente que los datos no se encuentran muy alejados, de hecho, se aprecia una tendencia lineal. Para corroborarla se calculó en ambas comparativas el coeficiente de determinación (R^2), el cual muestra el grado de ajuste de los datos. Se obtuvo un R^2 de 0.9994 y 0.9995 para las velocidades de entrada y de salida, respectivamente; un coeficiente tan cercano a uno significa que el modelo computacional es capaz de predecir comportamientos muy similares a los que se obtendrían por medio de un sistema de ecuaciones, y que las variaciones entre ambos conjuntos de datos son relativamente pequeñas, como las mostradas en la Tabla 3. Lo anterior es interesante, puesto que este tipo de análisis se ha realizado también con pruebas experimentales y se han obtenido resultados análogos. Además, se verificaron los datos finales calculando el promedio de la similitud en la Tabla 1: 95.12 % para las velocidades de entrada y 95.11 % para las de salida.

Conclusiones

Los resultados mostraron que las simulaciones CFD pueden tener variaciones mínimas en comparación con los métodos analíticos, con una precisión del 95 % en esta investigación de caso; es decir, hay un alto grado de confiabilidad para estas herramientas computacionales. Al igual que en estudios previos relacionados, se constató un alto grado de similitud entre ambos modelos, lo que indica que existe poca variación entre los valores obtenidos por ambos métodos. En otras palabras, los modelos CFD son confiables para la solución de problemas de fluidos en geometrías simples sin cambios drásticos en la dirección del fluido. Cabe resaltar que se aprecia una li-



gera variación, lo que apunta a que posiblemente los instrumentos CFD consideran más especificaciones del fluido para dar cuenta de las pequeñas pérdidas en el sistema. Se concluye entonces que la herramienta de dinámica de fluidos computacional puede ser de gran utilidad para la solución de problemas [13], [17], pues genera hallazgos confiables.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnologías e Innovación (SECIHTI) por el apoyo a esta investigación, a los diferentes revisores que, con sus observaciones, enriquecieron la calidad de este artículo y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, pues de no ser por sus programas de becas sería imposible realizar este tipo de trabajos.

Referencias

- [1] M. Kisiel y D. Szpica, "Evaluating influence of CFD mesh on flow characteristics of pneumatic brake valve differential section", *23rd International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, 2024, doi: 10.22616/ERDev.2024.23.TF040
- [2] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, 2 ed, Inglaterra; Nueva York: Pearson Education Ltd., 2007.
- [3] M. Hafiz *et al.*, "A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD)", en *GREEN DESIGN AND MANUFACTURE: ADVANCED AND EMERGING APPLICATIONS: Proceedings of the 4th International Conference on Green Design and Manufacture 2018*, Ho Chi Minh, Vietnam, 2018, art. 020252, doi: 10.1063/1.5066893
- [4] T. Roy y V. Matsagar, "Mechanics of damage in reinforced concrete member under post-blast fire scenario", *Structures*, vol. 31, pp. 740-760, 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.02.005
- [5] T. Li *et al.*, "Large presence of bromine and toxic metals in ambient fine particles from urban fires", *Atmospheric Environment*, vol. 295, art. 119554, 2023, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119554
- [6] B. Sun, K. Guo y V. K. Pareek, "Computational fluid dynamics simulation of LNG pool fire radiation for hazard analysis", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 29, pp. 92-102, 2014, doi: 10.1016/j.jlp.2014.02.003
- [7] A. Pucciarelli *et al.*, "Coupled system thermal Hydraulics/CFD models: General guidelines and applications to heavy liquid metals", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 153, art. 107990, 2021, doi: 10.1016/j.anucene.2020.107990
- [8] M. Seop Song, I. Woong Park, E. Soo Kim y Y. Lee, "Numerical study on thermal-hydraulics of external reactor vessel cooling in high-power reactor using MARS-KS1.5 code: CFD-aided estimation of natural circulation flow rate", *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 54, núm. 1, pp. 72-83, 2022, doi: 10.1016/j.net.2021.07.037
- [9] R. K. Singh y V. M. Joshi, "Validation of CFD and Thermal Hydraulics Codes by Digital Particle Image Velocimetry", *Energy Procedia*, vol. 7, pp. 650-652, 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.06.087
- [10] L. Wei y J. Honra, "Computational Fluid Dynamics Study on Bottom-Hole Multiphase Flow Fields Formed by Polycrystalline Diamond Compact Drill Bits in Foam Drilling", *Fluids*, vol. 9, núm 9, 2024, doi: 10.3390/fluids9090211
- [11] E. Quiroz Pérez y J. A. de Lira Flores, "Una revisión sobre el papel de la Dinámica Computacional de Fluidos en el análisis de la dispersión de gases tóxicos en plantas químicas", *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 7, núm. 13, 2024, doi: 10.61820/pct.v7i13.1351
- [12] V. Sergeev, N. Vatin, E. Kotov, D. Nemova y S. Khorobrov, "Slug Regime Transitions in a Two-Phase Flow in Horizontal Round Pipe. CFD Simulations", *Applied Sciences*, vol. 10, núm. 23, 2020, doi: 10.3390/app10238739
- [13] R. Aridi, S. Ali, T. Lemenand, J. Faraj y M. Khaled, "CFD analysis on the spatial effect of vortex generators in concentric tube heat exchangers - A comparative study", *International Journal of Thermofluids*, vol. 16, art. 100247, 2022, doi: 10.1016/j.ijft.2022.100247
- [14] L. S. Taura, I.B.Ishiyaku y A.H. Kawo "The use of a continuity equation of fluid mechanics to reduce the abnormality of the cardiovascular



system: A control mechanics of the human heart", *Journal of Biophysics and Structural Biology*, vol. 4, núm. 1, pp. 1-12, 2012, doi: 10.5897/JBSB11.010

- [15] M. E. Saleta, D. Tobia y S. Gil, "Experimental study of Bernoulli's equation with losses", *American Journal of Physics*, vol. 73, núm. 7, pp. 598-602, 2005, doi: 10.1119/1.1858486
- [16] P. Wyszynski y R. Porowski, "Analysis of combustion models of hydrogen-air mixtures using ANSYS FLUENT", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2812, núm. 1, art. 012016, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2812/1/012016
- [17] P. Kusriantoko, P. F. Daun y K. E. Einarsrud, "A Comparative Study of Different CFD Codes for Fluidized Beds", *Dynamics*, vol. 4, núm. 2, pp. 475-498, 2024, doi: 10.3390/dynamics4020025



Determinación del módulo tangencial en probetas recubiertas con polipirrol

Torsion tests on polypyrrole-coated specimens: an approach to its mechanical characterization

-  Christopher René Torres San Miguel¹
 Juan Carlos Axayácatl Morales Guadarrama²
 Carlos Alberto Espinoza Garcés^{1*}

¹ Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

² Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México

* cespinozag0700@alumno.ipn.mx

02

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

C. R. Torres San Miguel, C. A. A. Morales Guadarrama y C. A. Espinoza Garcés, "Determinación del módulo tangencial en probetas recubiertas con polipirrol," *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 8, no. 15, pp.18-31, 2025.



Resumen

El novedoso uso de polímeros conductores, como el polipirrol (PPy), en aplicaciones médicas representa una solución alternativa para escenarios donde la funcionalidad motora y sensorial del cuerpo humano se ve comprometida. Sus propiedades mecánicas están condicionadas por la metodología de síntesis empleada para obtener el polímero. Estudios muestran una variación del módulo elástico que va desde 96 kPa mediante síntesis química hasta 2.41 MPa mediante electropolimerización. La presente desarrolla un enfoque para la caracterización de las propiedades mecánicas del

polipirrol generado por síntesis química. Se ensayaron bajo torsión muestras de PLA recubiertas con PPy y se comparó su comportamiento con el de probetas de ácido poliláctico (PLA) sin modificar. Los diagramas de tensión-deformación de ambos conjuntos de muestras fueron similares. Si bien los valores del módulo tangencial del PLA puro (340 MPa) y el recubierto con PPy (288 MPa) denotan una clara diferencia, la variación se atribuye a factores como el bajo espesor del recubrimiento y las holguras en el área transversal de las muestras de PLA impresas en 3D.

Palabras clave: ASTM E143, módulo de elasticidad transversal, polipirrol, propiedades mecánicas, síntesis química, torsión.

Abstract

The innovative use of conductive polymers, such as polypyrrole (PPy), in medical applications represents an alternative solution for scenarios where the motor and sensory functionality of the human body is compromised. Their mechanical properties are determined by the synthesis methodology utilized to obtain the polymer. Studies show a variation in the elastic modulus ranging from 96 kPa through chemical synthesis up to 2.41 kPa through electropolymerization. This study develops an approach for characterizing the mechanical properties of polypyrrole generated by chemical

synthesis. Polylactic acid (PLA) samples coated with PPy were tested under torsion, and their behavior was compared with that of unmodified PLA specimens. The stress-strain diagrams of both sets of samples were similar. Although the values of the shear modulus for pure PLA (340 MPa) and PPy-coated PLA (288 MPa) show a clear difference, the variation is attributed to factors such as the low thickness of the coating and the porosity in the cross-sectional area of the 3D-printed PLA samples.

Keywords: ASTM E143, transverse elastic modulus, polypyrrole, mechanical properties, chemical synthesis, torsion.



Introducción

El polipirrol (PPy) es un polímero de alta conductividad cuyas propiedades se aprovechan en la fabricación de sensores, supercapacitores y baterías [1]. Debido a su capacidad de actuar como ion selectivo de membranas, así como su fácil síntesis y biocompatibilidad, es una gran alternativa en aplicaciones biomédicas, como ingeniería de tejidos o biosensores [3]. Las películas delgadas de polipirrol polimerizado por plasma pueden emplearse como elemento de andamiaje en lesiones de médula espinal, con el objetivo de evaluar la reconexión neuronal y la recuperación de funciones motoras y sensoriales [2].

Las técnicas empleadas para la síntesis de polipirrol (PPy) se agrupan en dos categorías: los métodos físicos, como la erosión láser pulsada y la deposición por vapor en vacío; y, los químicos, entre los que destacan la reducción química, la electropolimerización y la microemulsión [4]. Si bien la electropolimerización es la vía más común debido a que facilita el control sobre el espesor del material, hay un método alternativo por plasma que puede, además, aumentar la pureza y el control sobre la dependencia eléctrica, la termodinámica y la condición de las especies químicas, aunque no clarifica del todo la cinética de la reacción [5].

La mayoría de las investigaciones acerca del PPy se centran en la caracterización morfológica de la macromolécula y sus propiedades mecánicas; por ejemplo, se han registrado incrementos en la rigidez estructural de poliglicerol dopadas con PPy, donde la aproximación mecánica del módulo de elasticidad fue de aproximadamente 96 kPa [6]. Por otro lado, los resultados respecto a la medición del módulo de elasticidad en materiales compuestos en función de la proporcionalidad de la masa del monómero de pirrol oscilan de 1.41 a 2.73 GPa [7]. Asimismo, se ha observado que las propiedades mecánicas de películas de PPy sintetizadas por electropolimerización varían en diferentes solventes: el módulo de elasticidad puede alcanzar valores de 2.41 kPa al utilizar soluciones de agua y etilenglicol, así como soluciones acuosas de acetonitrilo y etilenglicol [8]. No obstante cada estudio mencionado se centra en PPy electropolimerizado, y hasta el momento se han reportado pocos ensayos mecánicos de nanoindentación [9] para la caracterización de películas de PPy sintetizadas por plasma.

En ese sentido, se propone un método indirecto para calcular los esfuerzos y el módulo tangencial del PPy. Para tal fin, se imprimieron en 3D probetas en ácido poliláctico (PLA); tras lo cual, se recubrieron con una capa de polipirrol sintetizado por reducción química y se les realizaron ensayos de torsión acorde a la normativa ASTM E143 [11]. También se efectuaron pruebas a un conjunto de muestras de control sin recubrimiento polimérico. A partir de la comparación de los diagramas esfuerzo-de-

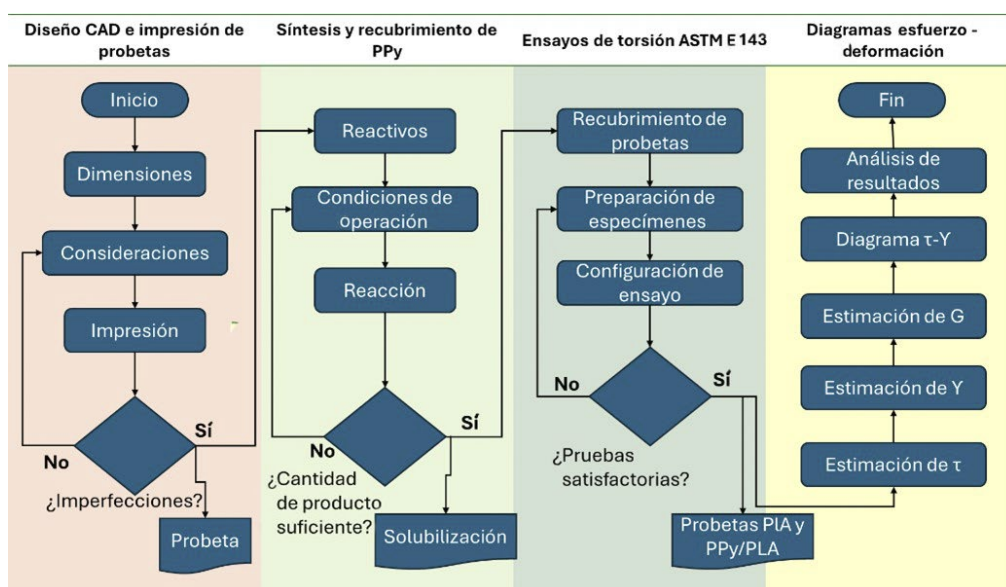


formación resultantes de los ensayos, se cuantificaron las características mecánicas del polipirrol con base en su efecto sobre el comportamiento del PLA.

Materiales y métodos

Se desarrolló un diseño experimental para determinar el módulo tangencial de probetas de PLA recubiertas con polipirrol. Con el objetivo de evaluar las diferencias en las propiedades físicas atribuibles a dicho polímero, se llevaron a cabo ensayos de torsión sobre muestras de material con y sin recubrimiento de PPy. Los procesos involucrados en cada etapa de la experimentación se describen de manera general en el diagrama de flujo de la Figura 1. En seguida, se detalla cada paso en las secciones subsecuentes.

FIGURA 1.
Diagrama de flujo de las etapas experimentales.
Fuente: elaboración propia.



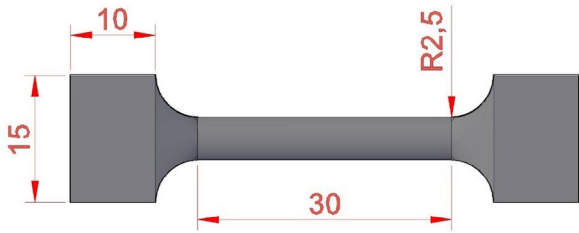
Diseño CAD e impresión de probetas

Se siguieron las indicaciones para la caracterización de especímenes establecidas en el método de prueba estándar para ensayos de torsión ASTM E143. La norma estipula que los materiales deben estar libres de imperfecciones, como fisuras o ci-zalladuras, deben tener forma cilíndrica y mantener un radio constante y una longitud de, al menos, dos veces el diámetro. Como adición, el diseño de las muestras evaluadas incorpora un cabezal de sujeción compatible con ambas mordazas de la máquina en la cual se desarrollaron los ensayos. De ese modo, las probetas se sujetan por los extremos en las terminales del equipo y el ensayo de torsión se enfoca en la sección cilíndrica. Cada una está constituida en por partes, el segmento cilíndrico: cuyo diámetro es de 5 mm y su longitud de 30 mm, y los segmentos de mordaza, los

cuales poseen una geometría rectangular de 15 mm de largo por 10 mm de ancho y 5 mm de espesor (Figura 2).

FIGURA 2.
Dimensiones de las probetas de PLA.

Fuente: elaboración propia.



Las propiedades mecánicas generales del PLA están descritas en la Tabla 1. La configuración de la impresión 3D incluye tres parámetros principales: el porcentaje de relleno en la probeta, la textura del acabado y la inclusión (o exclusión) de soportes de impresión; cada uno influye directamente en la calidad y el tiempo de impresión, así como en la medición de los esfuerzos tangenciales. Para efectos del estudio se estableció un 100 % de relleno en las probetas y dos escenarios posibles: el primero sin recubrimiento de PPy ni soportes de impresión; el segundo con recubrimiento y soportes (Figura 3). La cantidad de especímenes por bloque de prueba fue de seis probetas, para dar un total de 12 ensayos.

TABLA 1.
Propiedades mecánicas del PLA [10].

Fuente: elaboración propia.

PROPIEDAD	
Densidad	1.2 [g/cm³]
Último esfuerzo	27 [MPa]
Deformación Máxima	200 %
E	3000 [MPa]

FIGURA 3.
Probetas de PLA:
a) sin recubrimiento de PPy
b) con recubrimiento de PPy.

Fuente: elaboración propia.



a)



b)



Síntesis y recubrimiento de PPy

El polipirrol para los ensayos de torsión se sintetizó con la metodología de polimerización química. La síntesis considera como puntos de partida:

- Reactivos: monómero de pirrol al 98 % de pureza y persulfato de amonio al 98 % como agente oxidante.
- Condiciones de operación de la reacción: 22 °C y agitación constante.

El procedimiento se llevó a cabo en un vaso de precipitados, mezclando en proporciones equimolares el monómero de pirrol y el agente oxidante (0.1 M) en 100 ml de agua destilada a baja temperatura para regular la reacción exotérmica. Después, se mantuvo la mezcla en agitación constante en una balanza magnética durante cuatro horas, tras las cuales el producto condensado se lavó con etanol. La Figura 4 ilustra de manera general el proceso.

FIGURA 4.

Síntesis química del PPy:

- reacción de polimerización
- filtración
- PPy.

Fuente: elaboración propia.



a)



b)



c)

A la postre, se solubilizó el polímero a fin de nebulizarlo y aplicarlo por aerografía a las probetas de PLA. Cabe señalar que en esta etapa se desestimó el espesor de la película de PPy depositada. Por tal motivo, dicha variable fue descartada en el análisis de los ensayos. Esta limitación se asumió con el objetivo de examinar, de manera preliminar, la variación experimental en la estimación del módulo tangencial en presencia del recubrimiento polimérico.

Ensayos de torsión ASTM E143 y resultados

La ASTM E143 contempla cinco pasos para realizar una prueba exitosa. El primero consiste en la medición de la probeta de ensayo para garantizar que la sección transversal de estudio se mantenga geométricamente constante, sin variaciones en el diámetro. El segundo atañe a la alineación de la probeta con la máquina de



ensayos, de manera que esté apropiadamente centrada. El tercero refiere a la programación del torque y ángulo de giro aplicados, los cuales deben registrarse constantemente. El cuarto hace alusión a la velocidad de ensayo, la cual debe mantenerse lo bastante alta para ser legible. El paso final apunta al registro de la variación de temperatura durante el ensayo.

Al respecto, la caracterización de las propiedades mecánicas del PPy por medio de la superposición de diagramas esfuerzo-deformación en pruebas de torsión representa una solución suplementaria ante la escasez de macromodelos o la baja productividad del material en cuestión. Dado que el espesor del recubrimiento puede alterar significativamente el comportamiento de la probeta de PLA durante el ensayo a torsión, existe la posibilidad de establecer las bases para valorar las propiedades del material de recubrimiento.

La expresión matemática por la cual se estima el esfuerzo angular está descrita por la Ecuación 1:

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (1)$$

Donde:

τ esfuerzo cortante (Pa)

T torque (N • m)

r radio de la probeta (m)

J momento polar de inercia (m⁴)

A su vez, la deformación unitaria angular se rige por la Ecuación 2:

$$\gamma = \frac{r\theta}{L} \quad (2)$$

Donde:

γ deformación unitaria angular (adim)

r radio de la probeta (m)

θ ángulo de giro (rad)

L longitud de la probeta (m)

En últimas, el módulo de elasticidad tangencial se estima en función del área de la sección transversal, la longitud y el comportamiento sobre la zona elástica del diagrama esfuerzo-deformación (Ecuación 3).

$$G = \frac{TL}{J\theta} \quad (3)$$



Donde:

G módulo tangencial del material

T torque aplicado en la probeta ($N \cdot m$)

L longitud de la probeta (m)

J momento polar de inercia (m^4)

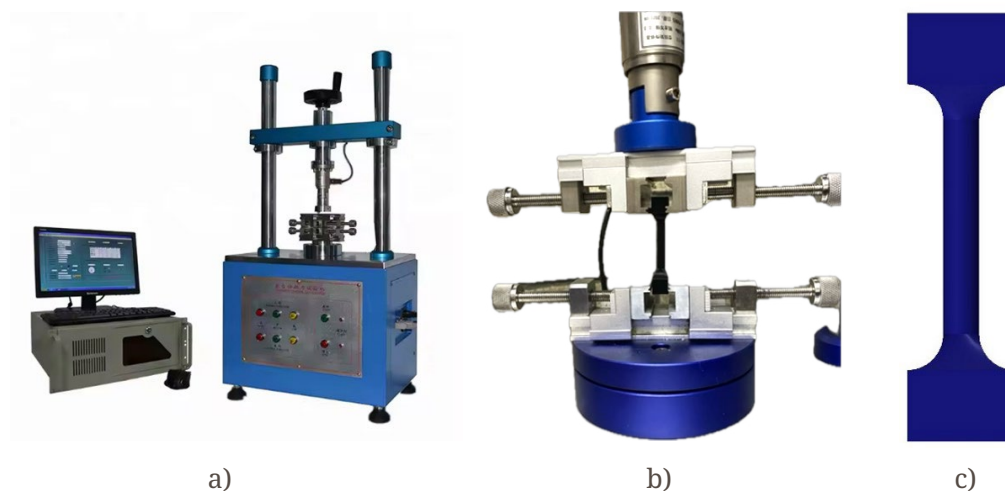
θ ángulo de giro (rads)

Como siguiente paso, se superpusieron los diagramas esfuerzo-deformación para determinar si existen diferencias significativas en las propiedades mecánicas de ambos materiales. Las pruebas se realizaron en una máquina de torsión modelo NG-203 de la marca Guangdong, cuyas características principales integran un máximo par de $500 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$, con rango de velocidad angular de 6 a $1500^\circ/\text{min}$ a una resolución de 0.1° (Figura 5). Se consideró el comportamiento ideal del material: isotrópico, homogéneo y lineal; asimismo, se definió una velocidad de giro de $100^\circ/\text{min}$ para el ensayo.

FIGURA 5.

Equipamiento para ensayos a torsión:
a) equipo de torsión
b) montaje de probeta
c) probeta de PLA.

Fuente:
elaboración propia.

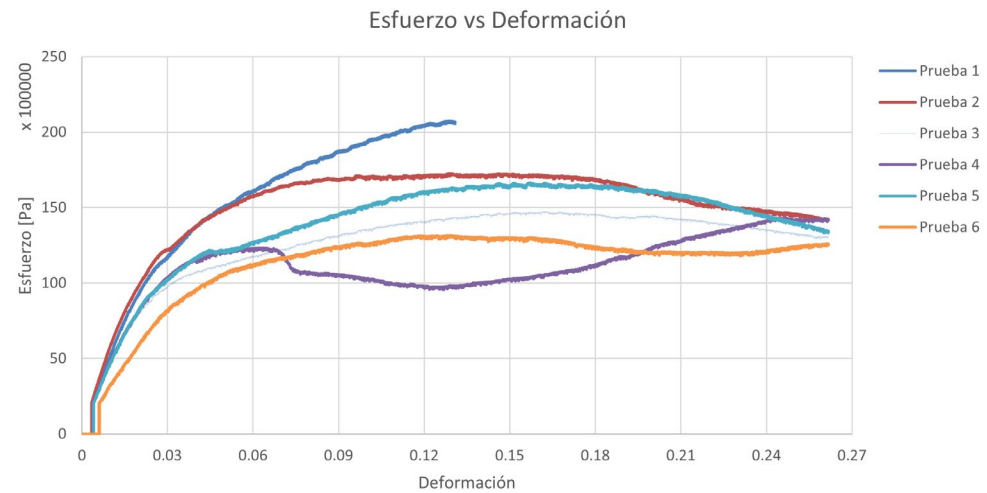


Resultados y discusión

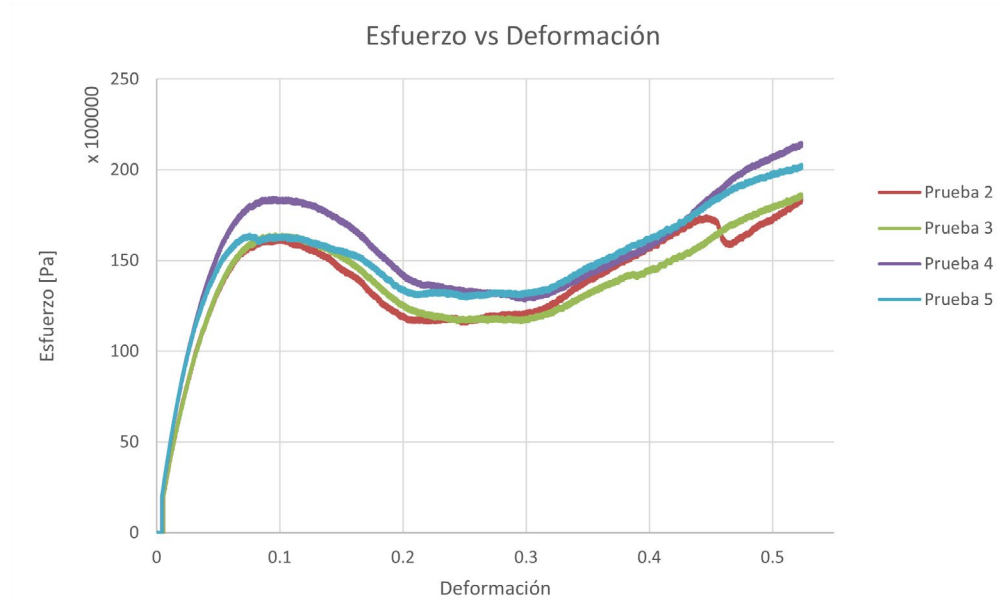
El diseño experimental de las pruebas constó de dos bloques de seis probetas cada uno, los cuales se sometieron a ensayos de torsión. El primer bloque contenía muestras de PLA puro; el segundo bloque, con recubrimiento de PPy. Los diagramas esfuerzo-deformación correspondientes a cada conjunto de pruebas están ilustrados en la Figura 6.



FIGURA 6.
Diagramas
esfuerzo-deformación:
a) PLA
b) PLA/PPy.
Fuente:
elaboración propia.



a)



b)

En los diagramas es posible identificar las intersecciones de esfuerzo y deformación donde el comportamiento de las probetas deja de ser lineal. Este argumento será clave para la estimación de los módulos de elasticidad tangencial del PLA puro y el recubierto con PPy. Asimismo, los valores característicos de los límites de proporcionalidad (LP), el valor máximo del módulo de elasticidad (VEM) y el valor máximo de deformación (VMD) para cada bloque de pruebas están descritos en la Tabla 2.

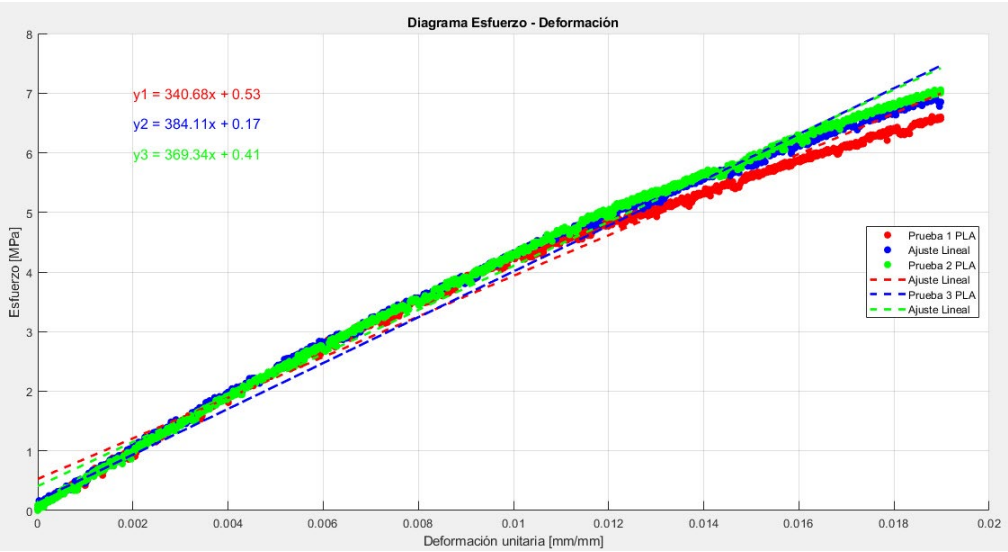


TABLA 2.
Valores de los límites de proporcionalidad (LP), módulo de elasticidad (VEM) y deformación (VMD) de los bloques de prueba.
Fuente: elaboración propia.

BLOQUE DE PRUEBA	LP	VEM	VMD
	E (MPa)	E _{max} (MPa)	D _{max}
PLA	50-65	150-170	0.25
PLA / PPy SS SP	80-100	140-170	0.5

Para realizar la superposición de los diagramas de esfuerzo-deformación se tomaron en cuenta los ensayos que denotaban una similitud en el desarrollo. Sin embargo, ambos bloques (Figura 7) mostraron un comportamiento muy similar, en particular los primeros valores, los cuales representan la zona elástica del material. Las diferencias entre los diagramas esfuerzo-deformación, su regresión lineal y el valor del módulo tangencial estimado mediante la Ecuación 3 se debieron probablemente a la falta de relleno en las probetas de PLA y al espesor del recubrimiento en las probetas de PLA/PPy. Por otra parte, el módulo de elasticidad de ambos materiales se estimó analíticamente tomando pares de valores de carga-deformación angular (considerando el comportamiento elástico). La Tabla 3 agrupa los valores del módulo tangencial: los estimados con base en el diagrama esfuerzo-deformación contra los calculados de forma analítica. Se consideraron al menos tres ensayos en los que la repetitividad se asemeja, descartando aquellos cuyo valor de módulo de elasticidad no concordaban con la totalidad de pruebas.

FIGURA 7.
Esfuerzo-deformación de los bloques de prueba:
a) PLA
b) PPy.
Se muestran los ajustes lineales en la zona elástica.
Fuente: elaboración propia.



a)

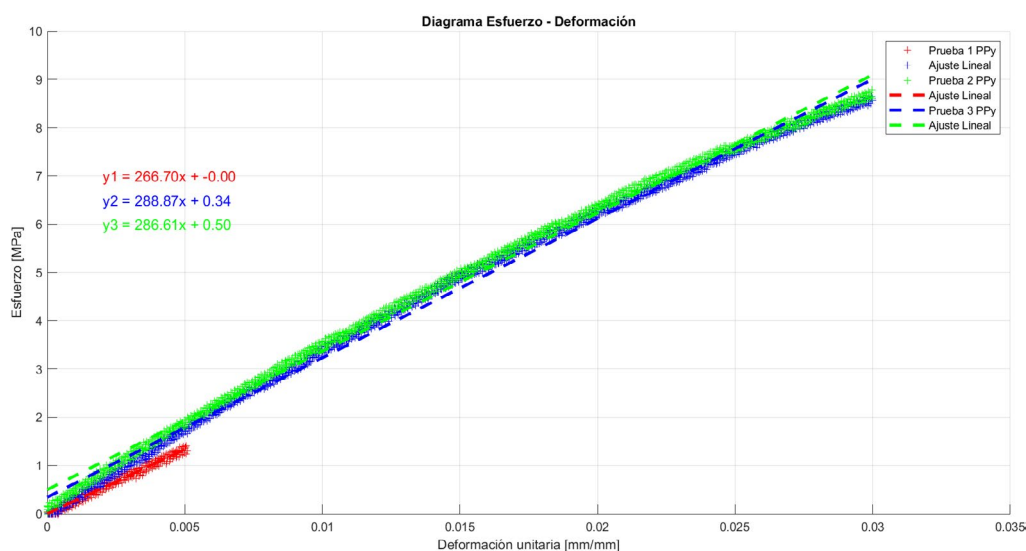


TABLA 3.
Módulo tangencial.
Estimación analítica vs gráfica.
Fuente:
elaboración propia.

	ESTIMACIÓN ANALÍTICA [MPa]	ESTIMACIÓN GRÁFICA [MPa]
PLA	517.6	340.68
	509.83	
	516.4	358.75
	516.9	
	523.12	369.36
	532.24	
PLA / PPy	337.53	288.65
	340	
	345.7	286.61
	346.72	
	352.14	269.74
	359.15	

Es importante reconocer que la caracterización de las propiedades mecánicas del PPy bajo estas condiciones de síntesis y metodología de recubrimiento no son óptimas. La adhesión superficial del PPy falla en brindar mayor resistencia ni debilita la probeta, debido a la prevalencia del PLA. En otras palabras, se requiere una mayor cantidad de recubrimiento polimérico para asegurar que los resultados de las pro-



betas PLA/PPy no reflejen el comportamiento del material de control. Por otra parte, si se asegurase un espesor constante de PPy a lo largo de la probeta, existe la posibilidad de que la separación entre las secciones elásticas de ambos diagramas de esfuerzo-deformación sea mayor. Asimismo, la influencia de un porcentaje menor de relleno tampoco fue significativa, ya que las propiedades del PLA imperan durante el estudio. No obstante, es posible que la metodología ofertada mejore si se incluyen parámetros alternativos en el diseño de la probeta que favorezcan la caracterización del polímero, tales como un acabado que beneficie la adherencia del polímero (por ejemplo, uno texturizado) o un relleno interno definido mediante un arreglo estructural.

Ahora bien, hay que destacar que la discordancia entre las pendientes de los diagramas esfuerzo-deformación podría deberse a las diferencias en la constitución interna de las probetas ensayadas. Pero también, la que existe entre las estimaciones analítica y gráfica del módulo tangencial se debe a que los datos en la zona elástica se procesan de manera diferente: el método analítico evalúa un punto de la zona elástica, mientras que la pendiente de ajuste del método gráfico se traza de acuerdo con el comportamiento global del ensayo. Además, se puede apreciar que la estimación analítica arroja valores más elevados, puesto que, entre más cerca al origen estén el par de valores de carga y deformación angular, el módulo tangencial tiende a incrementar. Este efecto prevalece en ambos bloques experimentales.

En [12] se realizaron también ensayos a tensión de probetas de PLA, y se registraron valores aproximados de 309 MPa para el módulo de elasticidad y de 113 MPa para el tangencial; sin embargo, este último fue estimado a partir de la relación del módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson. La discrepancia respecto a los valores reportados en esta investigación, aun bajo las mismas condiciones de isotropía, continuidad, homogeneidad y elasticidad, se debe a que la estimación analítica prescinde del comportamiento en la sección transversal de la probeta, solo considera el módulo de elasticidad.

Conclusiones

Debido a los resultados similares en los ensayos a torsión de las probetas de PLA puro respecto de las recubiertas con PPy, la metodología de caracterización mecánica del polipirrol fue subóptima. La estimación del módulo de elasticidad tangencial de ambos bloques de estudio omite una diferencia significativa; es decir, las probetas recubiertas con PPy exhibieron el mismo comportamiento que las probetas de control. No obstante, la dosis adherida a la superficie de las probetas fue ínfima para dimensionar su espesor en la parte longitudinal y menos aún para asegurar que se mantuviera constante. Además, dado el método de síntesis emplea-



do, se debe considerar que pueden aparecer impurezas en el material y que la concentración respecto a la masa total del recubrimiento podría ser insuficiente. Cabe resaltar, también, que el relleno y el acabado final de las probetas impresas pueden afectar las mediciones durante el estudio.

El análisis de la zona elástica en los diagramas esfuerzo-deformación de las probetas de PLA puras y con recubrimiento de PPy denota una clara diferencia visual entre las pendientes de los ensayos, pero este comportamiento puede atribuirse a la capacidad adhesiva del relleno en las probetas recubiertas; es decir, aunque el relleno sea total, la calidad de extrusión en ese segmento puede disminuir ligeramente. Asimismo, como se mencionó con anterioridad, la diferencia entre las estimaciones gráfica y analítica radica en que la regresión realiza un ajuste global de los datos, mientras que el cálculo analítico refleja una condición puntual. Por esta razón, el valor del módulo tangencial calculado analíticamente muestra un incremento a medida que el par de datos seleccionado para la estimación se aproxima al origen de la gráfica del ensayo.

En conclusión, la metodología de síntesis del polipirrol condiciona directamente las variaciones del módulo de elasticidad; en ese sentido, se sugiere como aproximación principal a esta investigación la polimerización por la vía de la síntesis química. El proceso es relativamente simple, aunque se debe tener particular cuidado de mantener constantes las condiciones operativas para tener una producción abundante y tan libre de impurezas como sea posible.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo brindado a lo largo de esta investigación. Asimismo, se extiende el reconocimiento a los profesores adscritos a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) y a la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) por su colaboración en el desarrollo experimental del proyecto. Por añadidura, se reconoce el respaldo académico del Instituto Politécnico Nacional (IPN) a través de los proyectos SIP 20250106 y SIP 20250288, así como la beca EDI, todos otorgados en el marco del SIP/IPN.

Fuentes de financiamiento

Proyecto SECTEI, número SECTEI/025/2024, “Desarrollo numérico experimental de lesión de médula espinal implantada con polímero derivado del pirrol mediante DTI y MRS en murinos”.



Referencias

- [1] D. Osorio Londoño, Y. Heras Romero, L. B. Tovar y Romo, R. Olayo González y A. Morales Guadarrama, "Improved Recovery of Complete Spinal Cord Transection by a Plasma-Modified Fibrillar Scaffold", *Polymers*, vol. 16, art. 1133, 2024, doi: 10.3390/polym16081133
- [2] Z. Morávková, O. Taboubi, I. M. Minisy y P. Bober, "The evolution of the molecular structure of polypyrrole during chemical polymerization", *Synthetic Metals*, vol. 271, art. 116608, 2021, doi: 10.1016/j.synthmet.2020.116608
- [3] Z. B. Huang, G. F. Yin, X. M. Liao y J. W. Gu, "Conducting polypyrrole in tissue engineering applications", *Frontiers of Materials Science*, vol. 8., pp. 39-45, 2014. [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11706-014-0238-8#preview>
- [4] A. Muciño, "Introducción a los polímeros conductores ejemplos de aplicación", Tesis de licenciatura, ESIQIE, IPN, México, 2019. [En línea]. Disponible: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/27209>.
- [5] E. De la Cruz Reyes, "Síntesis de películas polipirrol-yodo por plasma polimerización para su posible aplicación a celdas solares orgánicas", Tesis de maestría, Tecnológico de Estudios Superiores de Metepec, México, 2020. [En línea]. Disponible: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/bitstream/TecNM/4025/1/Ernesto%20De%20la%20Cruz%20Reyes.pdf>
- [6] G. E. Martín Pat, N. Rodríguez Fuentes, J. M. Cervantes Uc, R. Rosales Ibáñez, H. J. Carrillo Escalante, A. F. Ku González, A. Ávila Ortega y F. Hernández Sánchez, "Effect of different exposure times on physicochemical, mechanical and biological properties of PGS scaffolds treated with plasma of iodine-doped polypyrrole", *Journal of Biomaterials Applications*, vol. 35, núm. 4-5, pp. 485-499, 2020, doi: 10.1177/0885328220941466
- [7] J. Pionteck, M. Omastová, P. Pötschke, F. Simon y I. Chodák, "Morphology, conductivity, and mechanical properties of polypyrrole-containing composites", *Journal of Macromolecular Science, Part B*, vol. 38, núm. 5-6, pp. 737-748, 1999, doi: 10.1080/00222349908248135
- [8] A. F. Díaz y B. Hall, "Mechanical Properties of Electrochemically Prepared Polypyrrole Films", *IBM Journal of Research and Development*, vol. 27, núm. 4, 1983, doi: 10.1147/rd.274.0342
- [9] J. C. de Oliveira, A. Airoudj, P. Kunemann, F. Bally-Le Gall y V. Roucoules, "Mechanical properties of plasma polymer films: a review", *SN Applied Sciences*, vol. 3, art. 656, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04655-9
- [10] Mexpolímeros, "PLA (Acido Poliláctico) - poliláctido-L-láctico (PLLA)". [mexpolimeros.com](https://www.mexpolimeros.com/pla.html). <https://www.mexpolimeros.com/pla.html> (Accedido el 13 de marzo de 2025).
- [11] Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature, ASTM E143-13, ASTM International, West Conshohocken, PA, EUA, 2013.
- [12] G. Martínez Bordes y G. Serandour, "Andamios de PLA fabricados mediante técnicas de impresión 3D: metodología para desarrollar un modelo de comportamiento ortotrópico del material", *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 28, núm. 1, pp. 13-24, 2024, doi: 10.5944/ribim.28.1.41704



Multibody simulation of an osteogenesis imperfecta child model fit over a harmonic dynamic system

Simulación multicuerpo de un modelo de niño con osteogénesis imperfecta mediante un sistema dinámico armónico

 Miguel Ángel Martínez Miranda
 Jose Luis Torres Ariza*
 Christopher René Torres San Miguel

Instituto Politécnico Nacional,
Ciudad de México, México.
*jtorresa1302@alumno.ipn.mx

03

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

M. Á. Martínez Miranda, J. L. Torres Ariza, y C. R. Torres San Miguel, "Multibody simulation of an osteogenesis imperfecta child model fit over a harmonic dynamic system," *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 8, no. 15, pp.32-48, 2025.



Abstract

This research examines a 2D Harmonic Dynamic System (HDS) proposed to reduce the kinetic energy transferred to a child body in a motor vehicle crash with the purpose of its subsequent implementation for use in children with bone-degenerative diseases such as osteogenesis imperfecta (OI). The 3D model from the HDS was modified into a simplified 2D model that considers the components present in the XY plane such as rails, springs and shock absorbers that damp excessive movements along the X-axis. The 2D multibody numerical analysis was conducted us-

ing Working Model® during an interval of 140 ms; the boundary conditions were in accordance with the United Nations Economic Commission for Europe UN Regulation No. 129 for a CRS frontal test evaluation (CRS). The kinetic behavior observed shows a close correlation between the 2D multibody test and the empiric evaluations from the literature. Although the results were satisfactory for the 2D case proposed, the multibody analysis needs to be revised in a 3D multibody test considering a more detailed CRS and HDS as well as components such as seatbelts.

Keywords: bone-degenerative disease, child ATD, CRS, Harmonic Dynamic System, multibody, osteogenesis imperfecta

Resumen

Esta investigación examina un Sistema Dinámico Armónico (HDS) propuesto en dos dimensiones (2D) que reduce la energía cinética transferida al cuerpo de un niño en un accidente automovilístico con la finalidad de implementarlo posteriormente para el uso en niños con enfermedades óseo-degenerativas, como la osteogénesis imperfecta. El modelo 3D del HDS se modifica para convertirlo en un modelo 2D simplificado que considera los componentes presentes en el plano XY, como rieles, muelles y amortiguadores cuya función es disminuir los excesivos movimientos suscitados a lo largo del eje longitudinal (eje X) durante un accidente automovilístico. El ensayo multicuerpo 2D se realizó empleando el software

Working Model® durante un intervalo de 140 ms; las condiciones de frontera del ensayo se ajustaron conforme al reglamento de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa UN/ECE R129 para la evaluación de Sistemas de Retención Infantil (SRI). El comportamiento cinético observado muestra una fuerte correlación entre el ensayo 2D multicuerpo y las pruebas realizadas en laboratorio reportadas en la literatura. Aunque los resultados son satisfactorios para el caso 2D propuesto, es necesario revisar el comportamiento en un análisis multicuerpo 3D considerando un diseño más detallado del SRI y del HDS, así como de elementos como el cinturón de seguridad.

Palabras clave: enfermedad óseo-degenerativa, SRI, ATD infantil, Sistema Dinámico Armónico, multicuerpo, osteogénesis imperfecta.



Introduction

Degenerative bone changes, such as osteogenesis imperfecta (OI) [1], [2], scoliosis [3] chest wall deformities [4], are diseases that weaken bone internal support structure, which in turn causes an increased risk of fracture and breakage. Some factors associated are genetic predisposition, age related calcium deficits and vitamin deficiency [5], [6], [7]. However, treatments are available to help people enjoy a pleasant and fulfilling life: medication and physical or occupational therapy can provide a way to carry out daily activities with less pain and prevent illness or medical complications [8], [9].

A fracture is a discontinuity caused by impact, torsion or traction forces in the bone that exceed its elastic limit. Trauma is the usual cause of fractures in healthy people, but there are also pathological fractures, which occur without substantial trauma in people who suffer from degenerative diseases. In that sense, bone conditions represent a high risk of injury for OI passengers because a correct positioning inside the vehicle according to safety regulations is difficult to reach. Consequently, patients with advanced bone disease are vulnerable to fractures even in low-speed crashes.

In general, children without hip mobility difficulties can travel in an upright seated position on conventional child restraint systems (CRS). However, some children require specially adapted CRS because their body condition puts them at higher risk of injury in the event of a crash. Although the UN/ECE R129 [10] establishes protection standards for children, according to reports of the European Economic Commission, availability of special CRS is extremely limited [11]. A substantial first step for designing these special CRS is to develop a mechanism to decrease the kinetic energy transmitted to the child. Some systems already exist, such as child seat vehicle anchorage systems [12], crush zone equipped CRS [13], seat integrated kinetic CRS [14] and energy-absorbing webbing CRS [15].

The multibody human model is a way to obtain kinematics and data, such as accelerations, deformation and displacements from a dummy during a crash test scenario. Simcenter Madymo™ by Siemens, for example, is a standard software used to improve and analyze occupant and pedestrian safety in a time-efficient manner. In this research, a 2D frontal multibody sled test following the guidelines established by the UN/ECE R129 will be simulated in Working Model®; the aim is to validate the 2D multibody child model against previous tests reported in the literature.

Two multibody 2D child models were created, the first one was modelled using an anthropometric database of a 3-year-old Hybrid III ATD, and the second was

in accordance with the ATD reported by Martínez *et al.* [16]. The objective is to validate a 2D multibody child with osteogenesis imperfecta via kinematics behavior and the injury data measured in the head and the thorax in terms of acceleration. Throughout this research, a detailed structure is shown to achieve the goals. In the Materials and methods section, the boundary conditions are defined for the frontal sled test according to the UNECE R129 regulation. Additionally, child body properties, such as anthropometric dimensions and mass distribution are presented. In the Results section, the data are compared with those gathered by Turchi *et al.* [17]. Based on the results, it is concluded that the 2D multibody simulation is an accurate and time efficient method to evaluate a crash scenario.

Materials and methods

A 2D multibody frontal test is proposed to observe the kinematic behavior of a child with OI and evaluate the head and chest accelerations. The tests consider the following components: a Harmonic Dynamic System (HDS), a CRS, a car seat, a seat belt, a child dummy and a sled platform. The sled platform geometry and the deceleration pulses for the frontal crash test are based on the UN/ECE R129 regulation. The test is performed in Working Model® during a time interval of 140 milliseconds (ms).

Each component was modelled to obtain their CAD representation on SolidWorks®, then a process of drawing the contour of each component and exporting them in *.dwg extension was executed. The components in *.dwg extension were imported into Working Model®.

Child dummy model parameters

Tables 1 and 2 show the Hybrid III 3yo anthropometric dimensions and mass parameters used to create the child ATD in Working Model®.

TABLE 1.
Hybrid III 3yo anthropometric dimensions to recreate the ATD in Working Model® [18].
Fuente: elaboración propia.

PARAMETER	LENGTH (MM)
Sitting height	546.1
Shoulder pivot height	314.96
Hip pivot height	39.37



PARAMETER	LENGTH (MM)
Thigh clearance	86.10
Lower arm and hand length	255.02
Shoulder to elbow length	193.04
Buttock to knee length	256.54
Popliteal height	226.06
Buttock popliteal length	225.55
Chest depth	146.05
Stature	950.5
Foot breadth	58.67
Head circumference	508.00
Chest circumference	539.75
Waist circumference	539.75

TABLE 2.
Hybrid III 3yo mass parameters
to recreate the dummy
in Working Model® [18].
Fuente:
elaboración propia.

COMPONENT	MASS (KG)
Head	2.68
Neck	0.74
Clothed torso	6.54
Upper arm	0.42
Forearm and hand	0.47
Thigh	0.96
Calf	0.60
Foot	0.27
Total	15.46



Osteogenesis imperfecta child ATD parameters

A modified child ATD (Figure 1) was constructed to match the anthropometric and biomechanical parameters consistent with an OI patient. Table 3 shows the mass distribution for each child dummy component according to model 1 developed by Martínez *et al.* [16]. An additional data row is presented to show the equivalent commercial dummy parts. The selected mass distribution corresponds to the 'estimated mass' row to reach the total mass ballasted proposed by [16].

FIGURE 1.
Crash dummy modified
to represent a child
with OI.
Fuente:
elaboración propia.

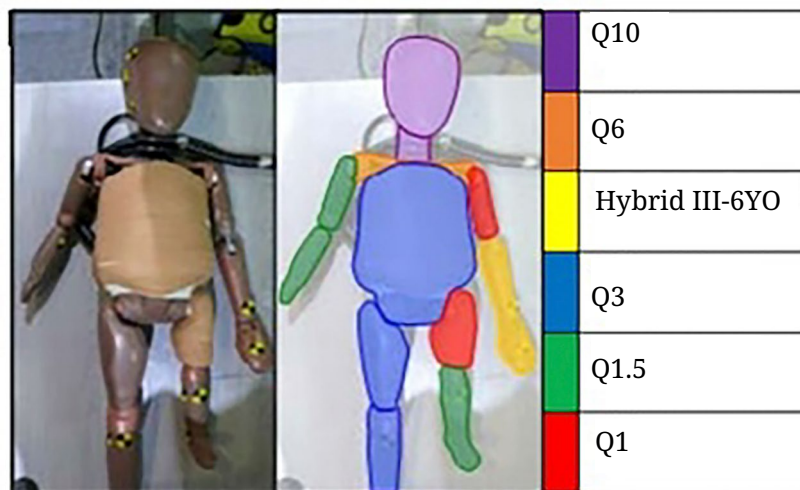


TABLE 3.
Mass distribution
for the OI child model [16].
Fuente:
elaboración propia.

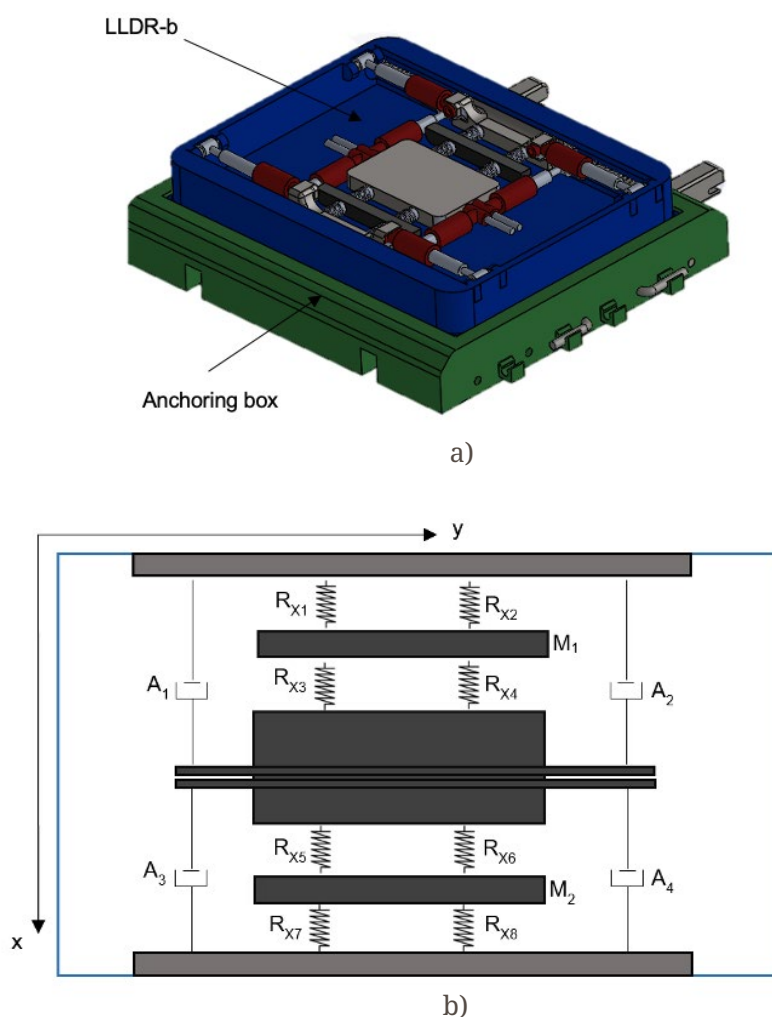
COMPONENT	ESTIMATED MASS (KG)	UNBALLASTED MASS (KG)	COMMERCIAL DUMMY MODEL
Head	3.86	4.19	Q10
Neck			Q10
Clavicle	11.83	5.80	Q6
Torso			Q3
Right arm	0.37	0.31	Q1.5
Right forearm	0.33	0.23	Q1.5
Left arm	0.41	0.29	Q1
Left forearm	0.20	0.62	HIII 6yo
Right femur	0.97	0.99	Q3
Right tibia	0.57	0.79	Q3
Left femur	1.10	0.50	Q1
Left tibia	0.75	0.46	Q1.5
Total mass	20.39	14.18	
Total mass ballasted		20.96	



Harmonic Dynamic System

The HDS is composed of two main parts: the longitudinal-lateral displacement reduction box (LLDR-b) for movements along the X and Y axes [19], [20], [21], and the anchoring box to keep the CRS fixed. Figure 2a shows the 3D CAD design of the HDS, while 2b shows the LLDR-b schematics.

FIGURE 2.
(a) A view of the HDS 3D model
(b) LLDR-b schematics.
Fuente:
elaboración propia.



The LLDR-b houses the damping system components. A set of rails allow the linear movement of the slides along the Y-axis, and two transversal rails are located on the main slide to allow displacements along the X-axis; the rails are mounted on the slides with two 2.5 kg mass concentrators, which can also displace along the X-axis. The mass concentrators help reduce the oscillations transmitted to the CRS during a vehicular collision.

The sets of shock absorbers (A_1 - A_4) and springs (R_{x1} - R_{x8}) control and damp any abrupt movement of the CRS. The springs are arranged concentrically on the rail, anchored at one end to the LLDR-b surface and at the other end to the dampers. The arrange-



ment of one fixed point and one movable point only allows damping longitudinal displacements along the Y-axis. The set of eight springs anchored to the slides and the mass concentrators on the X-axis enables linear displacements in all directions within the XY plane.

According to UN/ECE R129, a CRS must follow the international standard for attachment points for child safety seats denominated as “ISOFIX”, but the international regulations overlook specific needs of children with degenerative diseases. To address this demographic, an interchangeable anchorage system is proposed for a faster adjustment to the requirements of special needs users while preserving compliance with the current child safety regulations.

The first design consideration is that the LLDR-b must be firmly anchored. For this reason, a set of stroke limits is attached to the LLDR-b to clamp the box. To make the anchors interchangeable, an arrangement of L-shaped rods and latches is proposed, which works as follows: the longer part of the rods goes through the suspension box, and the shorter part locks into the latches; this interchangeability allows the ISOFIX to be reoriented faster.

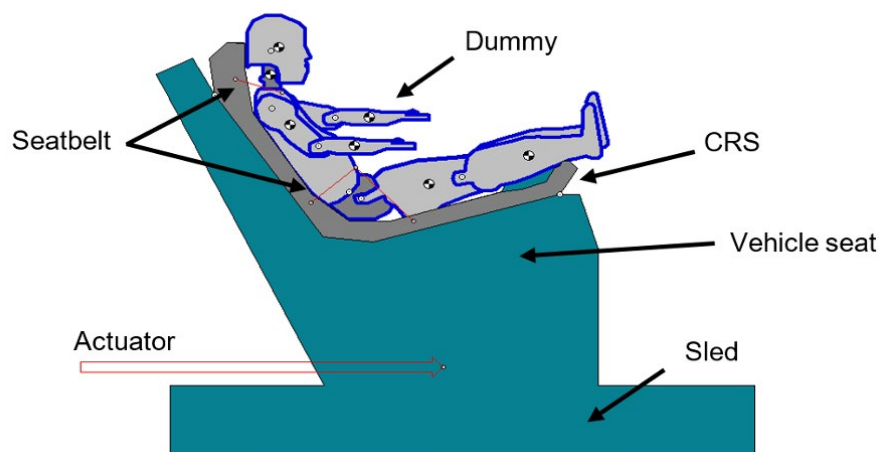
Boundary conditions for validation of the sled tests

Working Model® is a 2D software that reduces mathematical and geometric complexity for the analysis of models without three-dimensional interaction, which means that the multibody simulations must be performed in the sagittal view for the frontal sled test.

Frontal sled test

Figure 3 shows the components of the system in accordance with UN/ECE R129.

FIGURE 3.
Frontal sled test
configuration.
Fuente:
elaboración propia.



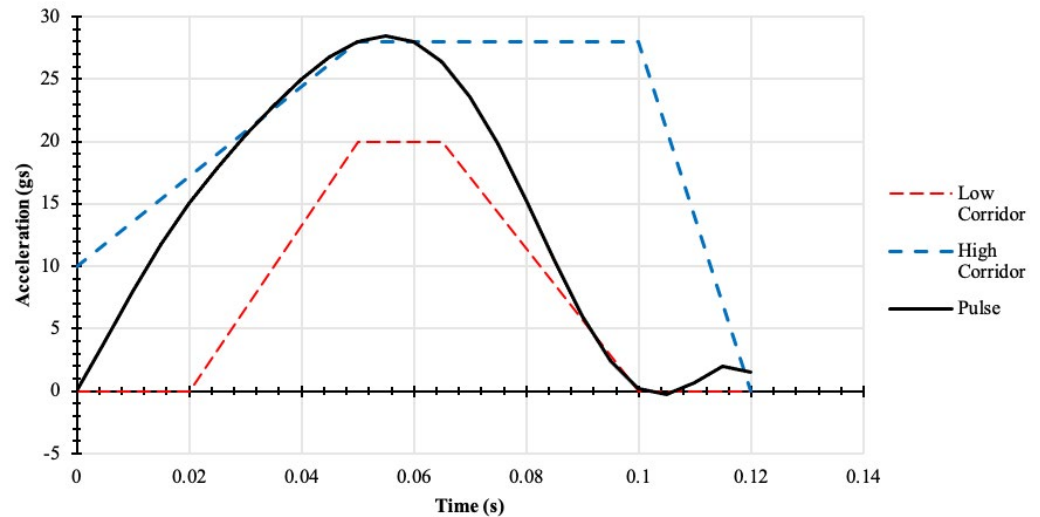


Equation 1 represents the deceleration pulse used for the actuator $\ddot{x}_{frontal}(t)$; the curve was obtained from a Lagrange interpolation of the sled test data by Kallieris *et al.* [22]. The seatbelt was modeled as a set of 1D elements and assigned with seatbelt material.

$$\ddot{x}_{frontal}(t) = 715.83t + 22493.81t^2 - 1926287.87t^3 + 6.06 \times 10^8 t^5 + 6.86 \times 10^9 t^6 - 1.86 \times 10^{10} t^7 \quad (1)$$

Figure 4 shows that the pulse obtained is located between the UN/ECE R129 corridors for the frontal sled test to evaluate the CRS.

FIGURE 4.
Deceleration pulse vs
regulations corridors.
Fuente:
elaboración propia.



Boundary conditions to evaluate a child with OI

Considerations for testing are the same as before. In this case, the HDS was included in the evaluation.

Frontal sled test for a child with OI

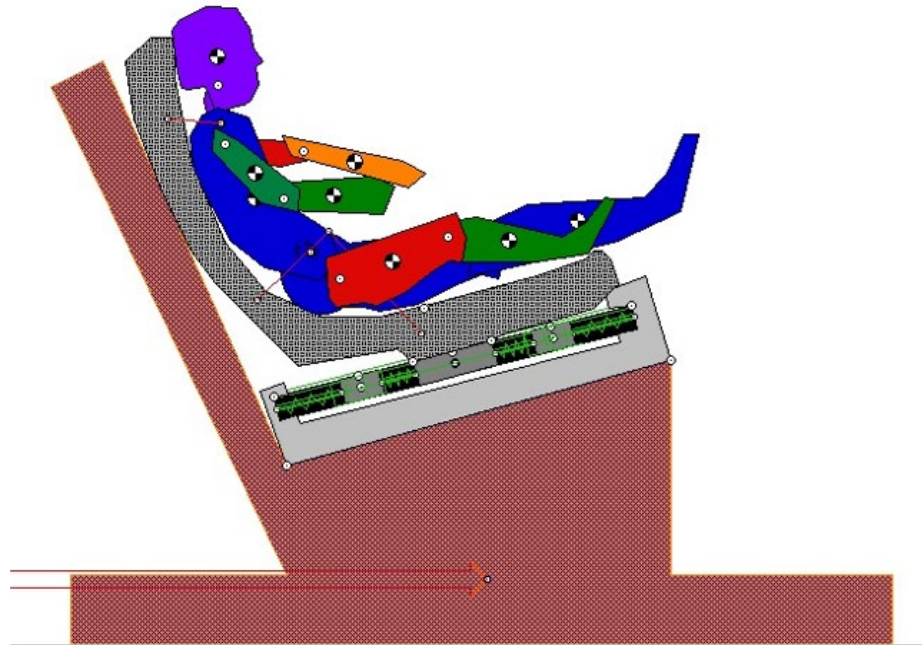
Figure 5 shows the modified child dummy and the components from the previous validation test (sled platform, actuator, seatbelt and the CRS) in a sagittal view. The same deceleration pulse from Equation 1 was used to evaluate the kinematics behavior.



FIGURE 5.

Frontal sled test to evaluate an OI patient.

Fuente:
elaboración propia.



Results and discussion

The kinematics behavior and the head and thorax acceleration from both multi-body frontal sled tests (without OI and with OI) are carried out in accordance with the numerical and experimental test by Turchi *et al.* [17]. Each numerical test was performed during a time interval of 140 ms. Additionally, an FIR filter was selected to process the obtained data.

Frontal sled test comparative

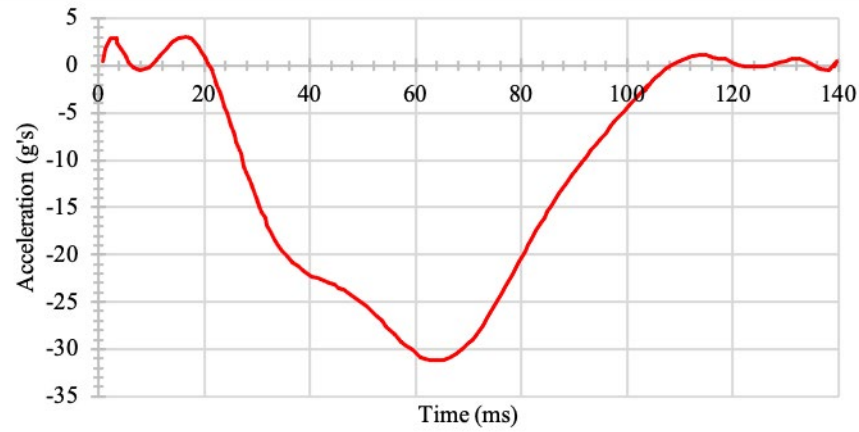
Figure 6a shows the deceleration curve for the dummy's head in the X-direction. In the proposed 2D multibody simulation, a maximum force of 31 g is reached at 65 milliseconds. Figure 6b shows the head deceleration curve from the experimental and the numerical tests by Turchi *et al.* [17]. The experimental data by Turchi show a maximum peak of 24 g at 78 ms; whereas for the numerical test 34 g was observed at 59 ms.


FIGURE 6.

Dummy head response curves during the frontal sled test.

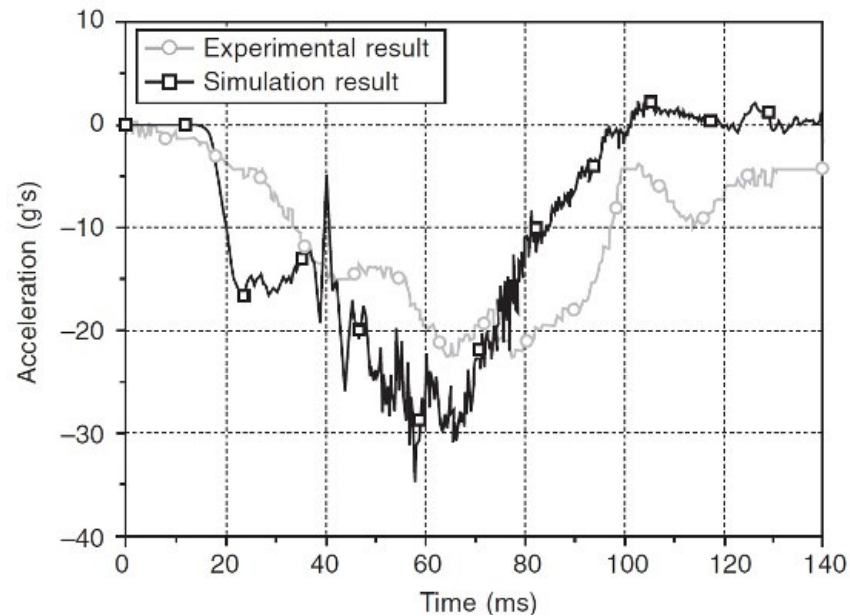
a) Multibody numerical simulation and b) numerical experimental curves from [17].

Fuente: elaboración propia.



— Multibody Simulation Workingmodel

a)



b)

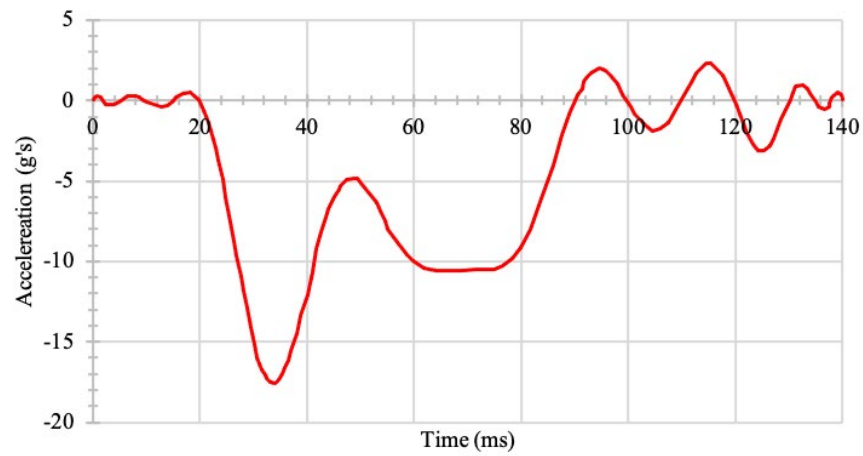
Figure 7 shows the X-axis chest accelerations obtained in the numerical multibody simulation and the data reported in the literature [17]. In the 2D multibody simulation performed, a peak acceleration of -65 g was observed at 30 ms . Data for the simulation test from the literature report a peak of -59 g at 23 ms , and for the experimental test a peak of -62 g at 32 ms . According to the results, the proposed 2D multibody test curve fits better than the numerical test.



FIGURE 7.

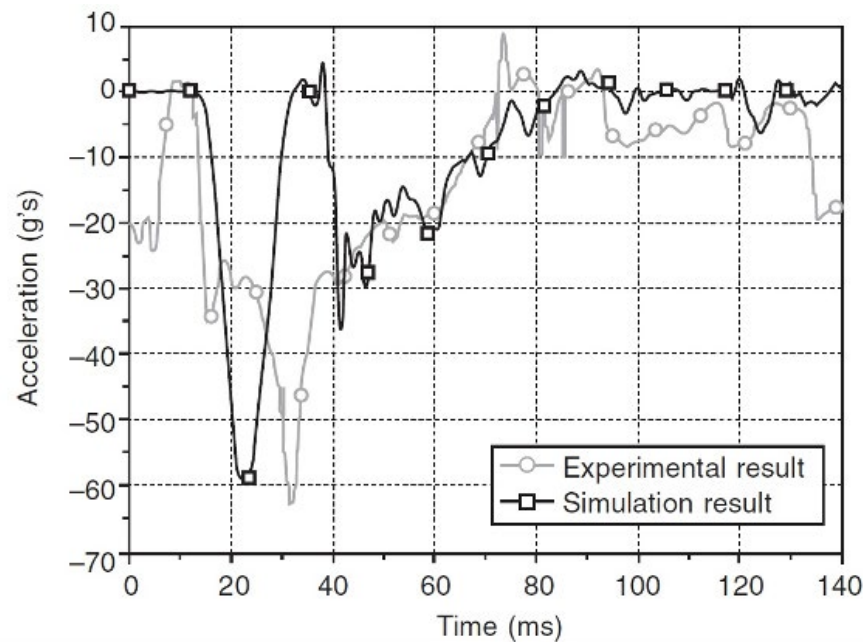
Chest response curves during frontal sled test.
a) Multibody numerical simulation
and b) experimental numerical curves from [17].

Fuente:
elaboración propia.



— WorkingModel_Simulation

a)



b)

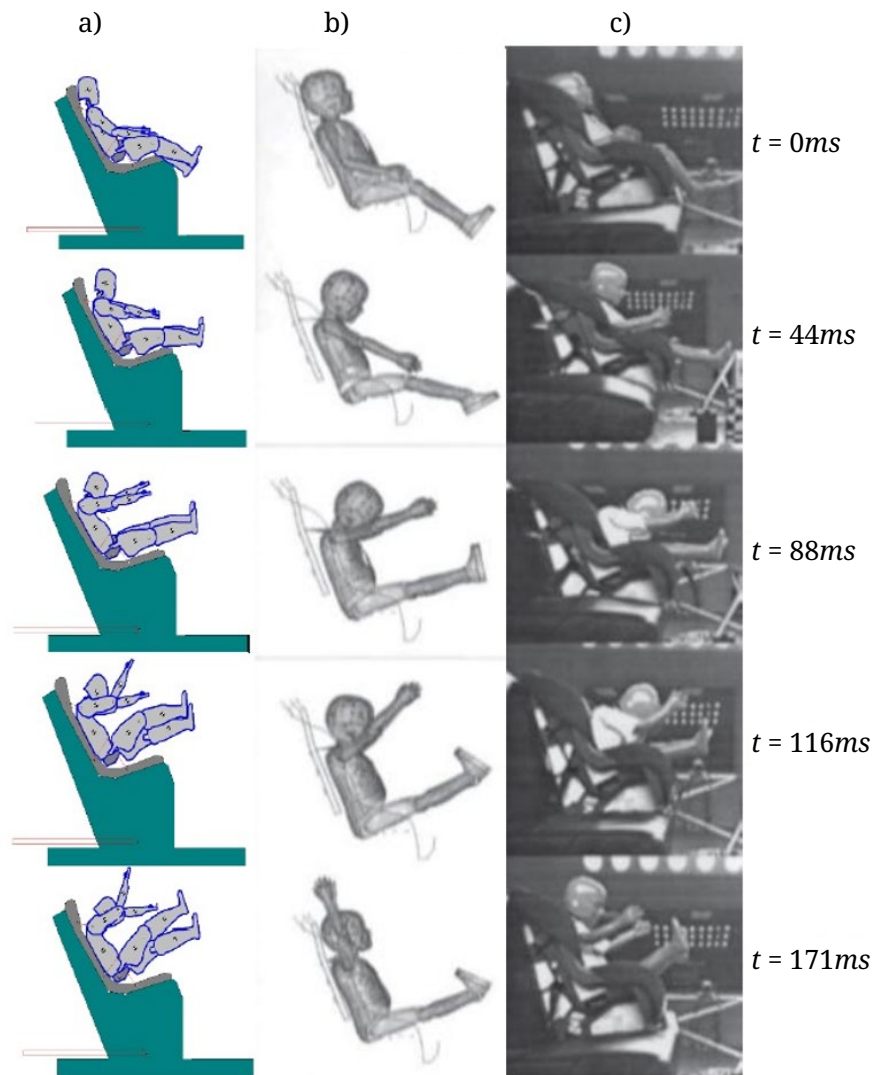
Figure 8 shows the kinematic behavior observed in the 2D numerical multibody simulation and in the tests performed by Turchi *et al.* [17]. Some similarities appear during the interval from 0 to 88 ms in the three models. After that time, the 2D child's multibody shows more significant movement in the upper and lower limbs. The lower limbs suffer a loss of contact with the seat cushion and an offset in the movements of both legs. This biomechanical behavior can represent an increment in the injury severity compared to other body parts, such as the pelvis.


FIGURE 8.

Kinematic behavior of the child model in different test scenarios.

- a) 2D numerical multibody simulation,
b) numerical sled test by [17]
and c) experimental sled test by [17].

Fuente:
elaboración propia.



Results of the evaluation of an OI patient

The data from the child ATD with OI during the 2D numerical multibody frontal sled test were processed by an FIR filter. The studied interval was 0 to 140 ms.

Frontal sled test for a child dummy with OI

Figure 9 shows the deceleration curve for the OI 2D child dummy head on the X-axis as a function of time; a negative peak of 18 g is reached at 35 ms, and a 3 g positive at 115 ms. Figure 10 shows the respective data for the chest region, where two deceleration peaks were observed as a result of the rebound phase.



FIGURE 9.
OI dummy head model
response during
the frontal sled test.
Fuente:
elaboración propia.

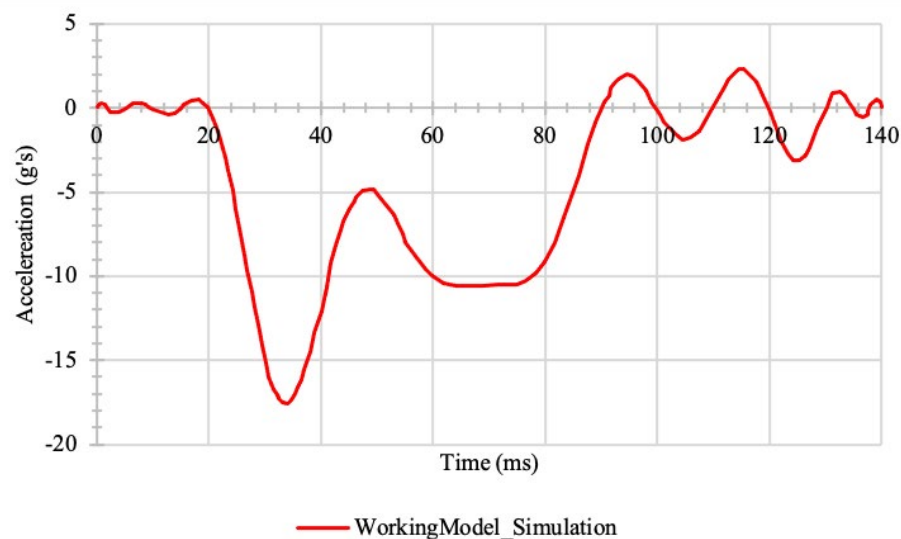


FIGURE 10.
OI dummy chest model
response during
the frontal sled test.
Fuente:
elaboración propia.

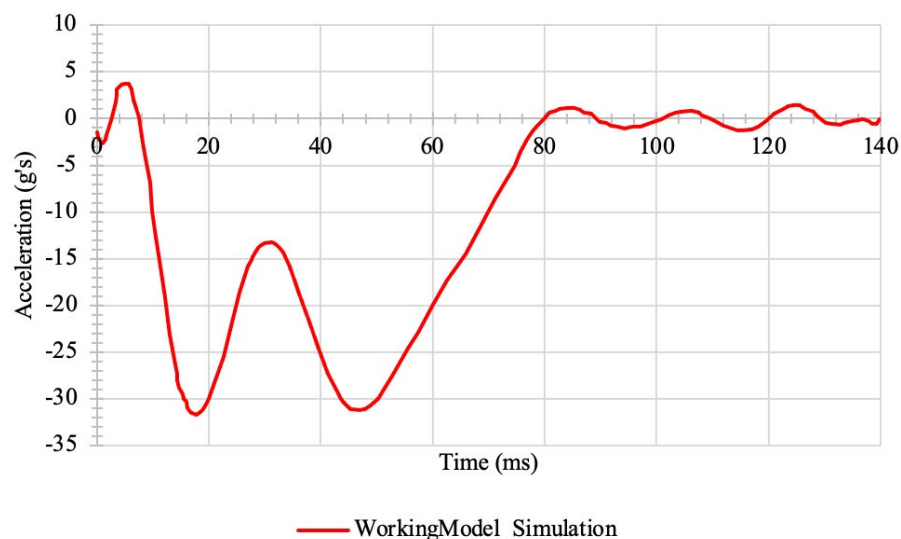


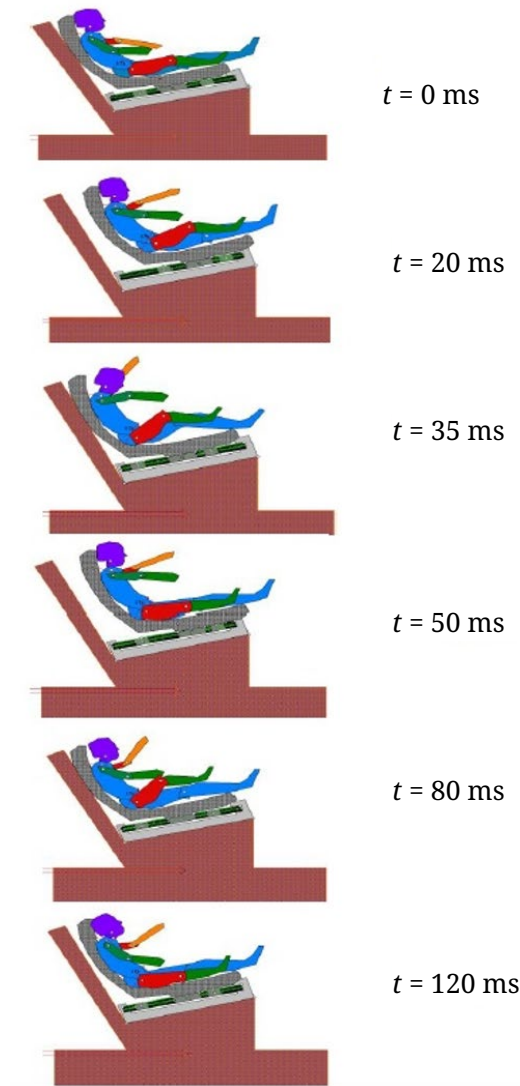
Figure 11 shows the kinematic behavior registered in the 2D numerical multibody simulation. During the frontal test, a double rebound behavior is observed at the 20 to 80 ms interval. This behavior is correlated with the multiple peaks illustrated in Figures 9 and 10 for the same interval.



FIGURE 11.

Kinematic behavior from the OI child dummy during the frontal sled test.

Fuente: elaboración propia.



The probability of suffering an injury depends on different factors, such as the CRS employed, vehicle, correct use of the passive safety system, anthropometrics and age. The combination of these components will be reflected in the maximum and minimum peaks suffered in the body parts. In addition, the components discussed in the crash scenario need to be considered. Although the curves from the validation frontal sled test and the experimental are not identical (Figure 8), in general, the behavior is similar. The result could be improved by an optimization process, such as modifying the parameters of dampers and springs.

There are some limitations in this study that could be addressed in future research. Sensitivity analysis is required using different workstations and performance computer configurations to evaluate how the way of processing affects the proposed 2D multibody simulation. Additionally, it is recommended to improve some component properties, such as the geometry of the seatbelt (to avoid oversimplification as a 1D element), and to check that the masses and stiffnesses established for each component are similar to their experimental counterparts.



Conclusions

This research demonstrates the feasibility and effectiveness of using a 2D multibody model in Working Model® to assess a child occupant safety in alignment with the UN/ECE R129 guidelines. The 2D dummy head and thorax replicate closely the kinematic behavior of the 3D dummy model performed in numerical tests and align well with the experimental data from previous sled test research literature.

The deceleration curves obtained from the Harmonic Device System during the frontal sled test show that peak acceleration decreases significantly due to the damping system, which demonstrated an optimal performance for the application of this research work. The result obtained by the 2D child's body when the harmonic mechanism is used cannot be directly contrasted against similar safety mechanisms or conventional CRS since no OI child dummy injury is currently reported in the literature. This absence of research highlights the need to assess injury risk for child with degenerative diseases and future CRS that can accurately protect this specific group. In addition, experimental testing might be the most feasible way to corroborate the results reported by the numerical test evaluated in Working Model®.

Acknowledgments

The authors are thankful to the Secretary of Humanities, Science, Technology and Innovation (SECIHTI) and the Instituto Politécnico Nacional for the support received through the projects SIP 20250106 and SIP 20250288, as well as an EDI grant, all from SIP/IPN.

References

- [1] M. Gutiérrez, M. Molina, L. Prieto, J. Parra and A. Bueno, "Osteogénesis imperfecta: nuevas perspectivas," *Revista Española Endocrinología Pediátrica*, vol. 4, suppl. no. 1, 107-118, May 2013, doi: 10.3266/RevEspEndocrinolPediatri.pre2013.Mar.160
- [2] A. Ibáñez and F. Hodgson, "Osteogénesis imperfecta," *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 32, no. 3, pp. 311-318, May 2021, doi: 10.1016/j.rmcl.2020.09.004
- [3] T. S. Pantoja and L. M. Chamorro, "Escoliosis en niños y adolescentes," *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 26, no. 1, pp. 99-108, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.rmcl.2015.02.011
- [4] A. Wurtz, I. Hysi, L. Benhamed and R. Nevieri, "Malformaciones de la pared torácica," *EMC - Aparato Locomotor*, vol. 48, no. 4, pp. 1-13, Dec. 2015, doi: 10.1016/S1286-935X(15)74984-1
- [5] National Institutes of Health (NIH), "Vitamin D: Fact Sheet for Health Professionals." National Institutes of Health. <https://ods.od.nih.gov/factsheets/VitaminD-HealthProfessional/>
- [6] S. Roberts *et al.*, "Ageing in the musculoskeletal system," *Acta Orthopaedica*, vol. 87, no. sup363, pp. 15-25, Dec. 2016, doi: 10.1080/17453674.2016.1244750



- [7] MedlinePlus, "Aging changes in the bones - muscles - joints." MedLine.gov. <https://medlineplus.gov/ency/article/004015.htm>
- [8] National Institute of Arthritis and Musculo-skeletal and Skin Diseases, "Osteogenesis Imperfecta." NIH.gov. <https://www.niams.nih.gov/health-topics/osteogenesis-imperfecta/basics/symptoms-causes>
- [9] Sunrise Medical, "Discapacidad física: Las nuevas técnicas de fisioterapia." [sunrisemedical.es. https://www.sunrisemedical.es/blog/tecnicas-fisioterapia-discapacidad](https://sunrisemedical.es/blog/tecnicas-fisioterapia-discapacidad) (accessed Jan. 14, 2024).
- [10] *Addendum 128: UN Regulation No. 129, E/ ECE/324/Rev.2/Add.128/Rev.4*, United Nations Economic Commission for Europe, 2021.
- [11] J. Jiménez. "Viajar con el riesgo de usar el cinturón." *El País*. https://el-pais.com/politica/2015/10/06/actualidad/1444128218_442981.html
- [12] *Vehicle anchorage system for child seat*, by J. C. Neelis (2004, Mar. 18). Patent US 2004/0051356 A1 [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US6767057B2/en>
- [13] *Child Seat having a Crush Zone*, by L. C. Strong (2013, Aug. 06). Patent US 8500196 B2 [Online]. Available: <https://portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-8500196-B2>
- [14] *Kinetic Child Restraint Device*, by J. Guenther (2003, Oct. 21). Patent US 6634708 B2 [Online]. Available: <https://portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-6634708-B2>
- [15] *Child restraint device with energy absorbing regions*, by D. Clement (2007, Sep. 13). Patent WO-2007103641-A2 [Online]. Available: <https://portal.unifiedpatents.com/patents/patent/WO-2007103641-A2>.
- [16] L. Martínez, M. de Loma Ossorio, M. Espantaleón, and C. R. Torres, "Estudio antropométrico en sujetos con Osteogénesis Imperfecta para la definición de propiedades de los maniqués antropomorfos de impacto," in *V Reunión del Capítulo Español de la Sociedad Europea en Biomecánica*, Madrid, Spain, Nov. 2015.
- [17] R. Turchi, W. Altenhof, T. Kapoor, and A. Howard, "An investigation into the head and neck injury potential of three-year-old children in forward and rearward facing child safety seats," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 9, no. 4, pp. 419-431, Aug. 2004, doi: 10.1533/ijcr.2004.0300
- [18] Humanetics, "Hybrid III Children Series," [humaneticsgroup.com. https://www.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/child/hybrid-iii-children-series/3-year-old](https://www.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/child/hybrid-iii-children-series/3-year-old) (accessed, Feb. 22, 2025).
- [19] M. Á. Martínez Miranda, C. R. Torres San Miguel and J. A. Flores Campos and L. Martínez Sáez, "Coupling Device for Child Restraint System (CRS) for Infants Affected With Osteogenesis imperfecta: design and numerical assessment," *26th in International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV): Enabling a Safer Tomorrow*, Eindhoven, Jun. 2019.
- [20] M. Á. Martínez Miranda, C. R. Torres San Miguel, J. A. Flores Campos and M. Ceccarelli, "Numerical Simulation of a 2D Harmonic Oscillator as Coupling System for Child Restraint Systems (CRS)," in *Advances in Italian Mechanism Science*, V. Niola and A. Gasparetto, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 492-502.
- [21] I. L. Cruz Jaramillo, J. L. Torres Ariza, M. A. Grave Capistrán, E. A. Alcántara Arreola, C. A. Espinoza Garcés, and C. R. Torres San Miguel, "Numerical Dolly Rollover Evaluation Using a Damping-Harmonic System with a Low Back Booster to Reduce Injuries in a Six-Year-Old Child," *Safety*, vol. 10, no. 2, p. 53, Jun. 2024, doi: 10.3390/safety10020053
- [22] D. Kallieris, J. Barz, G. Schmidt, G. Heess, and R. Mattern, "Comparison Between Child Cadavers and Child Dummy by Using Child Restraint Systems in Simulated Collisions," SAE Technical Paper 760815, Jan. 1976, doi: 10.4271/760815



Análisis experimental de la propagación de ondas sísmicas en suelos finos que contienen una inclusión fluida

Experimental analysis of seismic waves propagation in soils with a fluid inclusion

 Jovan Ezequiel Basaldúa Sánchez*

 María de la Luz Pérez Rea

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México

* jovan.basaldua@uaq.mx

04

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

J. E. Basaldúa Sánchez y M. L. Pérez Rea, "Análisis experimental de la propagación de ondas sísmicas en suelos finos que contienen una inclusión fluida," *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 8, no. 15, pp.49-72, 2025.



Resumen

Esta investigación experimental analiza el impacto de inclusiones fluidas (agua, aire y petróleo) en la propagación de ondas sísmicas, a través de un banco de pruebas con suelo arcilloso de alta compresibilidad diseñado para replicar condiciones de frecuencias sísmicas reales. Los resultados demuestran que la presencia de fluidos altera significativamente las características de propagación: reduce la velocidad de onda debido a cambios en la rigidez del medio y amplifica los picos de señal, en el caso particular de inclusiones de petróleo. El estudio revela patrones espectrales distintivos para cada tipo de fluido y establece correlaciones

entre las propiedades del fluido contenido y los parámetros de propagación ondulatoria. El modelo desarrollado ofrece un marco de referencia valioso para evaluar el comportamiento sísmico de suelos saturados, ofreciendo aplicaciones prácticas en la evaluación de estabilidad de terrenos en zonas sísmicas y en la caracterización de reservorios de hidrocarburos, con especial relevancia para áreas con alta saturación de agua subterránea. Por último, se destaca la importancia de considerar las inclusiones fluidas en modelos predictivos de riesgo geotécnico y exploración geofísica.

Palabras clave: análisis experimental, exploración de yacimientos, geotecnia, ondas planas, inclusión fluida, ondas sísmicas.

Abstract

This experimental research examines the effect of fluid inclusions (water, air and oil) on seismic wave propagation through a test bed loaded with highly compressible clay soil designed to replicate common seismic frequency parameters. The results demonstrate that fluids significantly change propagation characteristics: reducing wave velocity due to changes in medium stiffness while amplifying signal peaks, particularly with oil inclusions. The research reveals distinctive spectral patterns for each different fluid and helps to detect correlations between the

contained fluid properties and wave propagation parameters. The test model developed here represents a worthwhile point of reference for evaluating seismic behavior of saturated soils, which provides practical applications for the assessment of ground stability within seismic zones and the characterization of hydrocarbon reservoirs, with particular relevance for those areas of high groundwater saturation. The results highlight the importance of accounting for fluid inclusions in predictive models for geotechnical risk assessment and geophysical exploration.

Keywords: experimental analysis, reservoir exploration, geotechnics, plane waves, fluid inclusion, seismic waves.



Introducción

El estudio experimental del fenómeno de propagación de onda en el terreno emplea diferentes técnicas e instrumentos de detección, tanto en campo como en laboratorio. Estos métodos permiten caracterizar el comportamiento del suelo al ser excitado por ondas de cuerpo que se propagan en el medio. En los ensayos sísmicos se generan ondas planas que simulan los movimientos telúricos, las cuales provienen de una fuente mecánica localizada (generalmente) en la superficie del medio. Después, con ayuda de herramientas computacionales, se registran y analizan los tiempos de llegada y las amplitudes de las ondas directas, reflejadas o refractadas en las interfaces. Los datos recopilados permiten determinar las propiedades fundamentales de las ondas, como la velocidad de propagación y la atenuación, con base en la estructura material del medio, así como en el tamaño y geometría de las irregularidades que contiene.

Dimitrios Aggelis y Shiotani [1] utilizaron transductores piezoeléctricos para enviar una onda de Rayleigh a través de un medio homogéneo con inclusiones aleatoriamente distribuidas y observaron una alta dependencia de la velocidad de propagación respecto a la frecuencia y al contenido de la inclusión. Asimismo, Bogado y Francisca [2] evaluaron especímenes de suelo residual y encontraron que la velocidad de las ondas cortantes residuales en los suelos está fuertemente influenciada por el número y volúmenes de las inclusiones. Por otro lado, en función del tipo de fluido contenido por la inclusión, el comportamiento de la velocidad de onda y la atenuación se verán afectadas [7]. Con el fin de estudiar de manera experimental la influencia de la distribución del fluido en relación con la velocidad de las ondas elásticas, se han desarrollado métodos para saturar el medio en estudio, como en [5] y [6]. En esta última investigación, se desarrolló un modelo cuantitativo de la dispersión de onda elástica para una serie de inclusiones inmersas en un medio poroelástico distribuidas de manera aleatoria. En la misma línea, Agofack *et al.* [3] emplearon piezoeléctricos en especímenes tipo columna para analizar el comportamiento de ondas de cuerpo en espacios porosos y constataron que la saturación de gas en el medio disminuye significativamente las velocidades sísmicas.

Diversos procedimientos geofísicos son utilizados para identificar inclusiones o anomalías en suelos, como es el caso del método sísmico reflexivo, el cual requiere de equipo, instrumentos de medición y sofisticados procesadores de señales [4]. En aplicaciones de búsqueda petrolera y mineral son empleadas fuentes de excitación como vibradoras de alta energía o incluso material explosivo, y se colocan geófonos en la superficie libre como receptores de señal para cuantificar las propiedades básicas de la roca que contiene el hidrocarburo de interés. Sin embargo, la instalación de sensores y fuentes de excitación en el medio físico a examinar presenta desafíos



logísticos considerables; por esa razón es necesario extraer especímenes representativos de las características naturales del sistema en estudio.

Los ensayos de laboratorio aportan información de la dinámica de fluidos en función de la dispersión de la velocidad sísmica a partir de las frecuencias sísmicas y ultrasónicas recreadas de manera experimental. No obstante, las velocidades de las ondas P y S que se han medido por métodos ultrasónicos o de alta amplitud difieren de las correspondientes a las frecuencias sísmicas [8]; así, simular con precisión las velocidades de ondas permite interpretar la respuesta del medio con mayor seguridad y construir modelos predictivos robustos.

Las características de onda están fuertemente influenciadas por la movilidad del fluido incrustado en el medio sólido; por ejemplo, la velocidad de corte aumenta después de la saturación con fluidos de alta viscosidad, los cuales, a su vez, soportan de manera efectiva una onda de corte. Asimismo, las inclusiones de aceite y gas están relacionadas con la atenuación de las ondas sísmicas primarias (P) [9], [10], [11]. De tal modo, es posible inferir el tipo de fluido presente en las inclusiones en función de los desplazamientos espectrales registrados en la superficie libre del suelo. Rubino *et al.* [12] realizaron una investigación numérica orientada a los efectos de la presencia de fluido en un medio sólido sobre la atenuación de la onda; y para el caso experimental se pueden consultar las publicaciones de Paffenholz y Burkhardt [13] y Behura *et al.* [14]. Si bien los trabajos mencionados se basan en técnicas numéricas o empíricas por separado, Belibassakis *et al.* [15] recurrieron al método de elementos frontera y la construcción de especímenes de prueba; tras analizar la propagación y dispersión de ondas en columnas de agua por los procedimientos analítico y empírico, reportaron una correlación estadísticamente significativa entre ambas metodologías.

Los modelos matemáticos desarrollados para la propagación de onda en medios que contienen inclusiones fluidas suelen basarse en las ecuaciones de Biot [16]. En este sentido, diversas propuestas analíticas se han desarrollado para cuantificar la atenuación de la onda P [17], [18], [19], [20], [21] y la onda S en medios poroelásticos con inclusiones [22]. De hecho, se ha demostrado que las propiedades elásticas del medio, como la capacidad de atenuación de las ondas P y S, dependen de la distribución de poros y la presencia de inclusiones heterogéneas [23], [24].

La heterogeneidad de los materiales y la distribución espacial de los fluidos en los poros generan efectos de dispersión y atenuación que modifican en creces la respuesta sísmica. Por ejemplo, Sun *et al.* [25] demostraron, mediante imágenes micro-CT del comportamiento de ondas en medios parcialmente saturados, que la geometría de la saturación determina la dispersión y la velocidad de propagación. De manera similar, Sutiyoso *et al.* [26] realizaron mediciones en laboratorio en arenas no consolidadas y confirmaron que el nivel de saturación afecta tanto la



velocidad de onda como su atenuación en el rango de frecuencias sísmicas. En suma, las inclusiones dentro del medio dan lugar a fenómenos de dispersión múltiple que influyen en la energía transmitida por las ondas sísmicas, especialmente en medios poroelásticos complejos [27]. El presente estudio se perfila en esta línea de investigación, explorando el efecto combinado de la saturación fluida y la presencia de inclusiones sobre la propagación de ondas en suelos.

Materiales y métodos

Materiales e instrumentos utilizados en el desarrollo experimental

Se diseñó y fabricó un banco de pruebas con capacidad volumétrica de 0.42 m^3 , de 1.2 m de largo por 0.74 m de ancho por 0.47 m de alto (Figura 1), caracterizado a partir de las frecuencias sísmicas comunes (0.01-10 Hz). La muestra de suelo evaluada corresponde a una arcilla plástica [28] de alta compresibilidad (montmorillonita), dentro de la cual se alojaron modelos de inclusión para evaluar su efecto en la propagación de ondas sísmicas a través de la muestra. A fin de representarlos, se fabricaron tres contenedores esféricos de polietileno, todos con un espesor de pared igual a 1 mm, completamente saturados por uno de tres tipos de fluido: aire, agua o petróleo crudo. La excitación para producir la respuesta libre del banco de pruebas se generó por medio de un martillo de impacto ICP [29], mientras que para la respuesta forzada se utilizó un equipo vibrador inercial TIRA GmbH [30] configurado a frecuencias de 2.5 a 10 Hz. El comportamiento debido a la interacción de las ondas producidas por la fuente de excitación con la muestra de suelo y la inclusión fluida fue registrado con dos acelerómetros unidireccionales [31]; uno de ellos se posicionó en la parte baja, cercano a la fuente de excitación, y el otro en la superficie libre del banco de pruebas. Por último, los datos provenientes de ambos sensores fueron recopilados con una tarjeta de adquisición de la marca National Instruments [32] para posteriormente almacenarlos y procesarlos en el software de variable compleja GNU Octave.

Procedimiento de experimentación

En primer lugar, se evaluó el comportamiento del banco de pruebas vacío con los acelerómetros unidireccionales dispuestos a 0.1 m (inferior) y 0.42 m (superior) respecto a la base, orientados en el mismo sentido y alineados en el eje vertical. Luego, el banco de pruebas fue cargado a tres cuartas partes únicamente con la muestra de montmorillonita para repetir el ensayo (Figura 1c). Por último, se realizaron pruebas



separadas para los tres especímenes esféricos de polietileno; se posicionaron de manera individual a una distancia de 0.3 m desde la base del banco de pruebas y se cubrieron en su totalidad con la muestra de suelo, como se ilustra en la Figura 1a.

Respuesta libre

Se hizo incidir un impulso en la parte superior y uno más en la parte inferior del banco utilizando el martillo de impacto para obtener la respuesta libre generada por el banco de prueba para las tres configuraciones experimentales (vacío, muestra de suelo sin inclusión y con inclusiones fluidas). Las condiciones de magnitud, posición y duración del impacto se mantuvieron constantes en las tres configuraciones de prueba.

Respuesta forzada

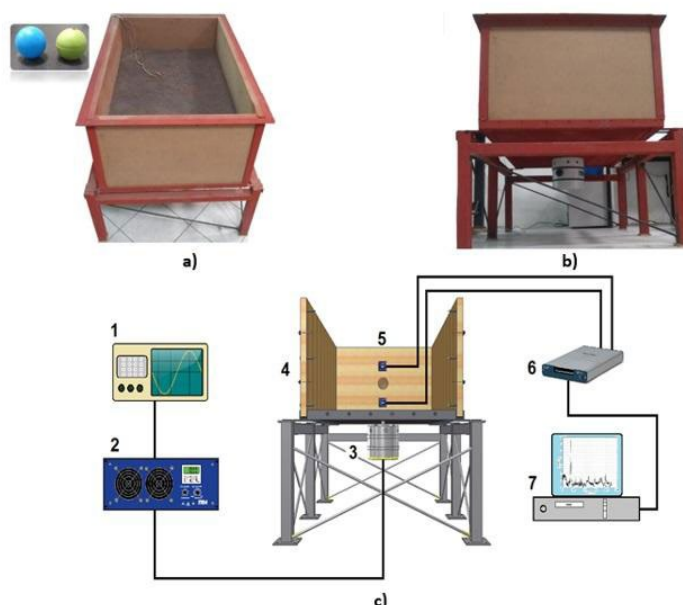
En el caso de la respuesta forzada (Figura 1c), se utilizó un generador de señales convencional (1), el cual permite mantener una amplitud constante mientras se varía la frecuencia de operación; el pulso modulado se envía al amplificador de tensión (2), que alimenta el vibrador inercial (3) posicionado bajo la base del banco de prueba (4). Los acelerómetros unidireccionales (5) registran las ondas que se propagan a través de la muestra de suelo y de la inclusión fluida. Luego, los datos cinéticos se recaban en la tarjeta de adquisición (6) para procesarse en un computador (7). Se asignó un tiempo de asentamiento de alrededor de 30 segundos con el fin de estabilizar la propagación de onda a cada nueva frecuencia de operación antes de renovar el registro de datos. Este proceso se repitió para la configuración de las muestras de suelo y con y sin inclusión fluida.

FIGURA 1.

Montaje del equipo experimental:

- a) Banco con muestra de suelo.
- b) Fuente de excitación.
- c) Esquema representativo:
 - 1. generador de funciones.
 - 2. amplificador de tensión.
 - 3. fuente de excitación.
 - 4. banco de prueba.
 - 5. acelerómetros.
 - 6. tarjeta de adquisición de datos.
 - 7. computador.

Fuente: elaboración propia.





Resultados

Banco de pruebas sin muestra de suelo

Respuesta libre

Se excitó el banco vacío con golpes individuales utilizando el martillo de impacto, primero en sentido ascendente y después descendente, y se registraron los datos provenientes de los acelerómetros durante 10 segundos. Tras aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) con un software de variable compleja, se construyeron los espectros de frecuencia correspondientes a los sensores superior (Figura 2a) e inferior (Figura 2b); se representa con línea sólida el espectro generado por el impacto ascendente y con línea discontinua el descendente.

Para el golpe ascendente, se registraron en el sensor inferior tres picos de frecuencias naturales; el primero se emite alrededor de los 382 Hz con una amplitud cercana a las tres unidades; el segundo se da alrededor de los 584 Hz con una amplitud cercana a las 2.5 unidades, y la última frecuencia natural se produce alrededor de los 1957 Hz para una amplitud cercana a las 1.3 unidades. Las frecuencias naturales registradas por el acelerómetro superior (Figura 2a) alcanzan casi 11 unidades de amplitud en el pico de 382 Hz, es decir, el valor inicial casi se cuadriplica; la segunda frecuencia natural exhibe los 584 Hz y mantiene una amplitud similar. La última frecuencia natural detecta cerca de los 1957 Hz y se aprecia una amplificación de 8 unidades, casi seis veces el valor inicial. Es pertinente señalar que en el sensor superior se registra otro pico con casi 7.5 unidades de amplitud a los 1036 Hz.

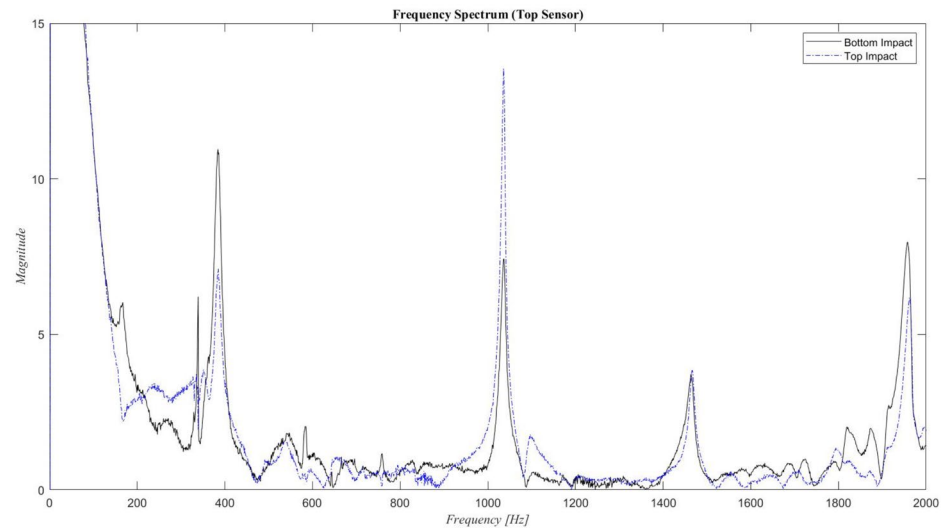
Respecto al impacto descendente, en el sensor inferior se pueden apreciar también tres picos; uno alrededor de los 382 Hz con una amplitud cercana a las 3.3 unidades, el segundo ronda los 1466 Hz con casi una unidad y el último se produce alrededor de los 1961 Hz para una amplitud cercana a una unidad. En cuanto al acelerómetro superior, se aprecia en la frecuencia natural de 382 Hz una amplitud de casi 7 unidades, o aproximadamente dos veces su valor inicial; el pico a los 1466 Hz aumenta a un valor cercano a las 4 unidades, cuatro veces su valor original; para la última frecuencia, a los 1961 Hz hay una amplificación de casi seis veces el valor inicial. Al igual que en los espectros producidos por el impacto ascendente, se registra a los 1036 Hz otro pico con amplitud de casi 13.5 unidades. Por último, en la Figura 2a se aprecia un valor muy elevado de amplitud en el punto cero con un rápido descenso, el cual se atribuye al impacto del martillo excitador muy próximo al acelerómetro.


FIGURA 2.

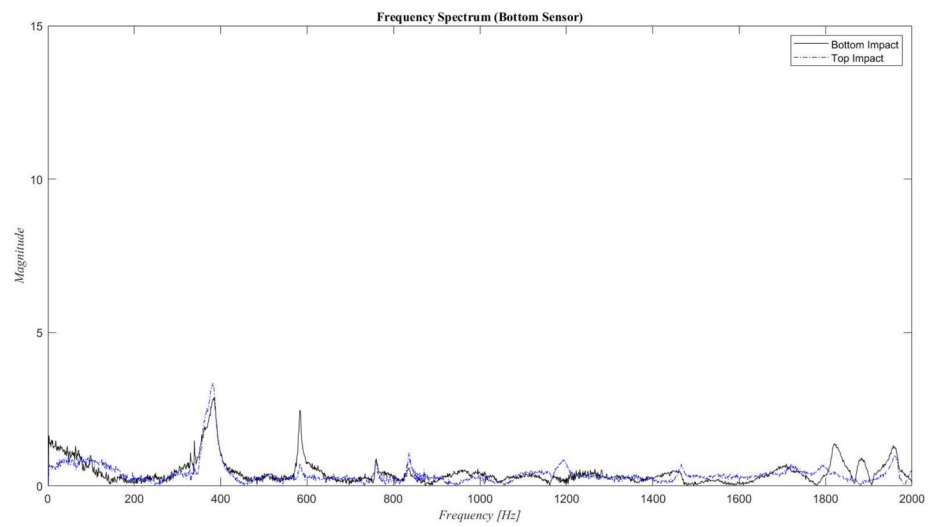
Espectros de respuesta libre generados por el banco de pruebas sin muestra de suelo:

- a) espectro generado con el acelerómetro superior.
- b) espectro generado por el acelerómetro inferior.

Fuente: elaboración propia.



a)



b)

Respuesta forzada

En esta etapa, el banco de pruebas sin muestra de suelo se osciló con el vibrador inercial a frecuencias de 2.5 a 10.0 Hz, con incrementos de 1 Hz y tiempo de excitación de 11 segundos por frecuencia. Las amplitudes (normalizadas a 270 unidades) de los espectros registrados con el acelerómetro inferior mostraron picos a frecuencias de ~450 Hz, y alcanzaron valores máximos cuando el banco osciló a 10 Hz (Figura 3a). En la Figura 3b se muestra un resumen comparativo de los datos del acelerómetro inferior.

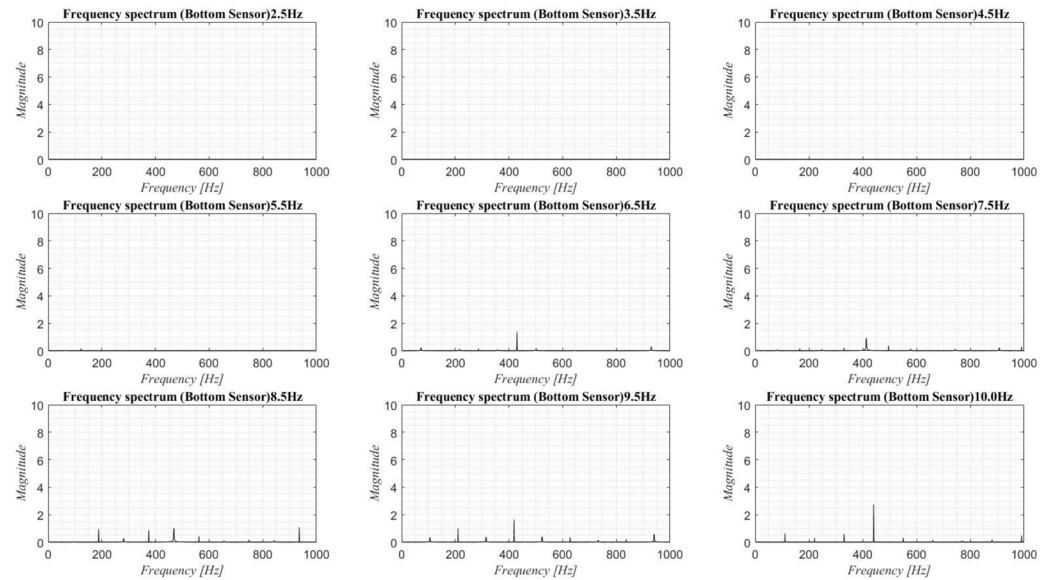

FIGURA 3.

Espectros de respuesta forzada generados por el banco de pruebas sin muestra de suelo utilizando el acelerómetro inferior:

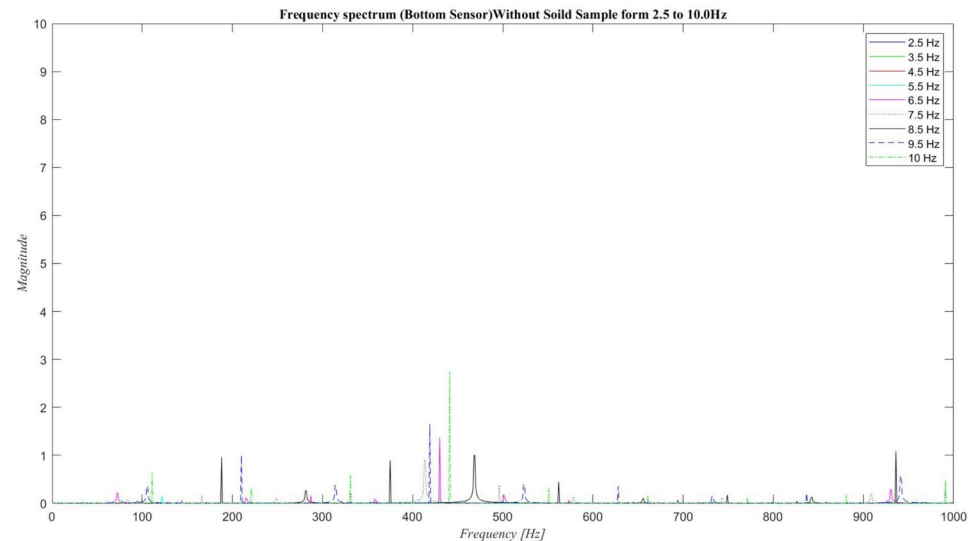
a) espectros de frecuencia individuales.

y b) espectro de frecuencia de 2.5 a 10.0 Hz.

Fuente: elaboración propia.



a)



b)

Asimismo, en la Figura 4a se exhiben los datos provenientes del acelerómetro superior, con los valores de amplitud normalizados también a 270 unidades. Tal en el caso anterior, los valores más elevados se generan a ~450 Hz, alcanzando un máximo cuando el banco de pruebas es excitado a 10 Hz. La Figura 4b representa desde los 2.5 hasta los 10 Hz, con incrementos de 1 Hz. Los valores tan elevados en amplitud de las Figuras 3 y 4 están directamente relacionados con la propagación de onda sobre la estructura metálica de la que está hecha el banco de pruebas. Como se verá en la siguiente sección, las amplitudes se reducen drásticamente al añadir la muestra de suelo al banco de pruebas. Con base en las respuestas libre y forzada expuestas en las Figuras 2 a 4, se asumió que el banco de pruebas no alcanzaría las frecuencias naturales al ser excitado por el vibrador inercial, por lo que no entraría en resonancia.

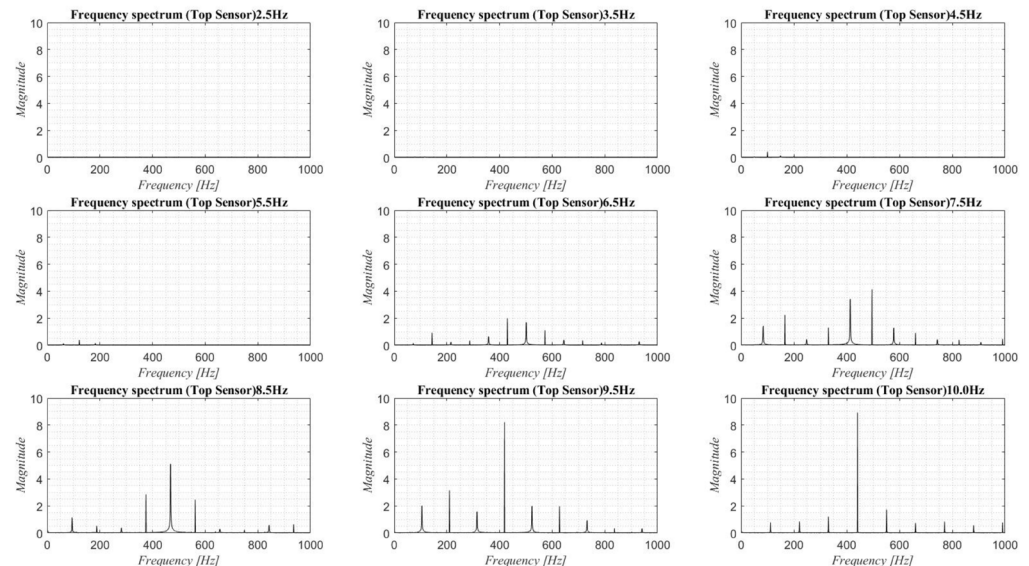

FIGURA 4.

Espectros de respuesta forzada generados por el banco de pruebas sin muestra de suelo utilizando el acelerómetro superior:

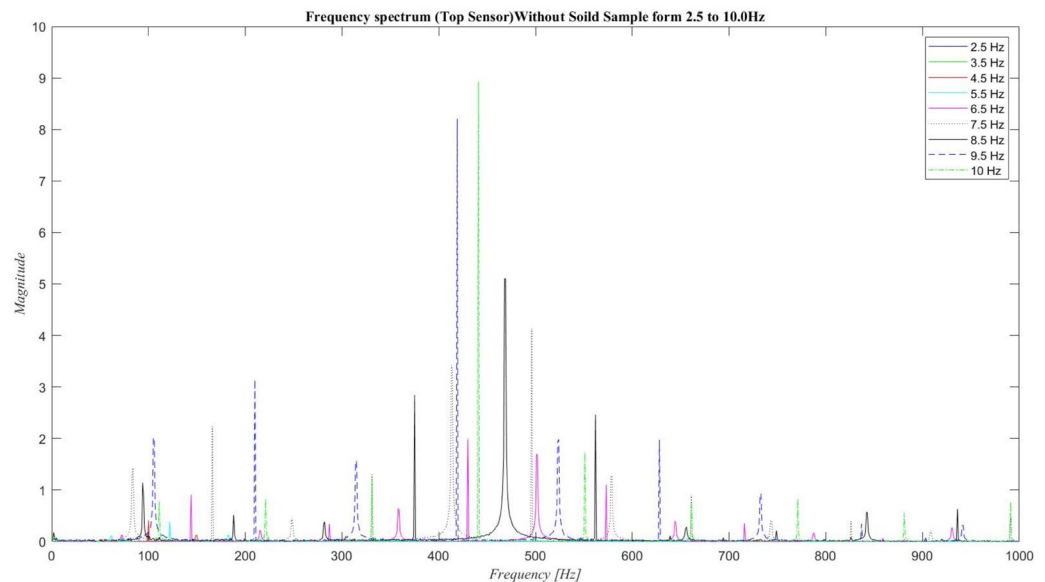
a) espectros individuales.

b) espectro para las frecuencias de excitación de 2.5 a 10.0 Hz.

Fuente: elaboración propia.



a)



b)

Banco de pruebas con muestra de suelo y muestra de suelo con inclusión vacía

Respuesta libre

Se aplicó un impacto de martillo ascendente en la base del banco de pruebas; los espectros generados a partir de los acelerómetros en esta configuración experimental se visualizan en la Figura 5. Las ondas se propagan por la muestra de suelo desde la fuente de excitación (Figura 5a) hasta la superficie libre (Figura 5b); a las frecuencias de ~56 Hz, las amplitudes decrecen ligeramente; las de ~100 Hz son amplificadas, y en el rango de 120 a 200 Hz, la atenuación es mayor; es menester resaltar que en el rango de 350 a 550 Hz se presentan ampliificaciones moderadas.

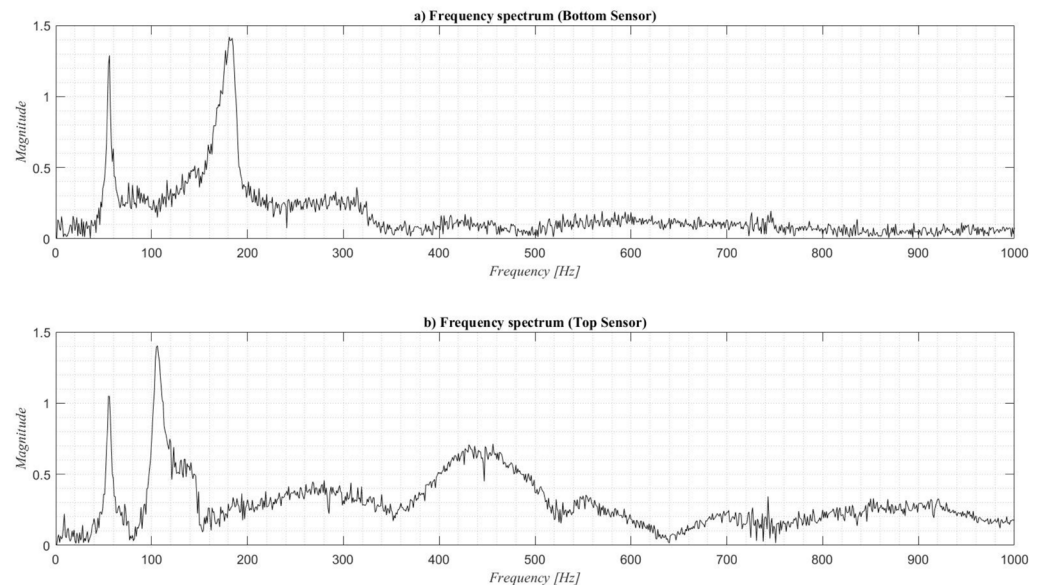

FIGURA 5.

Espectros de respuesta libre generados por el banco de pruebas con muestra de suelo:

a) espectro generado con el acelerómetro inferior.

b) espectro generado por el acelerómetro superior.

Fuente: elaboración propia.



Respuesta forzada

Las Figuras 6 y 7 muestran los espectros con amplitudes normalizadas a 270 unidades recogidos en periodos vibratorios de 5 segundos. Los evidenciados en la Figura 6a corresponden al acelerómetro inferior, localizado cerca de la fuente de excitación, y presentan la forma y amplitudes para las frecuencias de excitación desde los 2.5 hasta los 10 Hz, con incrementos de 1 Hz. Es claro que aparecen armónicos considerables a partir de 7.5 Hz, alcanzándose la mayor densidad de armónicos a los 9.5 Hz para después comenzar a disminuir; en último lugar, la amplitud máxima se alcanza en ~41 Hz a la frecuencia de excitación de 10 Hz. En la Figura 6c se conjuntan los espectros individuales de la Figura 6a, enfatizando la forma y amplitudes del espectro, y de manera análoga, 6d presenta el espectro completo de los datos en 6b. Al compararlos, puede apreciarse una gran semejanza entre ambos conjuntos de datos.

FIGURA 6.

Espectros de respuesta forzada, acelerómetro inferior:

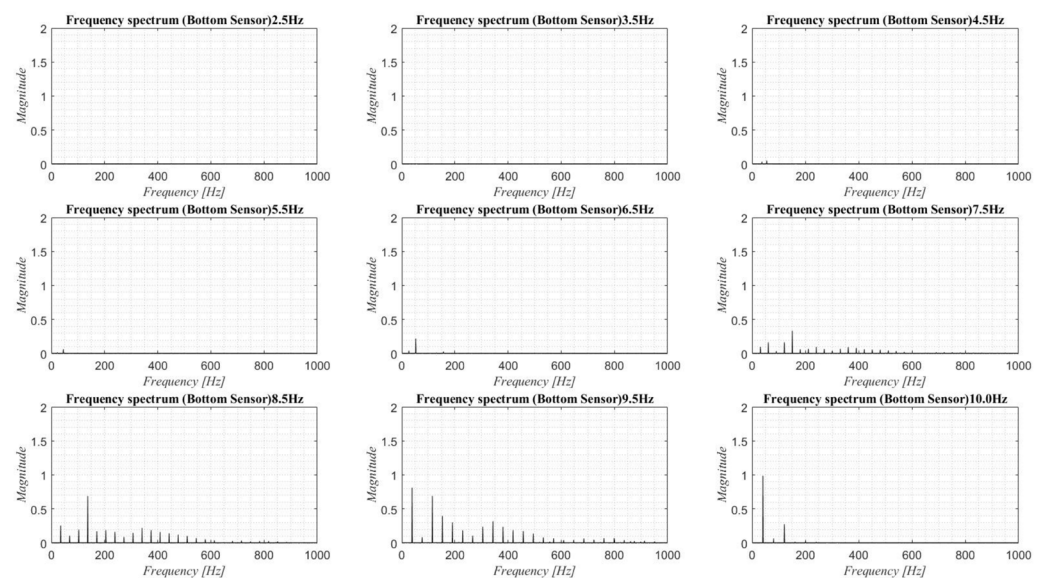
a) espectros individuales sin inclusión.

b) espectros individuales con inclusión vacía.

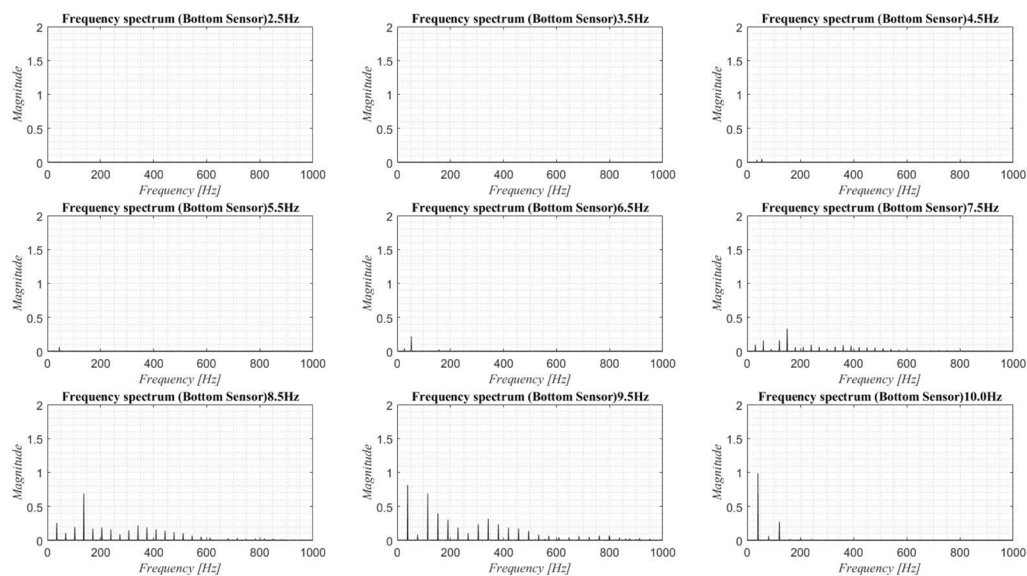
c) excitación de 2.5 a 10 Hz sin inclusión.

d) excitación de 2.5 a 10 Hz con inclusión vacía.

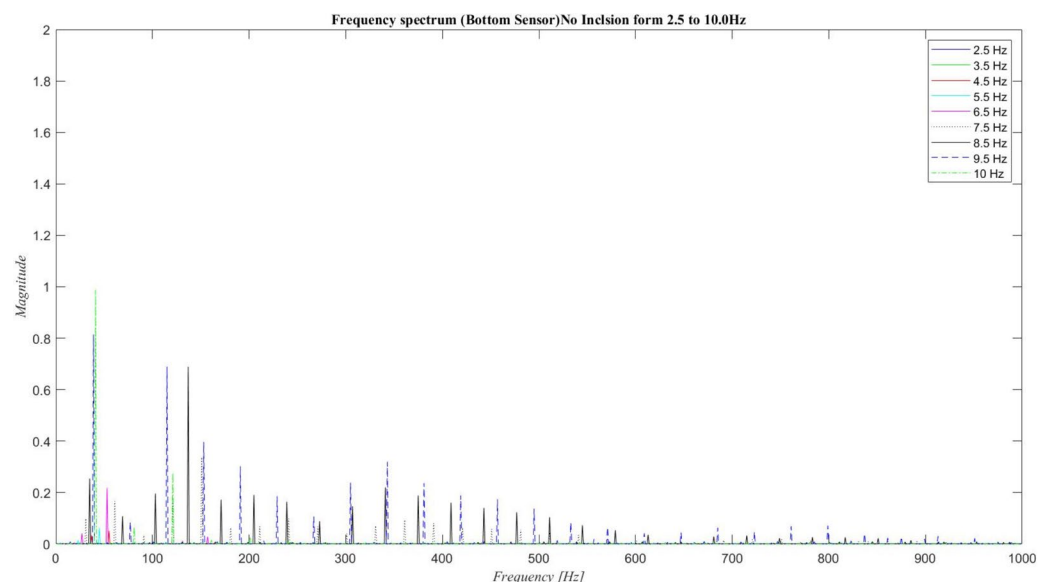
Fuente: elaboración propia.



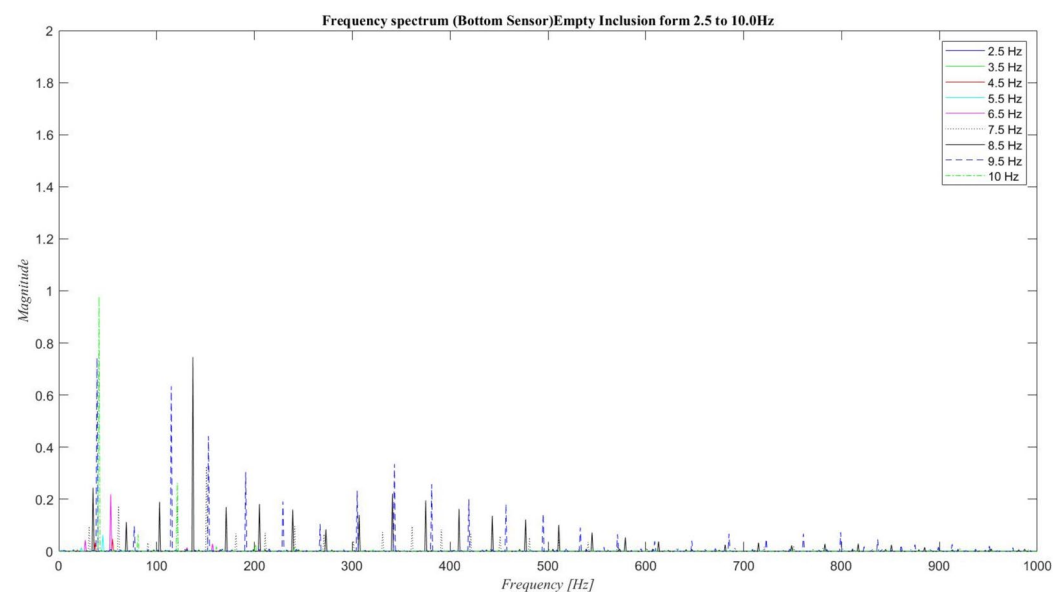
a)



b)



c)



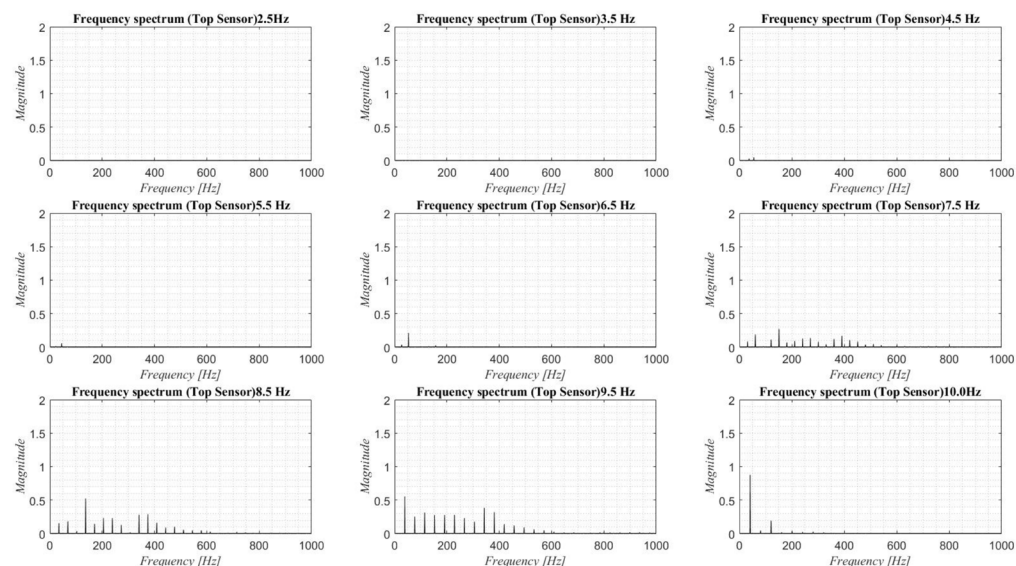
d)


FIGURA 7.

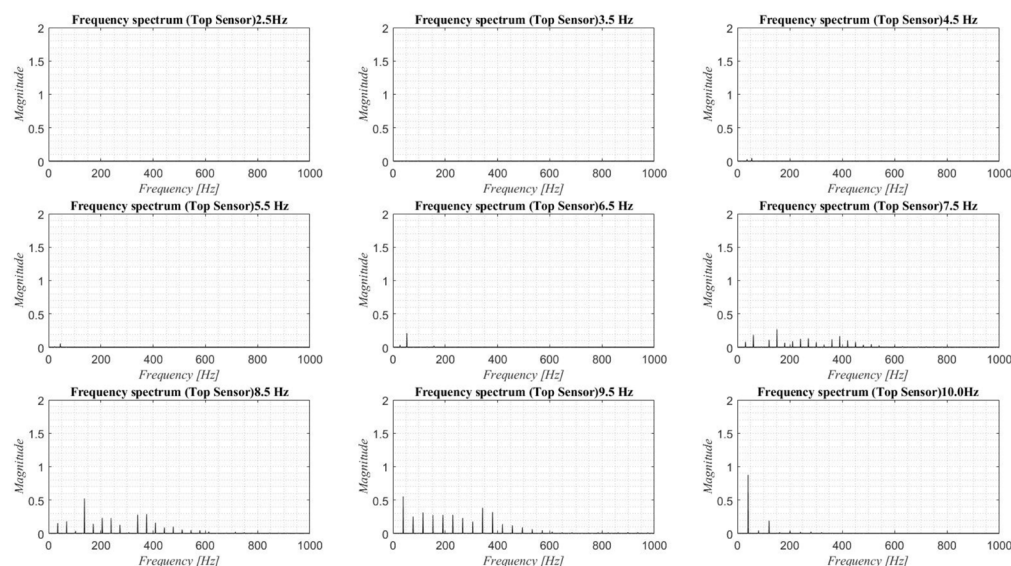
Espectros de respuesta forzada, acelerómetro superior:

- a) espectros individuales sin inclusión.
- b) espectros individuales con inclusión vacía.
- c) excitación de 2.5 a 10 Hz sin inclusión.
- d) excitación de 2.5 a 10 Hz con inclusión vacía.

Fuente: elaboración propia.

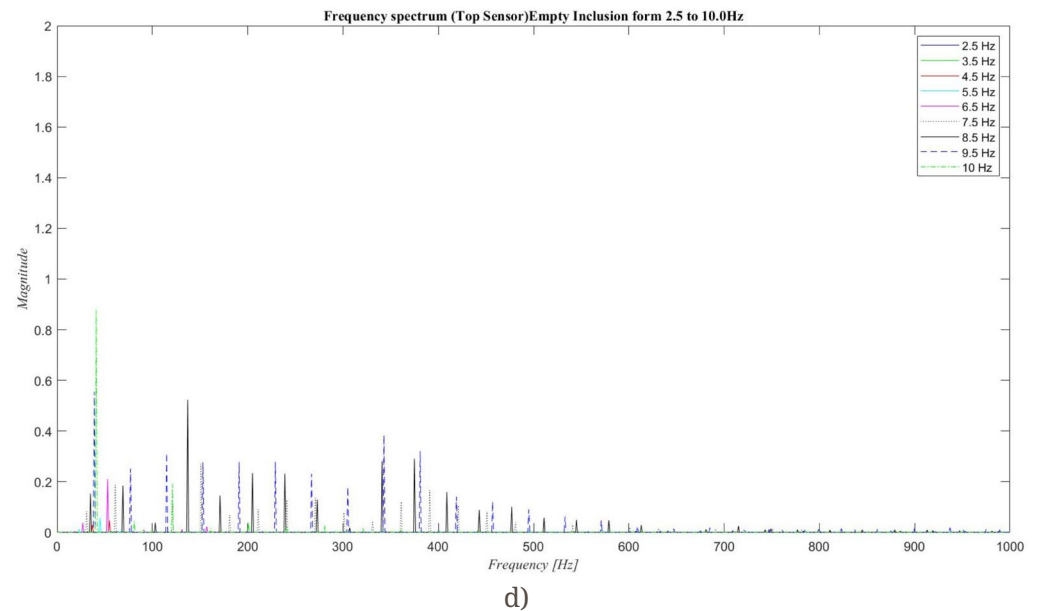
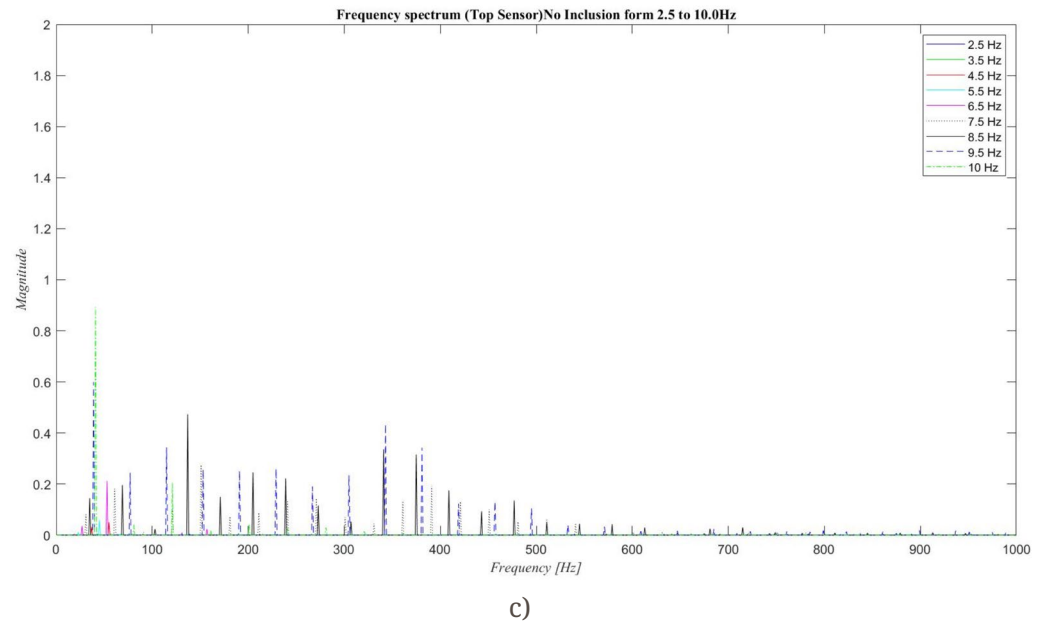


a)



b)

La Figura 7a presenta los espectros registrados por el acelerómetro superior; el comportamiento y la forma de los armónicos se asemeja a los obtenidos por el acelerómetro inferior, salvo que los valores de las amplitudes se reducen debido al paso de las ondas a través de la muestra de suelo. Al igual que ocurrió en el caso anterior, los espectros de 7b y 7d generados por la muestra de suelo con inclusión vacía guardan una gran similitud con los espectros de 7a y 7c sin inclusión. Por último, también se observa un comportamiento similar entre los pares 6c-6d y 7c-7d.



Banco de pruebas con muestra de suelo e inclusión fluida de agua

Respuesta libre

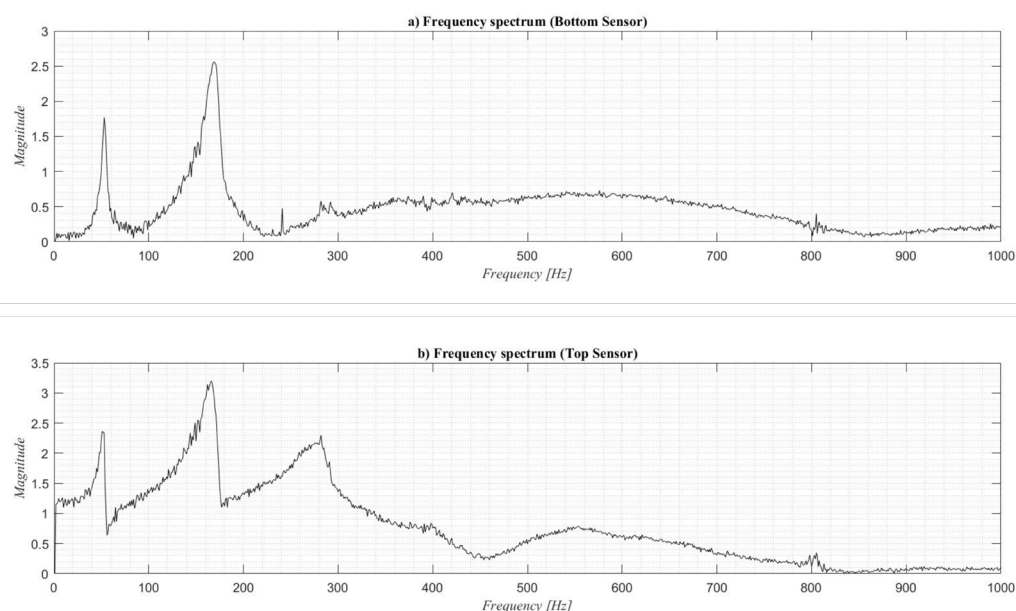
La Figura 8 ilustra la respuesta libre de la muestra de suelo con inclusión de agua registrada durante un periodo de 5 segundos por los acelerómetros inferior (8a) y superior (8b). Al utilizar como fuente de excitación un impacto ascendente en la base del banco de pruebas, se generaron tres principales frecuencias naturales, alrededor de los 53, 167 y 282 Hz. Al comparar las amplitudes de estas frecuencias en el espectro del acelerómetro inferior (Figura 8a), se aprecia una ligera ampli-ficación en del superior (Figura 8b).

**FIGURA 8.**

Respuesta libre, muestra de suelo con inclusión de agua:
a) espectro registrado en el acelerómetro inferior.

b) espectro registrado en el acelerómetro superior.

Fuente: elaboración propia.



Respuesta forzada

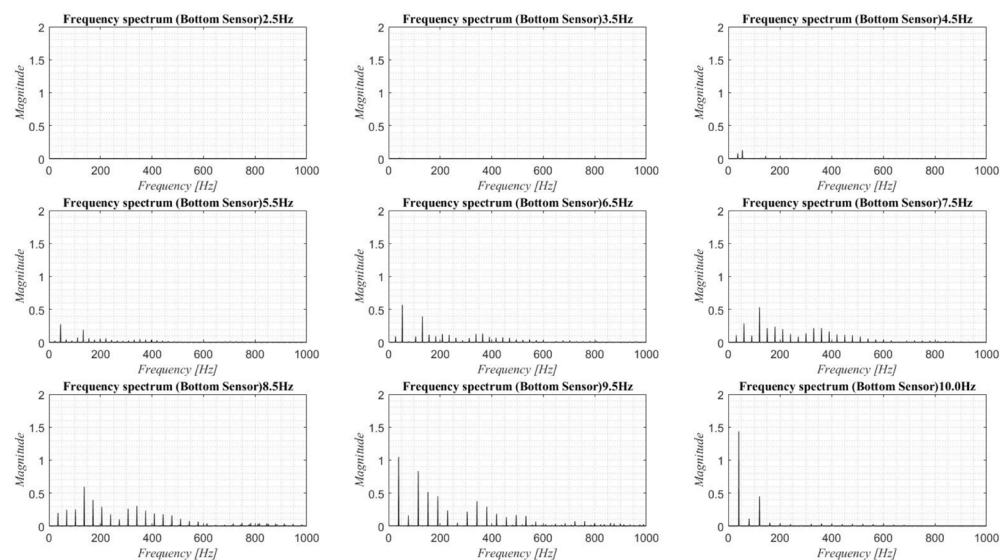
Las Figuras 9 y 10 muestran los espectros con amplitudes normalizadas a 270 unidades para los datos recogidos en un periodo de 5 segundos por los acelerómetros inferior y superior, utilizando las mismas frecuencias de excitación que los ensayos anteriores. A diferencia de los espectros de las Figuras 8a y 8b, se puede notar la aparición de armónicos con mayor densidad a partir de la excitación a 5.5 y hasta los 9.5 Hz; el valor máximo de amplitud en los 41 Hz se alcanza a la excitación de 10 Hz. En la Figura 9b se conjuntan los espectros individuales de la Figura 9a, enfatizando la forma y amplitudes del espectro.

La Figura 10a presenta los espectros recopilados por el acelerómetro superior. Aunque el comportamiento y la forma de los armónicos son similares a los obtenidos por el acelerómetro inferior, las amplitudes se reducen debido a la resistencia del material. La Figura 10b, que reúne todos los espectros individuales mostrados en 10a, asemeja la forma del espectro de la Figura 9b. A su vez, se puede observar a partir de los espectros generados, tanto por la inclusión vacía como por la inclusión de agua, que la densidad y la forma de los armónicos se mantienen similares en cada frecuencia de excitación, mientras que las amplitudes manifiestan ligeros aumentos con la inclusión de agua.

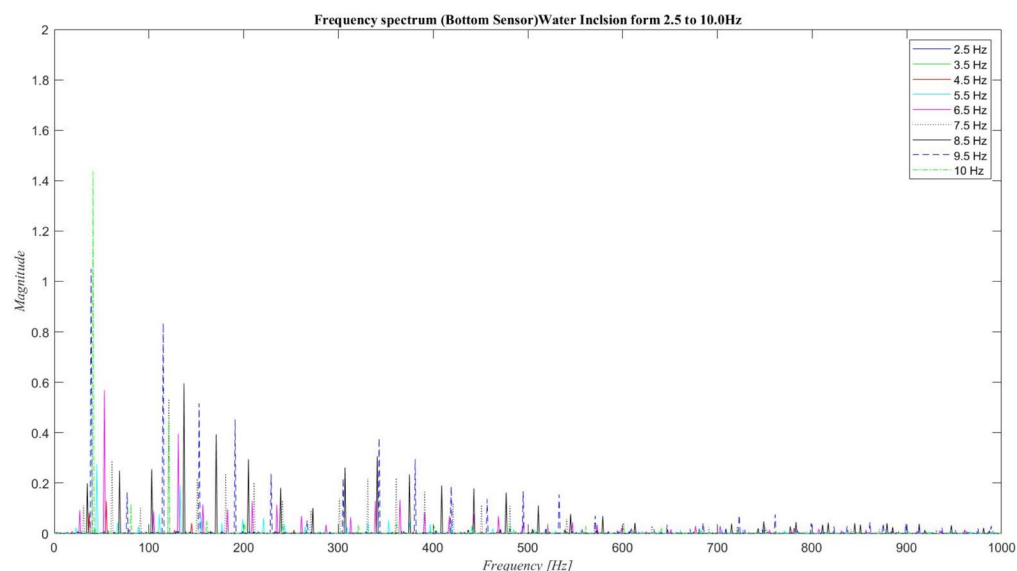
**FIGURA 9.**

Espectros de respuesta forzada, muestra de suelo con inclusión de agua, acelerómetro inferior:
a) espectros individuales.
b) excitación de 2.5 a 10 Hz.

Fuente: elaboración propia.



a)

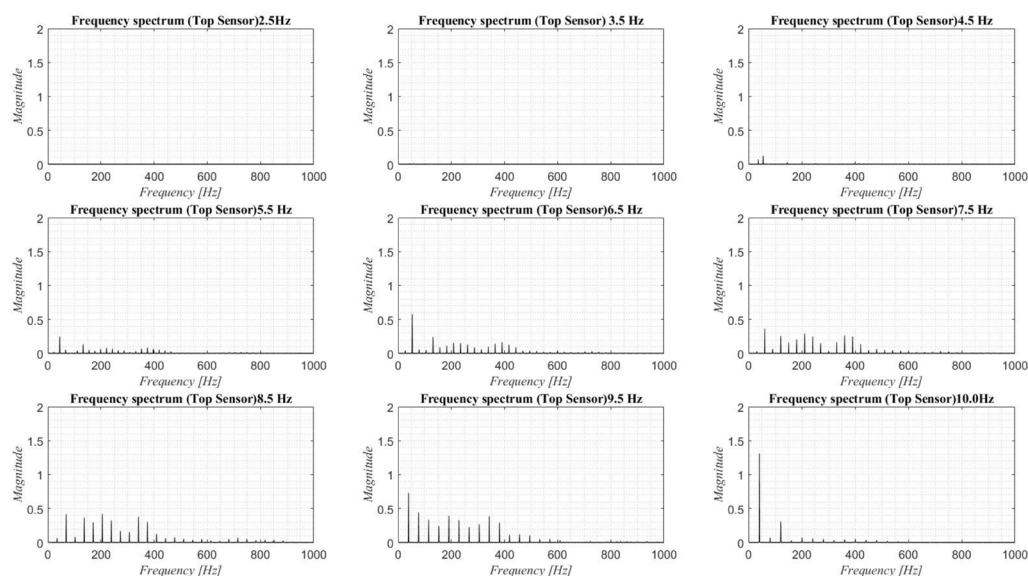


b)

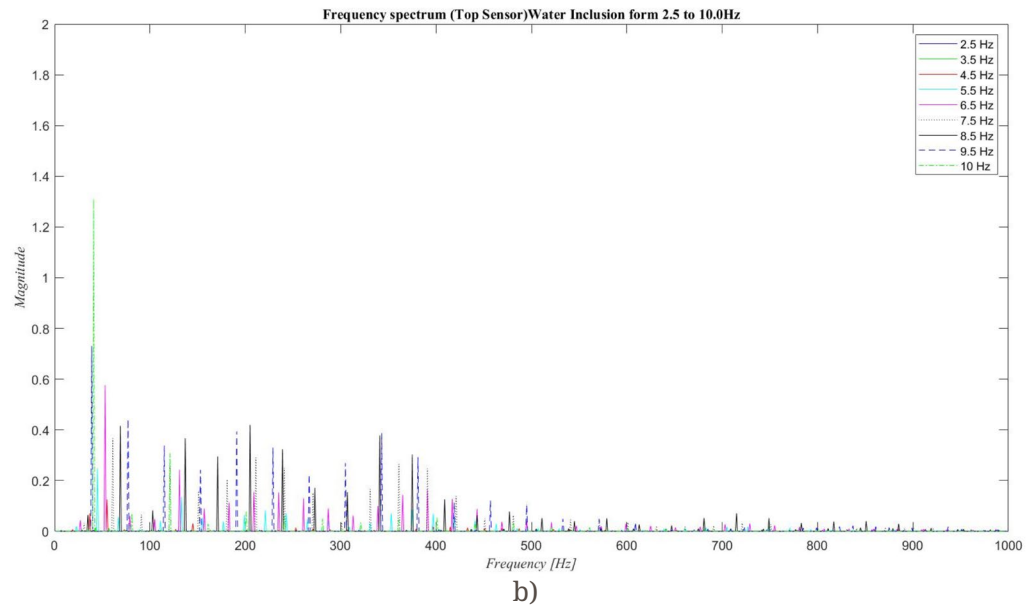
FIGURA 10.

Espectros de respuesta forzada, muestra de suelo con inclusión de agua, acelerómetro superior:
a) espectros individuales.
b) excitación de 2.5 a 10 Hz.

Fuente: elaboración propia.



a)

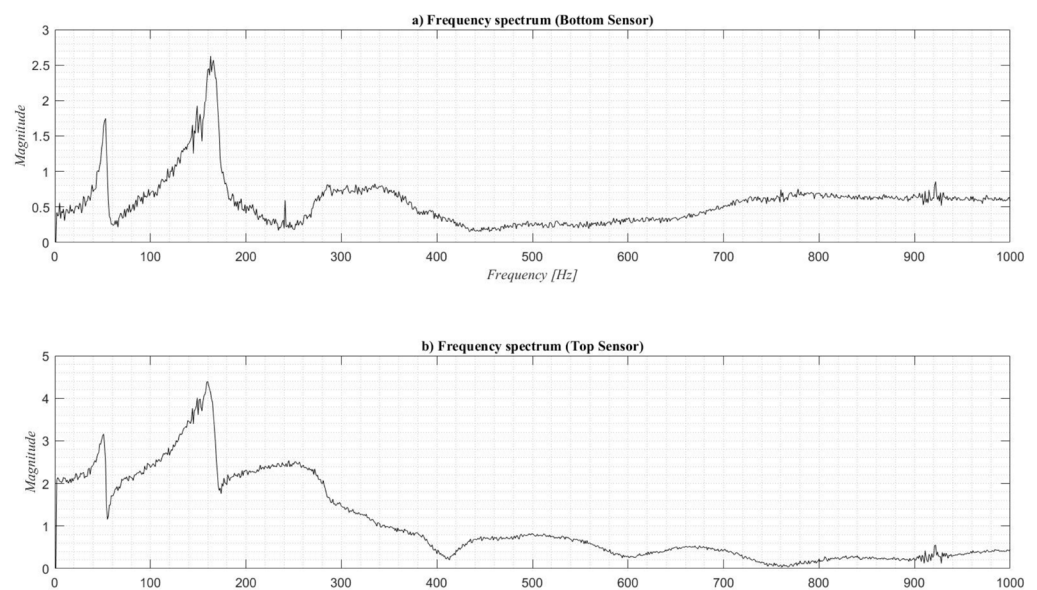


Banco de pruebas con muestra de suelo e inclusión fluida de petróleo

Respuesta libre

La Figura 11 presenta la respuesta libre de la muestra de suelo con inclusión de aceite captada durante un periodo de 5 segundos por los acelerómetros inferior (11a) y superior (11b). Para la respuesta libre de la Figura 11, se generan tres principales frecuencias naturales en ~ 53 , ~ 163 y ~ 241 Hz. Al comparar las amplitudes de estas magnitudes se pueden apreciar ampliificaciones de casi dos veces el valor inicial. Es de resaltar que los valores en amplitud para el caso de la inclusión de aceite son mayores respecto de la inclusión de agua (Figura 8), y aún más en cuanto a la muestra de suelo sin inclusión (Figura 5).

FIGURA 11.
 Respuesta libre generada por la muestra de suelo con inclusión de aceite:
 a) acelerómetro inferior.
 b) acelerómetro superior.
 Fuente: elaboración propia.





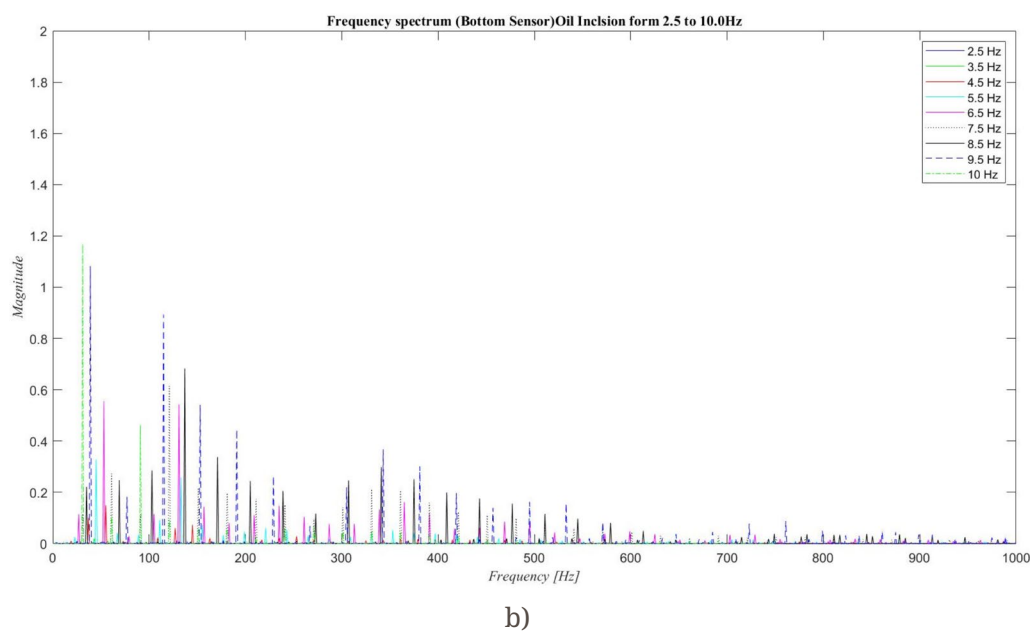
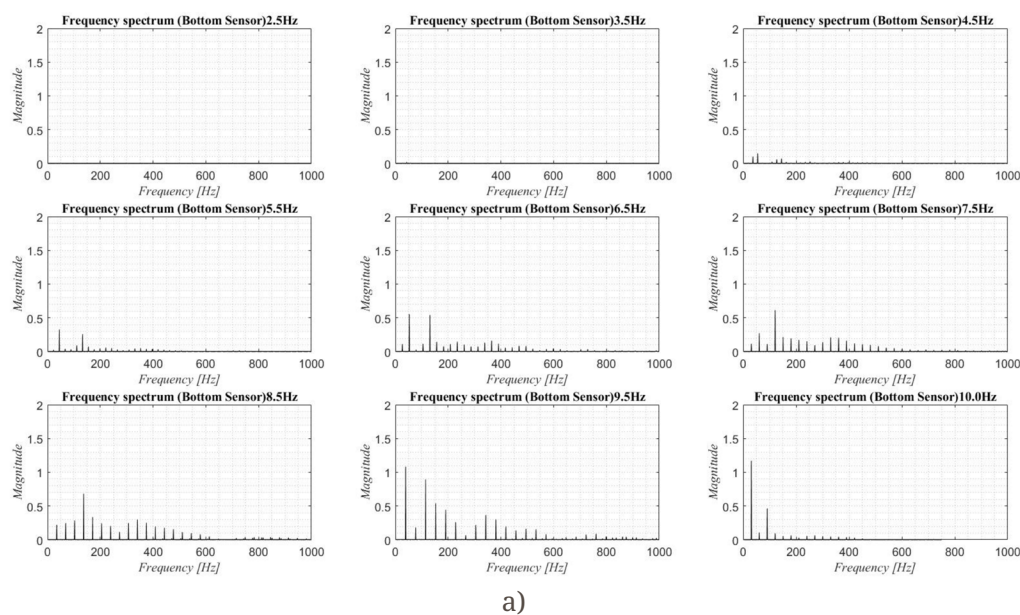
Respuesta forzada

Las Figuras 12 y 13 muestran los espectros con amplitudes normalizadas a 270 unidades recogidos en un periodo de 5 segundos por los acelerómetros. Los expuestos en 12a, correspondientes al acelerómetro inferior, presentan la forma y amplitudes para las frecuencias de excitación de 2.5 a 10 Hz con incrementos de 1 Hz. Al igual que en el caso de la inclusión de agua (Figura 9a y 9b), se observan armónicos con mayor densidad a partir de la frecuencia de excitación de 5.5 hasta los 9.5 Hz; de nuevo se alcanza el valor máximo de amplitud a la excitación de 10 Hz, en la frecuencia de ~31 Hz. En la Figura 12b se conjuntan los espectros individuales de la Figura 12a, enfatizando la forma y amplitudes del espectro.

FIGURA 12.

Espectros de respuesta forzada, muestra de suelo con inclusión de aceite, acelerómetro inferior:
a) espectros individuales.
b) excitación de 2.5 a 10 Hz.

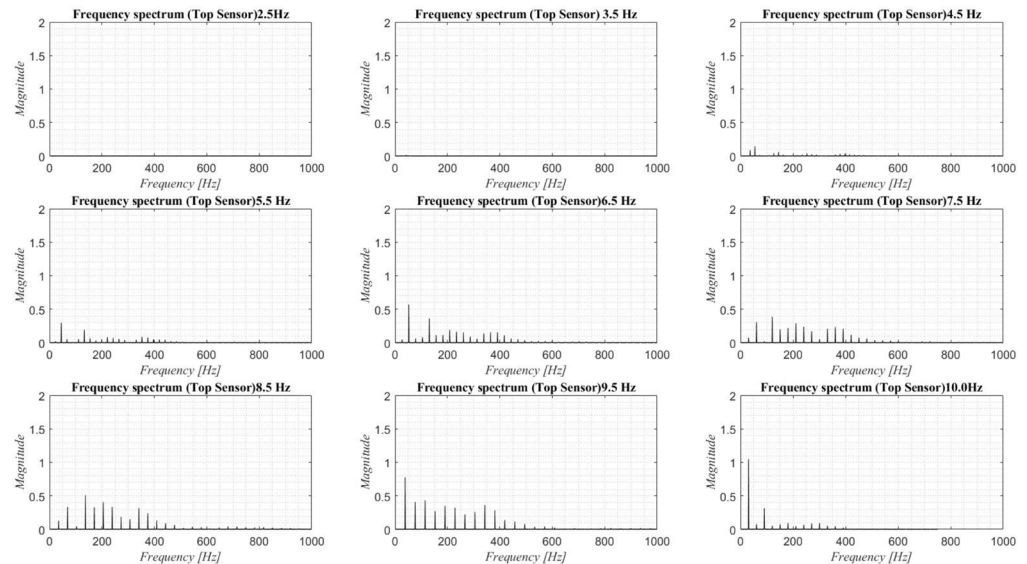
Fuente: elaboración propia.



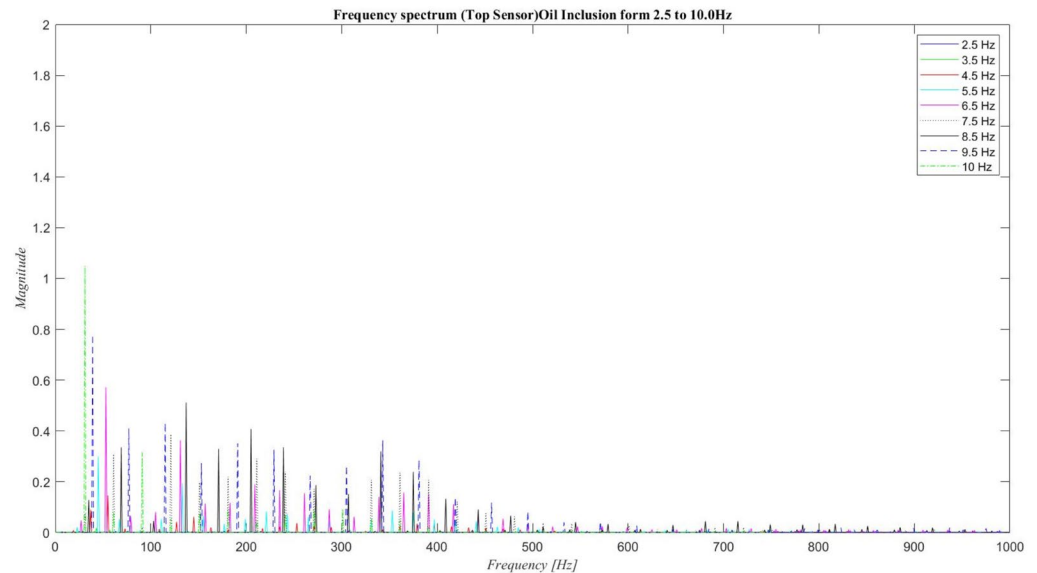


La Figura 13a presenta los datos del acelerómetro superior; bajo las mismas condiciones de excitación, el comportamiento y la forma de los armónicos son similares a los obtenidos por el acelerómetro inferior, salvo que las amplitudes se atenúan. La Figura 13b muestra la interacción de todos los espectros individuales, y guarda una relación estrecha en cuanto a la forma del espectro de la Figura 12b.

FIGURA 13.
Espectros de respuesta forzada, muestra de suelo con inclusión de aceite, acelerómetro superior:
a) espectros individuales.
b) excitación de 2.5 a 10 Hz.
Fuente: elaboración propia.



a)



b)

Análisis de los ensayos

En este apartado se resaltan los aspectos más importantes del comportamiento de respuesta libre y forzada del banco de pruebas para los casos en que se encuentra vacío y en que contiene la muestra de suelo con y sin inclusiones (vacía, agua y acei-



te). Para el análisis de respuesta libre se presenta la Figura 14, mientras que la respuesta forzada se exhibe en la Figura 15. Ambas están conformadas por los datos recabados del acelerómetro superficial y expuestos en las secciones anteriores.

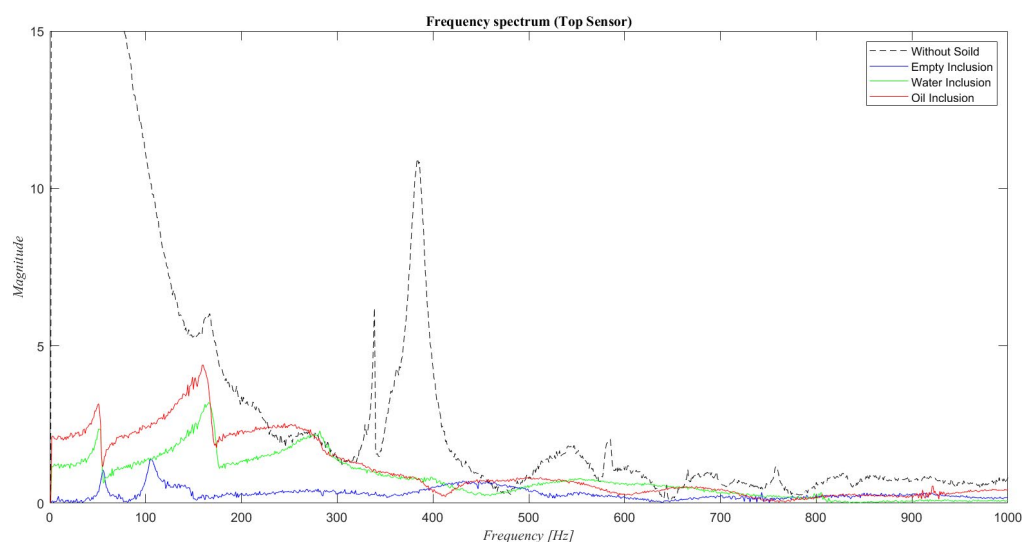
En la Figura 14, se grafica con línea discontinua el comportamiento del banco de pruebas vacío; se observa que las amplitudes máximas se generan a frecuencias mayores de 300 Hz. Este fenómeno es esencial para identificar las frecuencias críticas del banco de pruebas y evitarlas, pues podrían provocar que el banco entrara en resonancia, causando daños estructurales y comprometiendo los resultados del estudio. Por tal motivo, se aseguró que la excitación del banco de pruebas se llevara a cabo muy por debajo de esos valores. Asimismo, cabe reiterar que el valor tan elevado al inicio del espectro es atribuido al impacto del martillo de excitación.

Al comparar los ensayos, se observa que la respuesta de la inclusión vacía presenta las menores ampliaciones y que las inclusiones acuosa y oleosa responden de modo similar entre ellas; sin embargo, las ampliaciones derivadas del aceite son mayores que las del agua. Asimismo, si bien las amplitudes máximas para ambos fluidos se presentan en el rango de 50 a 180 Hz, al comienzo de sus espectros se aprecia una ampliación de alrededor de 1.2 unidades correspondientes a la inclusión de agua y aproximadamente 2 unidades para la de aceite. Dichas ampliaciones surgen de la interacción de las ondas de excitación con la muestra de suelo y la densidad del fluido, y contrastan con el comportamiento de la inclusión vacía, en cuyo espectro la ampliación inicial está ausente.

FIGURA 14.

Espectros de respuesta libre generados por el banco de pruebas vacío (línea discontinua) y con muestra de suelo e inclusiones.

Fuente: elaboración propia.

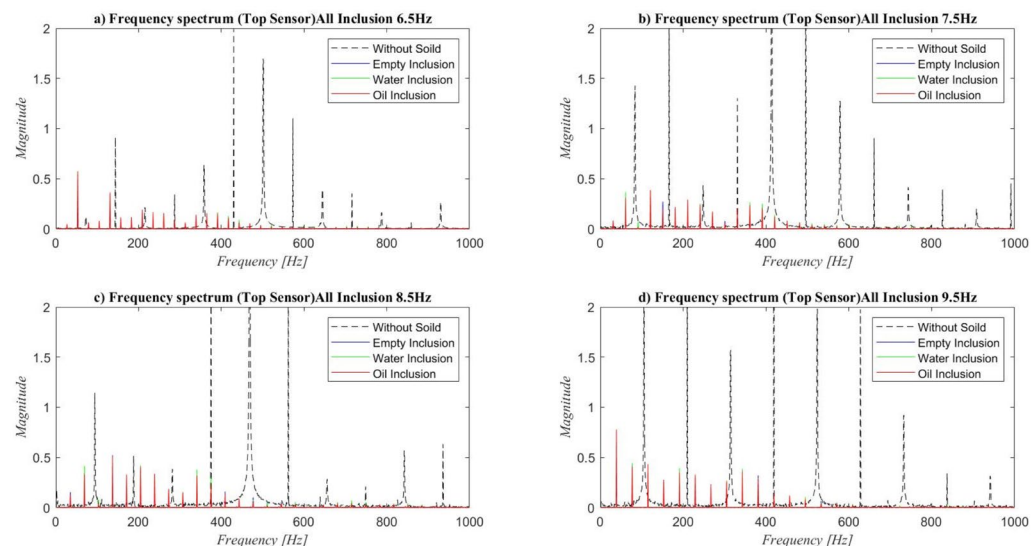


El análisis de respuestas forzadas (Figura 15) se centra en los valores de excitación de 6.5 a 9.5 Hz, debido a que en este rango se genera la mayor densidad de armónicos. Como se puede observar, las amplitudes máximas aparecen en la respuesta del banco de pruebas sin muestra de suelo a ~400 Hz, mientras que los valores


FIGURA 15.

Espectros de respuesta forzada generados por el banco de pruebas vacío (línea discontinua) y con muestra de suelo e inclusiones; vacía (línea continua azul), agua (línea continua verde) y aceite (línea continua roja) utilizando el acelerómetro superior.

Fuente: elaboración propia.

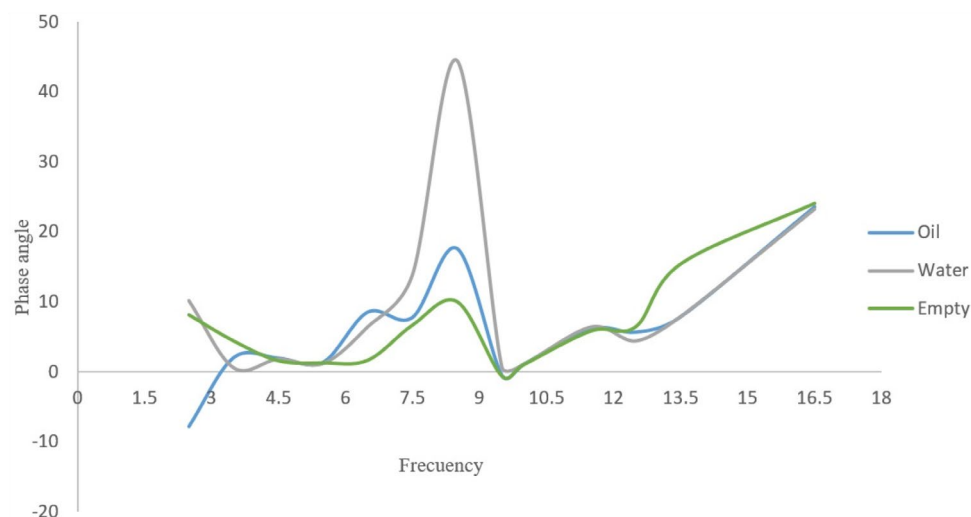


En último lugar, la Figura 16 ilustra el retardo de fase en función de los datos recopilados por los acelerómetros inferior y superior para los tres tipos de inclusión. Se evidencia que el mayor retardo significativo se presenta a la frecuencia de 8.5 Hz y corresponde a la inclusión acuosa.

FIGURA 16.

Retardo de fase para las inclusiones; vacía (línea azul), agua (línea gris) y aceite (línea azul).

Fuente: elaboración propia.



Conclusiones

El desarrollo experimental realizado muestra que los parámetros de interacción entre la fuente de excitación, la muestra de suelo y la presencia de una inclusión fluida determinan la manera en que se propagan y amplifican (o atenúan) las ondas



sísmicas. En cuanto a la velocidad de propagación, la respuesta libre de la muestra sin y con inclusiones (Figuras 5b, 8b y 11b) demuestra que el cambio de rigidez en el suelo ralentiza la onda. En relación con el comportamiento de amplitudes, la mayor magnitud para el suelo sin inclusión se produce a alrededor de los 100 Hz, mientras que con la inclusión de agua y aceite se alcanzan a alrededor de los 130 Hz. Por otro lado, tanto las inclusiones de agua como de aceite amplifican la señal inicial, pero la oleosa tiene un efecto más notorio. Para el caso del desfase (Figura 16), la inclusión acuosa presenta el mayor retardo en comparación con la inclusión vacía y de aceite.

La investigación propone contribuir al entendimiento de cómo las inclusiones fluidas afectan la propagación de ondas, en virtud de mejorar los diseños de edificaciones y otras infraestructuras para resistir de manera más efectiva los eventos telúricos. El modelo desarrollado tiene potencial como herramienta predictiva con el fin de evaluar la estabilidad de suelos propensos a movimientos tectónicos, especialmente aquellos con niveles elevados de saturación de agua subterránea. El estudio realizado puede ser de utilidad en la exploración petrolera, donde la presencia de fluidos en el subsuelo es común.

Para terminar, es necesario valorar que las pruebas de laboratorio están limitadas en cuanto a escala y complejidad, específicamente con las muestras de suelo, donde la heterogeneidad natural y las condiciones de saturación varían significativamente en campo, lo que puede afectar la generalización de los resultados. Del mismo modo, los modelos geométricos de las inclusiones simplifican ciertos aspectos del comportamiento de los fluidos y podrían reducir el poder predictivo del sistema. Con el fin de subsanar los aspectos anteriores, se puede llevar a cabo la experimentación de campo con el objetivo de validar y complementar los resultados de laboratorio, así como considerar una mayor variedad de condiciones geológicas y de saturación en pro de la aplicabilidad de los resultados a diferentes contextos.

Agradecimientos

Los autores expresan gratitud al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación, así como la facilidad para el uso de laboratorios e instrumentos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.



Referencias

- [1] D. G. Aggelis y T. Shiotani, "Experimental study of surface wave propagation in strongly heterogeneous media", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 122, núm. 5, p. 151-157, 2007, doi: 10.1121/1.2784151
- [2] G. O. Bogado y F. M. Francisca, "Shear wave propagation in residual soil-rigid inclusion mixtures", *Powder Technology*, vol. 343, pp. 595-598, 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2018.11.074
- [3] N. Agofack, S. Lozovyi y A. Bauer, "Effect of CO₂ on P- and S-wave velocities at seismic and ultrasonic frequencies", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 78, pp. 388-399, 2018. doi: 10.1016/j.ijggc.2018.09.010
- [4] U.S. Army Corps of Engineers (Washington, D.C., EUA, 1995), *Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations (EM 1110-1-1802)*. [En línea]. Disponible: [https://damtoolbox.org/wiki/Geophysical_Exploration_for_Engineering_and_Environmental_Investigations_\(EM_1110-1-1802\)](https://damtoolbox.org/wiki/Geophysical_Exploration_for_Engineering_and_Environmental_Investigations_(EM_1110-1-1802))
- [5] T. Cadoret, D. Marion y B. Zinszner "Influence of frequency and fluid distribution on elastic wave velocities in partially saturated limestones", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. B6, vol. 100, pp. 9789-9803, 1995, doi: 10.1029/95JB00757
- [6] R. Ciz, J. Toms y B. Gurevich, "Attenuation and dispersion of elastic waves in a poroelastic medium with spherical inclusions", en *Proceedings of the 3rd Biot Conference on Poromechanics*, Univ. Oklahoma, AA. Balkema, pp. 201-207, 2005. doi: 10.1201/NOE0415380416.ch32
- [7] J. E. White, "Computed seismic speeds and attenuation in rocks with partial gas saturation", *Geophysics*, vol. 40, pp. 224-232, 1975, doi: 10.1190/1.1440520
- [8] M. L. Batzle, D. H. Han y R. Hofmann, "Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity — Direct measurements", *Geophysics*, vol. 71, pp. 1-10, 2006, doi: 10.1190/1.2159053
- [9] M. B. Rapoport, L. I. Rapoport y V. I. Ryjkov, "Direct detection of oil and gas fields based on seismic inelasticity effect", *The Leading Edge*, vol. 23, pp. 276-278, 2004, doi: 10.1190/1.1690901
- [10] M. Chapman, E. Liu y X. Y. Li, "The influence of fluid sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis", *Geophysical Journal International*, vol. 167, núm. 1, pp. 89-105, 2006, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02919.x
- [11] B. Quintal, S. M. Schmalholz y Y. Y. Podladchikov, "Impact of fluid saturation on the reflection coefficient of a poroelastic layer", *Geophysics*, vol. 76, pp. 1-12, 2011, doi: 10.1190/1.3553002
- [12] J. G. Rubino, D. R. Velis y M. D. Sacchi, "Numerical analysis of wave-induced fluid flow effects on seismic data: Application to monitoring of CO₂ storage at the Sleipner field", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 116, núm. B3, art. B03306, 2011, doi: 10.1029/2010JB007997
- [13] J. Paffenholz y H. Burkhardt, "Absorption and modulus measurements in the seismic frequency and strain range on partially saturated sedimentary rocks", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 94, núm. B7, pp. 9493-9507, 1989, doi: 10.1029/jb094ib07p09493
- [14] J. Behura, M. Batzle, R. Hofmann y J. Dorgan, "The shear properties of oil shales", *The Leading Edge*, vol. 28, pp. 850-855, 2009, doi: 10.1190/1.3167788
- [15] K. A. Belibassakis, G. Arnaud, V. Rey y J. Touboul, "Propagation and scattering of waves by dense arrays of impenetrable cylinders in a waveguide", *Wave Motion*, vol. 80, pp. 1-19, 2018, doi: 10.1016/j.wavemoti.2018.03.007
- [16] M. A. Biot, "General Theory of Three-Dimensional Consolidation", *Journal of Applied Physics*, vol. 12, pp. 155-164, 1941, doi: 10.1063/1.1712886
- [17] D. L. Johnson, "Theory of frequency dependent acoustics in patchy-saturated porous media", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, núm. 2, pp. 682-694, 2001, doi: 10.1121/1.1381021
- [18] S. R. Pride y J. G. Berryman, "Linear dynamics of double-porosity dual-permeability materials. I. Governing equations and acoustic attenuation", *Physical Review E*, vol. 68, art. 036603, 2003, doi: 10.1103/PhysRevE.68.036603
- [19] T. M. Müller y B. Gurevich, "One-dimensional random patchy saturation model for velocity and attenuation in porous rocks", *Geophysics*, vol. 69, pp. 1166-1172, 2004, doi: 10.1190/1.1801934
- [20] B. Vogelaar, D. Smeulders y J. Harris, "Exact expression for the effective acoustics of patchy-saturated rocks", *Geophysics*, vol. 75, núm. 4, pp. 87-96, 2010, doi: 10.1190/1.3463430
- [21] X. Liu, S. Greenhalgh y B. Zhou, "Scattering of plane transverse waves by spherical inclusions in a poroelastic medium", *Geophysical Journal International*, vol. 176, núm. 3, pp. 938-950, 2009, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.04026.x
- [22] S. Chapman, J. V. M. Borgomano, B. Quintal, S. M. Benson y J. Fortin, "Seismic Wave Attenuation and Dispersion Due to Partial Fluid Saturation: Direct Measurements and Numerical Simulations Based on X-ray CT", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 126, núm. 4, 2021, doi: 10.1029/2021JB021643
- [23] N. Tisato, K.T. Spikes, N. Saxena y R. Hofmann, "Scattering and Frequency Effects on Ultrasonic Velocities of Carbonates", *Journal of Geophysics Research: Solid Earth*, vol. 129, núm. 2, 2023, doi: 10.22541/essoar.167870433.38241636/v1



- [24] C. Sun, J. Fortin, G. Tang y S. Wang, "Prediction of dispersion and attenuation on the elastic wave velocities in partially saturated rock based on fluid distribution obtained from three-dimensional 3D micro-CT images", *Frontiers in Earth Science*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/feart.2023.1267522
- [25] H. S. Sutiyoso, S. K. Sahoo, L. J. North, T. A. Minshull, I.H. Falcon Suarez y A. I. Best, "Laboratory measurements of water saturation effects on the acoustic velocity and attenuation of sand packs in the 1–20 kHz frequency range", *Geophysical Prospecting*, vol. 72, núm. 9, pp. 3316–3337, 2024, doi: 10.1111/1365-2478.13607
- [26] R. Ma, J. Ba, M. Lebedev, B. Gurevich y Y. Sun, "Effect of pore fluid on ultrasonic S-wave attenuation in partially saturated tight rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 147, art. 104910, 2021, doi: 10.1016/j.ijrmms.2021.104910
- [27] M.L. Pérez Rea, "Predicción de propiedades mecánicas y reológicas de suelos usando teoría de percolación", Tesis de doctorado, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Estado de México, México, 2005.
- [28] PCB Piezotronics, "Products", 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.pcb.com>.
- [29] TIRA GmbH, "Vibration Test System", 2024. [En línea]. Disponible: https://www.tira-gmbh.de/fileadmin/inhalte/download/schwingprueftechnik/prospekte/EN/TIRA_selection_guide_01_2024.pdf
- [30] Analog Devices, "Products—ADXL103", 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.analog.com/en/products/adxl103.html>
- [31] National Instruments, "Support documentation—63xx Models", 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ni.com/en/support/documentation/cable-accessory-guide/daq-multifunction-i-o-cable-accessory-compatibility/main-page---daq-multifunction-i-o-cable-and-accessory-compatibility/63xx-models.html>



Diseño de una máquina para pruebas biaxiales en tejido blando

Design of a biaxial soft tissue testing machine

 Jesús Ariel Gómez Martínez*

 Christopher René Torres San Miguel

Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México,
México

* jgomezm1403@alumno.ipn.mx

05

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

J. A. Gómez Martínez y C. R. Torres San Miguel,
“Diseño de una máquina para pruebas biaxiales
en tejido blando,” *Perspectivas de la Ciencia y la
Tecnología*, vol. 8, no. 15, pp.73-81, 2025.



Resumen

En el estudio tiene lugar el diseño de una máquina de ensayos biaxiales para evaluar la respuesta mecánica de tejidos biológicos bajo tensión controlada en dos direcciones perpendiculares. Tales pruebas son angulares para determinar las constantes elásticas de los materiales y analizar sus características anisotrópicas y ortotrópicas. No obstante, los equipos comerciales suelen ser costosos, lo que limita su accesibilidad para laboratorios con presupuestos ajustados. El diseño utiliza componentes asequibles y disponibles, como servomotores bifásicos NEMA 23 y celdas de carga DYM-103, montados sobre placas de acrílico perforadas. Respecto a la configuración de los motores, se permite la aplicación de fuerzas de manera perpendicular sobre la muestra, mientras que el sistema de sujeción a través de rastrillos distribuye las cargas para evitar daños

en los tejidos frágiles. Para ello, se integró una placa Arduino Mega 2560 con controladores TB6600 y amplificadores HX711 para manipular de manera independiente cada eje. El diseño se validó mediante simulaciones en SolidWorks Premium 2022, utilizando análisis de elementos finitos (FEA) para identificar zonas críticas de esfuerzo y optimizar la estructura. Los resultados arrojaron una distribución de las cargas sin superar los límites elásticos del material, garantizando la seguridad y funcionalidad del dispositivo durante su operación. En últimas, el presente diseño actúa como una alternativa compacta, económica y versátil para estudios biomecánicos, ya que permite la caracterización de tejidos biológicos con precisión y replicabilidad, sin comprometer la integridad estructural del sistema ni generar costos elevados de fabricación y mantenimiento.

Palabras clave: Arduino Mega 2560, elementos finitos, estado plano de esfuerzos, pruebas biaxiales, tejido biológico, SolidWorks.

Abstract

The design of a biaxial testing machine to evaluate the mechanical response of biological tissues under controlled tension in two perpendicular directions is presented. This type of testing is essential for determining the elastic constants of materials and for evaluating their anisotropic and orthotropic characteristics. However, the expense of commercial equipment often restricts its accessibility for laboratories whose financial resources are limited. The proposed design relies on both affordable and widely available components, including two-phase NEMA 23 servo motors and DYM-103 load cells, attached on a perforated acrylic plate. The configuration of the servo motors enables the application of forces perpendicular to the specimen, while the rake

clamping system distributes loads more effectively, thereby preventing damage to fragile tissues. The Arduino Mega 2560 board was complemented with TB6600 controllers and HX711 amplifiers to independently manipulate each axis. The design was later validated with the use of simulations in SolidWorks Premium 2022, employing finite element analysis (FEA) to identify critical stress zones and optimize the structure. The findings indicated that the load distribution was sufficient without surpassing the elastic limits of the material, thereby ensuring the safety and functionality of the device during operation. In summary, this design offers a compact, economical and versatile alternative for biomechanical studies.

Keywords: Arduino Mega 2560, finite elements, plane state of stress, biaxial testing, biological tissue, SolidWorks.



Introducción

Un ensayo biaxial es una prueba para estipular las constantes elásticas de un material; al someterlo a fuerzas en dos direcciones perpendiculares y examinar sus respuestas en cuanto a linealidad y desviaciones, se adquiere información sobre los comportamientos anisotrópicos y ortotrópicos [1]. El equipo para realizar estas pruebas debe ser capaz de sujetar el material de prueba de manera distribuida y aplicar fuerzas controladas en múltiples direcciones, logrando un estado plano y uniforme de esfuerzos en el centro de la muestra [2]. Se denomina *estado plano de esfuerzos* a la condición en que las componentes del esfuerzo sobre los planos normales al eje z , zx y zy , son nulas, están siempre contenidas en el plano xy ; es decir, es un estado completamente definido por las componentes x , y , xy [3].

En el mercado hay equipos que ofrecen entornos controlados y software especializado de adquisición de datos para realizar pruebas biaxiales; dichas pruebas son necesarias en una variedad de aplicaciones, como la caracterización de materiales compuestos, polímeros, metales y tejidos biológicos. Sin embargo, la principal desventaja de estos equipos es su elevado precio (además del costo del software especializado, mantenimiento y accesorios como sensores o sistemas de sujeción adicionales), lo que limita accesibilidad para laboratorios o centros de investigación con presupuestos restringidos.

Jiang *et al.* [4] desarrollaron una máquina automatizada capaz de realizar ensayos uniaxiales, biaxiales y de cizallamiento, y generaron su respectivo protocolo de prueba. Desde su perspectiva, Corti *et al.* [5] proponen el diseño de un sistema biaxial de pruebas de materiales (BiMaTS, por su acrónimo en inglés) apto para un extenso rango de dimensiones de muestra; dado que el BiMaTS emplea componentes comerciales estandarizados, su fabricación y mantenimiento son asequibles y prácticos. En esa misma línea de desarrollo, la presente investigación tiene como objetivo el diseño de un dispositivo de ensayos biaxiales compacto, económico y versátil para realizar pruebas a tensión en tejido biológico.

Materiales y métodos

El dispositivo biaxial propuesto se basa en el sistema utilizado para muestras planas en forma de cruceta y muestras cuadradas sujetadas a través de un BioRake [6]. El archivo CAD coherente se construyó en el software SolidWorks Premium 2022 [7] porque sus herramientas de simulación dinámica y estática facilitan la validación del diseño previa a la fabricación para asegurar que el equipo soporte las fuerzas biaxiales previstas sin comprometer su integridad o funcionamiento. El



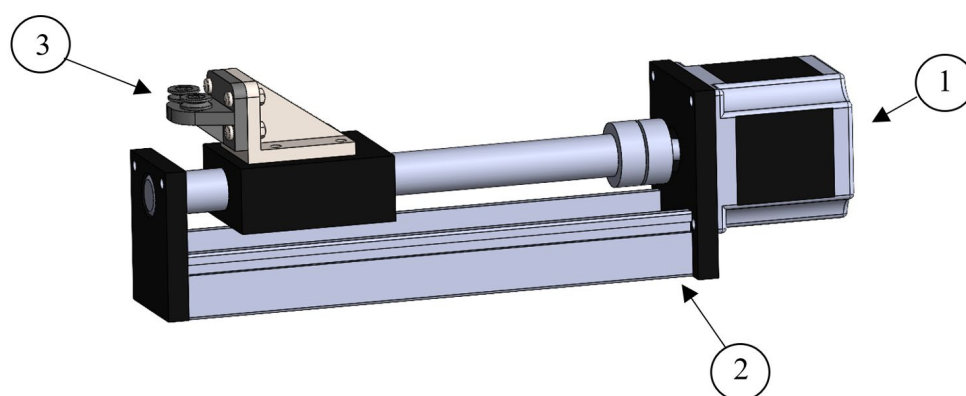
proceso de diseño comienza con el modelado de cada componente individual, replicando las piezas existentes en el mercado y añadiendo las que deben fabricarse en función de su ensamblaje. En ese sentido, se empleó el complemento de análisis de elementos finitos (FEA) sobre el modelo CAD de SolidWorks para simular las cargas y esfuerzos que experimentarán las piezas del dispositivo, como los sistemas de sujeción de la muestra y los puntos de unión de los motores. Asimismo, identificaron las probables zonas de fallo a partir del análisis estructural para optimizar el diseño a fin de reducir las concentraciones de esfuerzo y reforzar las áreas más sensibles.

El sistema de transmisión de fuerza del dispositivo (Figura 1) consta de cuatro servomotores bifásicos NEMA 23, capaces de suministrar una fuerza de 294.3 N con una velocidad máxima de 50 mm/s; este modelo de motor permite realizar ensayos cíclicos acoplados a las necesidades del usuario. Cada uno se acopla a una cama de tuerca deslizante M4 con un recorrido de 150 mm a una resolución de 0.109 $\mu\text{m}/\text{paso}$. Sobre la cama se fija el sistema de sujeción para la muestra y una celda de carga DYMH-103, con un rango de capacidad de 0-490.5 N, una sensibilidad de 1.0-1.5 mV/V y una frecuencia de respuesta de 10 kHz. El eje de aluminio 6061-T6 que conecta al motor con la cama deslizante cuenta con un límite elástico de 275 MPa y un esfuerzo máximo de 310 MPa.

FIGURA 1.

Diseño del sistema de transmisión de fuerza:
1) motor NEMA 17.
2) cama deslizante.
3) sistema de sujeción.

Fuente: elaboración propia.



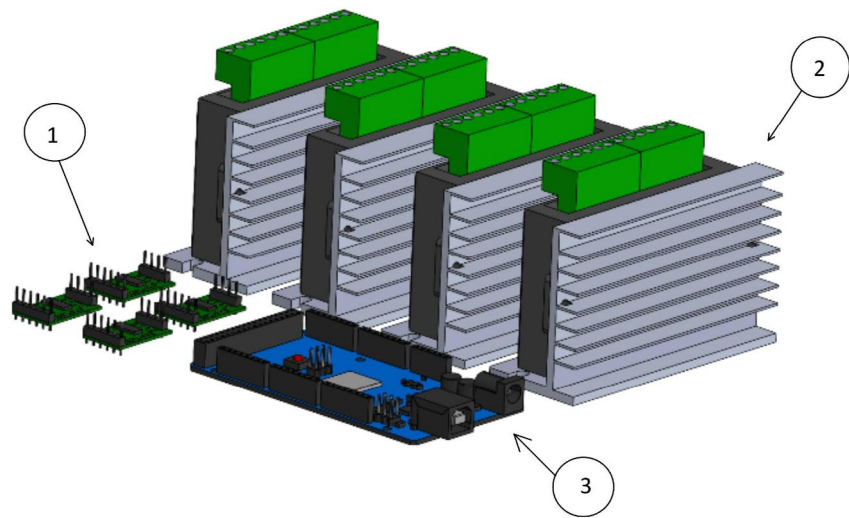
A su vez, el sistema de control para el dispositivo (Figura 2) se basa en una placa Arduino Mega 2560, controladores TB6600 y amplificadores de señal HX711 a 24 bits de doble canal conectados a cada motor con el propósito de manipular de forma independiente cada eje.

FIGURA 2.

Representación CAD del sistema de control:

- 1) amplificador HX711.
- 2) controlador TB6600.
- 3) Arduino Mega 2560.

Fuente: elaboración propia.



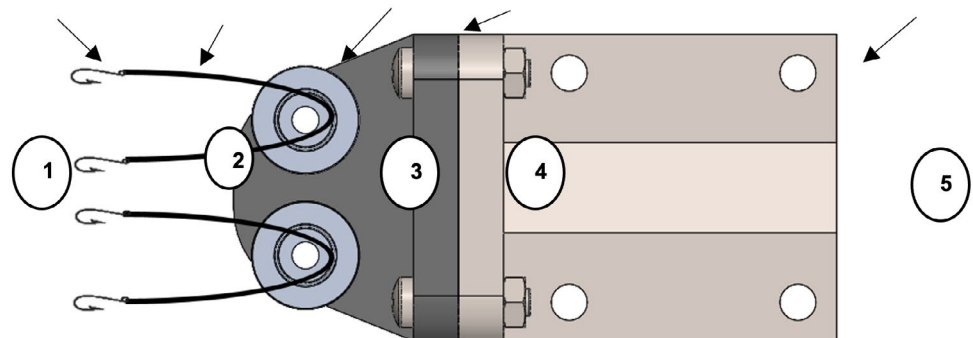
El diseño del sistema de sujeción para las muestras (Figura 3) se basó en las mordazas utilizadas en los equipos comerciales; no obstante, debido a la fragilidad del material para el que está destinado este dispositivo, se optó por una sujeción mediante rastrillos de tipo anzuelo fijados a cada lado de la muestra. Los ganchos están conectados por un hilo de acero inoxidable recubierto de nilón que pasa por una polea de aluminio M4. Las mordazas tradicionales pueden generar puntos de presión que dañan los tejidos delicados, mientras que los rastrillos distribuyen mejor las fuerzas aplicadas, minimizando el riesgo de roturas o deformaciones indeseadas. El diseño de la base permite que la pieza sea impresa en 3D para facilitar su instalación y remplazo.

FIGURA 3.

Vista de planta, diseño del soporte de los rastrillos:

- 1) anzuelo.
- 2) hilo de acero recubierto de nilón.
- 3) polea de aluminio M4.
- 4) soporte.
- 5) base del soporte.

Fuente: elaboración propia.



Los componentes se montan sobre dos placas de acrílico perforadas, colocando cada par de motores encontrados entre sí en un arreglo perpendicular horizontal dispuesto para ejercer fuerzas biaxiales (Figura 4); la distancia entre cada par puede variar para ampliar o disminuir el área destinada de operación según los requerimientos de la prueba. El desplazamiento y tiempo de ejecución de los motores están controlados por la unidad HX711 a través de la interfaz Arduino. En el transcurso del ensayo, el sistema de control de los motores de cada eje consigna el desplazamiento desde un punto inicial para calcular la deformación sufrida por la muestra. Los

datos reconocidos por las celdas de carga vinculados a la fuerza ejercida en cada eje posibilitan la generación de dos gráficas: carga-tiempo (asignada al eje *x*) y desplazamiento-tiempo (eje *y*). Para unificar estas gráficas se recurrió al método de interpolación de Lagrange, utilizado para aproximar una función desconocida a partir de un conjunto de puntos conocidos mediante el denominado *polinomio de Lagrange* [8].

FIGURA 4.
Vista explosionada
del ensamble.
Fuente:
elaboración propia.

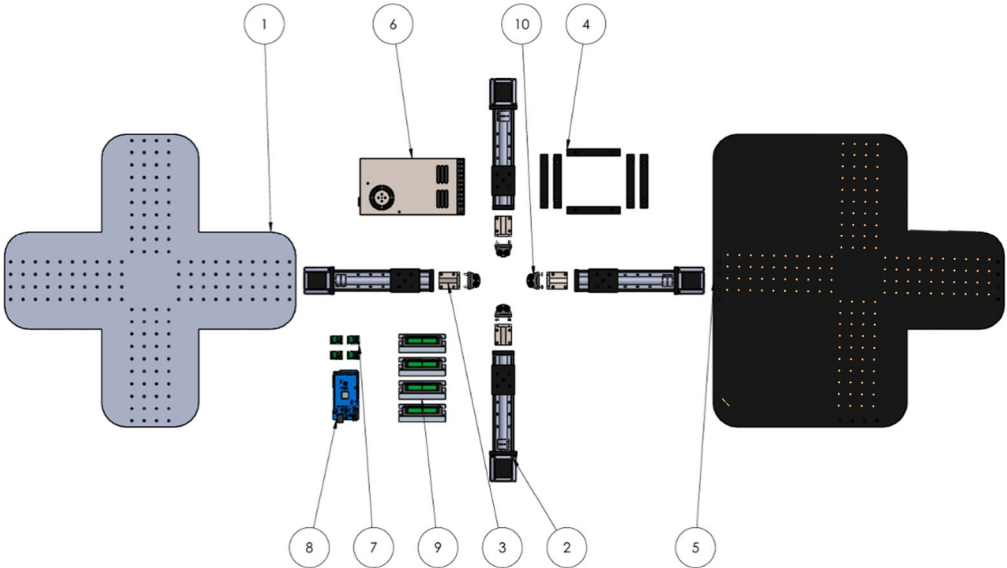


TABLA 1.
Resultados de la prueba
de tensión realizada
a las fibras poliméricas.
Fuente:
elaboración propia.

ID	PIEZA	CANTIDAD
A	Placa base A	1
B	Motor pasos NEMA	4
C	Soporte del sistema de sujeción	4
D	Separador para placa	6
E	Placa base B	1
F	Fuente de alimentación	1
G	HX711	4
H	Arduino Mega_STEP_AP203	1
I	TB6600	4
J	Sistema de sujeción	4



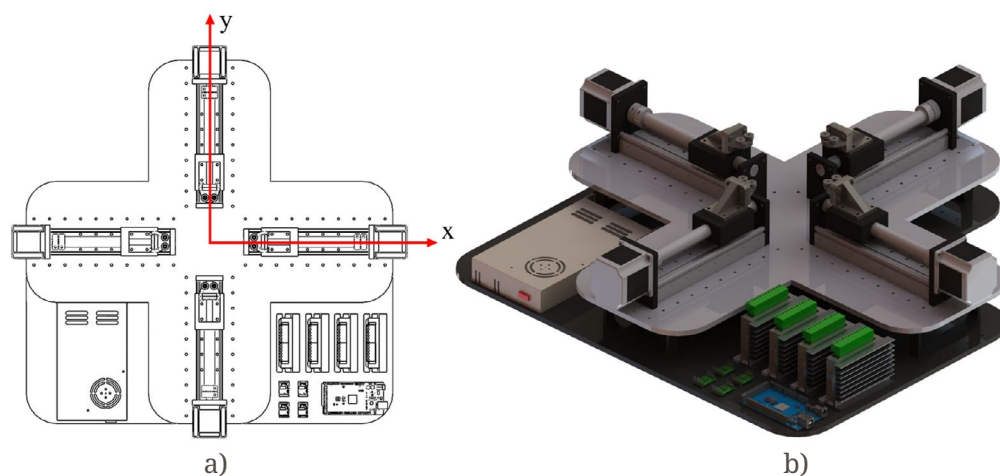
Diseño conceptual

El ensamblaje realizado en SolidWorks despliega la distribución de los componentes montados en las placas de acrílico. La Figura 5A ilustra una vista de planta de la distribución de los componentes, mientras que la Figura 5B muestra una representación renderizada del dispositivo completo. La distribución simétrica de los motores permite desplegar fuerzas en direcciones perpendiculares a la muestra de tejido. Las placas de acrílico perforadas hacen viable modificar la configuración de los componentes según los requerimientos de cada prueba, con un área mínima destinada a la muestra de 10×10 mm y una máxima de 120×120 mm.

FIGURA 5.

- a) Distribución de los componentes.
- b) Representación renderizada.

Fuente:
elaboración propia.



Condiciones de frontera

En el diseño de la máquina se han definido dos tipos principales de condiciones de frontera para replicar las cargas y restricciones a las que se someterá el dispositivo durante su operación. Las fijaciones aplicadas aseguran que las mordazas permanezcan estables y sujetas; a su vez, las fuerzas simulan el esfuerzo máximo que cada motor puede ejercer sobre el tejido. El análisis estático proporciona información sobre la deformación, esfuerzos mínimos y máximos en el ensamblaje para verificar que el diseño sea estructuralmente adecuado para soportar las cargas durante el proceso de las pruebas.

- Sujeción para la simulación estática realizada en SolidWorks: el sistema se ancla en los puntos céntricos de las poleas que sujetan los anzuelos (Figura 6A); en cada sistema de motor se restringe el movimiento a su propio eje horizontal. Se asume que las mordazas no experimentan ningún tipo de rotación.

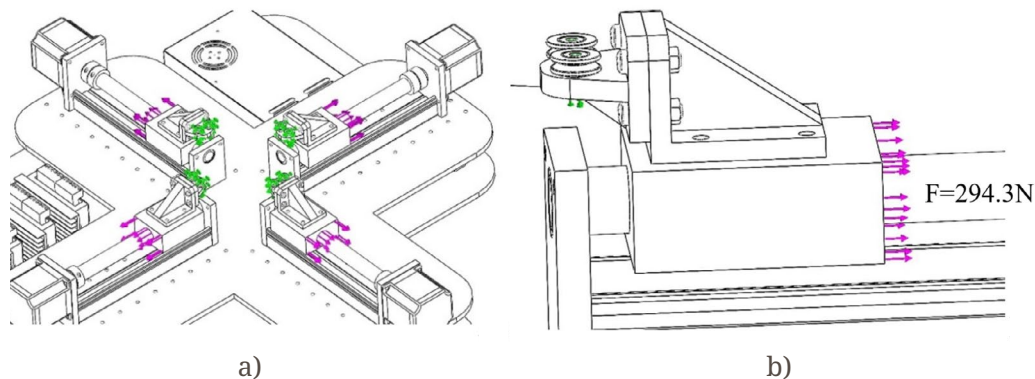


- Aplicación de fuerzas: se ejercen fuerzas de 294.3 N en cada eje (la máxima por motor). Como se observa en la Figura 6B, las fuerzas fueron aplicadas en la cama deslizante a lo largo del eje de movimiento del sistema de transmisión de fuerza.

FIGURA 6.

- a) Representación de condiciones de frontera.
b) Vista detallada del sistema de sujeción.

Fuente: elaboración propia.



Resultados

El análisis estático del ensamblaje muestra que los esfuerzos se distribuyen con exactitud en las piezas sometidas a la fuerza aplicada (Figuras 7 y 8). Como se observa en los campos de esfuerzos, se alcanza un valor máximo de 101.2 MPa en el eje de aluminio. Los esfuerzos sufridos durante el estudio estático están por debajo del límite elástico del material, lo que garantiza que el diseño es estructuralmente seguro para soportar las fuerzas aplicadas durante las pruebas.

FIGURA 7.

Estudio estático y deformación unitaria.

Fuente: elaboración propia.

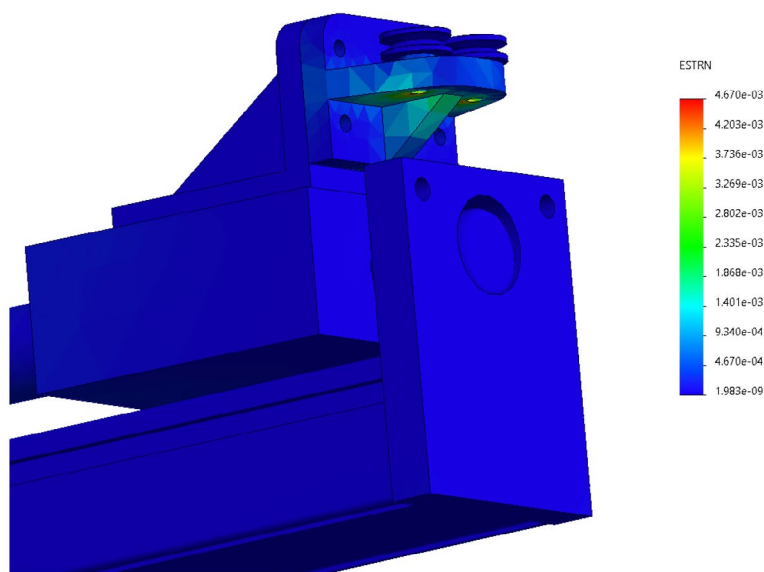
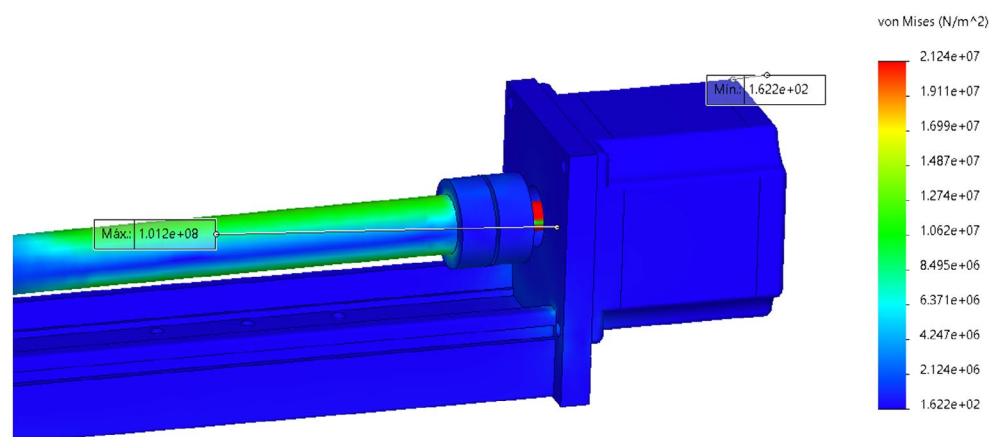



FIGURA 8.

 Estudio estático:
tensión nodal.

 Fuente:
elaboración propia.


Conclusiones

El diseño de la máquina de ensayos biaxiales exhibido en este artículo ofrece una opción accesible y eficiente para la caracterización de tejidos biológicos, ya que optimiza costos de fabricación, utiliza componentes asequibles de amplia disponibilidad y permite realizar pruebas con precisión y replicabilidad. Además, los resultados de la simulación estática indican que, a lo largo de su operación bajo condiciones de carga, no se observan zonas críticas de falla en la estructura. El esfuerzo máximo registrado en el estudio estático de la máquina se encuentra dentro de los límites aceptables, por lo que se garantiza el correcto funcionamiento del dispositivo sin comprometer su integridad estructural.

Referencias

- [1] D. Laurence, C. Ross, S. Jett, C. Johns, A. Echols, R. Baumwart, R. Towner, J. Liao, P. Bajona, Y. Wu y C.H. Lee, "An investigation of regional variations in the biaxial mechanical properties and stress relaxation behaviors of porcine atrioventricular heart valve leaflets", *Journal of Biomechanics*, vol. 83, pp. 16-27, 2019, doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.11.015
- [2] J. S. Welsh y D. F. Adams, "An experimental investigation of the biaxial strength of IM6/3501-6 carbon/epoxy cross-ply laminates using cruciform specimens", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, núm. 6, pp. 829-839, 2002. doi: 10.1016/S1359-835X(01)00142-7
- [3] M. Cervera y E. Blanco, *Resistencia de materiales*. España: CIMNE, 2015.
- [4] M. Jiang, R. L. Sridhar, A. B. Robbins, A. D. Freed y M. R. Moreno, "A versatile biaxial testing platform for soft tissues", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 114, art. 104144, 2021, doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.104144
- [5] A. Corti, T. Shameen, S. Sharma, A. De Paolis, y L. Cardoso, "Biaxial testing system for characterization of mechanical and rupture properties of small samples", *HardwareX*, vol. 12, art. e00333, 2022, doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00333
- [6] CellScale Biomaterials Testing, "BioTester – Biaxial Test Machine. Fully equipped and optimized for biomaterials". Cellscale.com. <https://www.cellscale.com/products-cellscale%20biomaterials-testing/biotester/>
- [7] SolidWorks Corporation, "La solución CAD 3D para el diseño y desarrollo de productos". Solidworks.com <https://www.solidworks.com/es>
- [8] S. Iza, "Interpolación". RPubS.com. <https://rpubs.com/stanisla053/1060172>



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

¿Quieres publicar en esta revista?

¿Dudas o sugerencias? Escríbenos a:

 perspectivasci@uaq.mx

.....
REVISTA INCLUIDA EN:
.....



VISITA NUESTRO



Escucha de la voz de
los autores, entrevistas
y comentarios
relacionados a sus
artículos.

Disponible en:

MÁS REVISTAS UAQ EN:



revistas.uaq.mx



ingenieria.uaq.mx

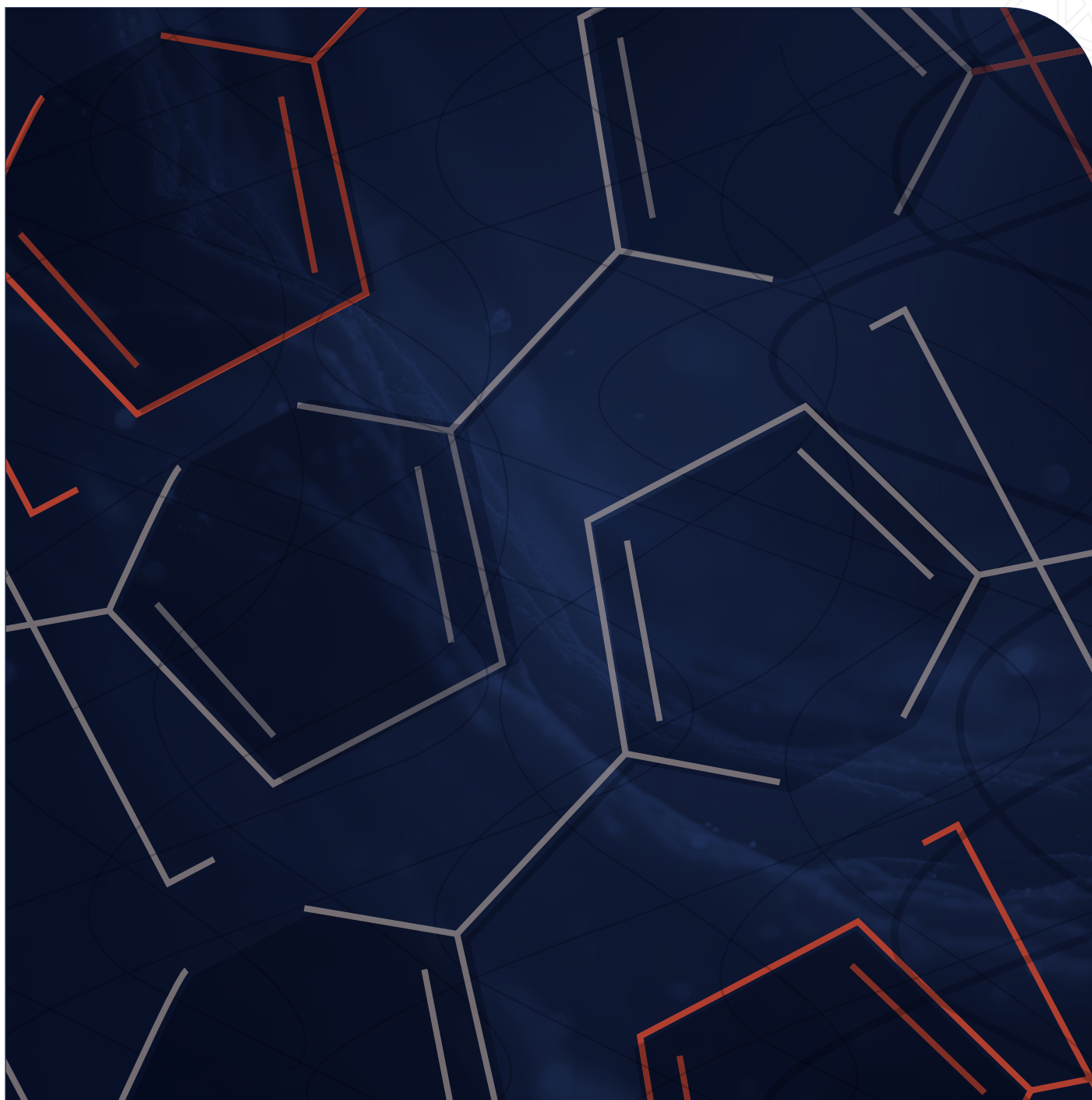
EDICIÓN CUIDADA, DISEÑADA
Y MAQUETADA POR

 **DESPACHO DE
PUBLICACIONES**

Visítanos y conoce
las publicaciones que la
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO
tiene para ti:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO