VITAScientiis



VOLUMEN 1. NÚMERO 1. 2026

VITAScientiis

Facultad de Biociencias y Salud Pública

REVISTA DE LA FACULTAD DE BIOCIENCIAS Y SALUD PÚBLICA

UNIVERSIDAD ESPECIALIZADA DE LAS AMÉRICAS

VOLUMEN 1. NÚMERO 1. 2026

ISSN 2617-1554

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD ESPECIALIZADA DE LAS AMÉRICAS

DRA. NICOLASA TERREROS
RECTORA

DRA. DORIS HERNÁNDEZ
VICERRECTORA ACADÉMICA

DR. JAMES BERNARD
SECRETARIO GENERAL

MGTRA. LURYS MARTINEZ
DECANA DE LA FACULTAD DE BIOCIENCIAS Y SALUD PÚBLICA

CUERPO EDITORIAL

DIRECTOR

Dr. Jay Molino - Universidad Especialidad de las Américas.

DISEÑO GRÁFICO Y MAQUETACIÓN

Mgtr. Yisella Arrocha y Mgtr. Jhoan de León

COORDINADORES

Dra. Biseth Arauz, Facultad de Biociencias y Salud Pública

Mgtr. Paul Peterson, Facultad de Biociencias y Salud Pública.

COMITÉ CIENTÍFICO

Dr. Diego Reginensi - FacuFacultad de Biociencias y Salud Pública

Dr. Edwin Ariel Segura, Universidad Especialidad de las Américas.

Dr. Maira Díaz, Universidad Especialidad de las Américas.

Dra. Yuliana Christopher, Universidad Especialidad de las Américas.

Dr. Raúl Saucedo, Universidad Especialidad de las Américas.

Dr. Pedro Dal Lago, Universidad Federal de Ciencias de la Salud de Porto Alegre (UFCSPA), Brasil.

Dra. Anayansi Valderrama, Instituto Conmemorativo Gorgas de Estudios de la Salud (ICGES), Panamá

Dr. Rolando Serra Toledo, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Cuba.

Mgtr. Ana García, Universidad Especialidad de las Américas.

Mgtr. Daniel Sánchez, Facultad de Biociencias y Salud Pública.

Licda. Lucía Castillo, Facultad de Biociencias y Salud Pública.

VITA SCIENTiiS FBSP

Vita Scientiis FBSP es una publicación de carácter científico de la Facultad de Biociencias y Salud Pública de la Universidad Especialidad de las Américas (UDELAS) de Panamá. La revista Vita Scientiis FBSP es una publicación de periodicidad anual, asociados con los temas:

Biotecnología de Alimentos

Ciencias de la Actividad Física y el Deporte.

Educación para la Salud

Ingeniería Biomédica

Salud Ambiental

Salud Publica

Salud Alimentaria

Seguridad Y Salud Ocupacional

Vectores Biológicos

Vita Scientiis FBSP es una revista científica de acceso abierto cuyos artículos son sometidos a un riguroso proceso de arbitraje académico. Los trabajos publicados se seleccionan a partir de tesis recomendadas por tutores y jueces evaluadores, y son revisados por especialistas de reconocida trayectoria y prestigio. Orientada principalmente a estudiantes, la revista tiene como misión difundir contribuciones originales e inéditas en las áreas señaladas, en las siguientes modalidades editoriales: artículos científicos, comunicaciones cortas, artículos de revisión e informes técnicos. Asimismo, bajo invitación expresa del Cuerpo Editorial, se aceptan cartas al editor.

VITAScientiis

ISSN 2617-1554

CONTENIDO

Neritza Machado, Bernardino Almanza
Prevalencia de Precariedad Laboral y su Relación con el Estrés Térmico en Trabajadoras de Fondas en el Corregimiento de Cristóbal, Panamá, 2023. 9

Arleni Hernández, Griselda González
Evaluación del Impacto de una Capacitación Educativa sobre la Ingesta de Agua en Estudiantes de Sexto Grado de la Escuela Estado de Qatar, Panamá. 19

Liseth Barrios, Francisco Corella
Evaluación del Crecimiento y Producción del Frijol Kiura (Phaseolus vulgaris L.) Bajo Diferentes Condiciones de Sombra en Panamá Oeste. 33

Yaneth Castillo, Griselda González
Conocimientos y Prácticas sobre el Cáncer de Mama en Mujeres de 40 a 56 Años en Panamá: Un Estudio Descriptivo en la Asociación Nacional Contra el Cáncer (ANCEC). 47

Gustavo De La Rivera, Gabriel Valderrama
Un golpe que traspasa barreras científicas. Análisis mecánico extremo del impacto en One Punch Man. 56

Andrés Manuel Ayala Pinzón, Carol Patricia Mendoza Smith
Estudio estructural del comportamiento de la katana de Tanjiro: Fuerza, fragilidad y funcionalidad. 70

Ameth González, Camila Hernández
Análisis biomecánico del fémur y la tibia humana bajo condiciones de carga progresiva inspiradas en las aperturas de las Ocho Puertas de Rock Lee. 80

Daysi Bermúdez, Obed Aparicio, Valentina Garza
Análisis de Viabilidad de Materiales para las Placas Compactadoras de WALL-E Mediante Simulación Estructural. 98

Ericka León
Evaluación biomecánica y termomecánica de la armadura exoesquelética de Batman en Batman v Superman: Dawn of Justice bajo impactos extremos y flujo térmico dirigido. 113

Rosa Hurtado, Rafael Silva Espinoza
Análisis mecánico del escudo del Capitán América mediante modelización de materiales compuestos y teoría de placas. 127

Instrucciones técnicas para los autores 147

Carta al editor

MSc. Lurys Ivette Martínez Marín

Decana, Facultad de Biociencias y Salud Pública
Universidad Especializada de las Américas (UDELAS)

Es un honor presentar este nuevo número de Vita Scientiis, una edición que reafirma el compromiso de nuestra Facultad con la investigación científica, la formación crítica y la aplicación rigurosa del conocimiento. Los trabajos aquí reunidos reflejan el esfuerzo de estudiantes, docentes e investigadores por abordar problemas contemporáneos desde perspectivas técnicas, creativas y socialmente pertinentes.

Esta edición reúne contribuciones que dialogan con áreas diversas de la salud, las biociencias, la tecnología, la seguridad y la cultura científica. En algunos casos, los artículos parten de contextos no convencionales, pero los examinan mediante herramientas reales de análisis, modelado, simulación y razonamiento científico. Esta aproximación demuestra que la ciencia no se limita a repetir modelos establecidos, sino que también permite cuestionarlos, adaptarlos y utilizarlos con criterio para comprender fenómenos complejos.

Para nuestra Facultad, publicar estos trabajos constituye una forma de fortalecer la investigación formativa, visibilizar el talento académico y promover una cultura universitaria basada en la curiosidad, el método y la responsabilidad intelectual. Cada artículo representa una contribución valiosa al desarrollo de competencias profesionales y al compromiso de UDELAS con una educación abierta, crítica y vinculada a las necesidades del país.

Invito a la comunidad académica, nacional e internacional, a recibir este volumen como un espacio de encuentro, reflexión y construcción colectiva. Que esta edición de Vita Scientiis continúe consolidándose como una plataforma para compartir conocimiento útil, estimular nuevas preguntas y fortalecer la labor científica universitaria.

Con respeto y entusiasmo,

MSc. Lurys Ivette Martínez Marín

VITAScientiis

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

Prevalencia de Precariedad Laboral y su Relación con el Estrés Térmico en Trabajadoras de Fondas en el Corregimiento de Cristóbal, Panamá, 2023

Neritza Machado, Bernardino Almanza
[1]Licenciatura en Seguridad y Salud Ocupacional, Universidad Especializada de las Américas, Facultad de Biociencias y Salud Pública, Paseo Andrews, Panamá, Panamá
[2]Universidad Especializada de las Américas, Facultad de Biociencias y Salud Pública, Paseo Andrews, Panamá, Panamá

Correspondencia: bernardino.almanza.2@udelas.ac.pa

Resumen

Este estudio analiza la relación entre la precariedad laboral y el estrés térmico en trabajadoras de establecimientos de comida popular, conocidas como fondas, en el corregimiento de Cristóbal, Panamá. La investigación tiene un enfoque cuantitativo y descriptivo, utilizando un diseño transaccional. Se encuestaron a 40 trabajadoras, y se realizó un monitoreo ambiental en los establecimientos para medir los niveles de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

Los resultados indican que la mayoría de las trabajadoras experimenta condiciones laborales precarias, con ingresos insuficientes para cubrir sus necesidades básicas, y una falta de seguridad laboral a largo plazo. El monitoreo ambiental reveló que las condiciones de calor en los lugares de trabajo superan los límites recomendados, contribuyendo a un alto nivel de estrés térmico.

Se observó una correlación directa entre la precariedad laboral y el estrés térmico, lo que afecta negativamente la salud física y mental de las trabajadoras. Las conclusiones sugieren la necesidad urgente de implementar políticas laborales y de salud para proteger a esta población vulnerable, mejorando las condiciones de trabajo y mitigando los riesgos asociados al calor.

Palabras clave: Precariedad laboral, estrés térmico, trabajo informal, trabajadoras de fondas, riesgos laborales

Abstract

This study examines the relationship between job insecurity and thermal stress in workers of popular food establishments, known as fondas, in Cristóbal district, Panama. The research follows a quantitative

https://doi.org/10.57819/ptnf-yg97

and descriptive approach, using a cross-sectional design. A total of 40 female workers were surveyed, and environmental monitoring was conducted in the establishments to measure temperature, relative humidity, and air velocity. The results indicate that most workers experience precarious working conditions, with insufficient income to cover basic needs and a lack of long-term job security. Environmental monitoring showed that heat conditions in the workplaces exceed recommended limits, contributing to high levels of thermal stress. A direct correlation was observed between job insecurity and thermal stress, negatively impacting the physical and mental health of the workers. The findings highlight the urgent need to implement labor and health policies to protect this vulnerable population by improving working conditions and mitigating heat-related risks.

Keywords: Job insecurity, thermal stress, informal work, food establishment workers, occupational risks.

Introducción

El empleo en los sectores informales, como las fondas, es una fuente clave de trabajo en economías emergentes, especialmente en América Latina. Sin embargo, estos empleos están marcados por condiciones de precariedad laboral, que incluyen inseguridad en el trabajo, ingresos bajos y falta de acceso a beneficios sociales y protección adecuada en el lugar de trabajo (Lewchuk et al., 2003).

La precariedad laboral es un fenómeno que afecta directamente la salud física y mental de los trabajadores, con estudios que han demostrado una correlación clara entre empleos inestables y un aumento en los niveles de estrés y problemas de salud mental (Moscone et al., 2016). Este contexto es particularmente relevante en Panamá, donde una gran proporción de las trabajadoras en fondas son mujeres que enfrentan estas condiciones adversas.

En el caso específico de las fondas, además de la precariedad laboral, las trabajadoras están expuestas a altos niveles de estrés térmico. El estrés térmico ocurre cuando la carga de calor excede la capacidad del cuerpo para disiparlo, lo que puede provocar agotamiento por calor y otras afecciones graves (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021).

En regiones cálidas como Panamá, donde las temperaturas externas son elevadas y las cocinas de estos establecimientos suelen carecer de

ventilación adecuada, las trabajadoras enfrentan un riesgo significativo de desarrollar problemas de salud relacionados con el calor (Lewchuk et al., 2003).

Además, el trabajo prolongado en estas condiciones aumenta el riesgo de enfermedades ocupacionales, un problema que ha sido subestimado en estudios previos sobre empleo informal (Kreshpaj et al., 2020).

El estrés térmico y la precariedad laboral son dos fenómenos interrelacionados que exacerban las dificultades que enfrentan las trabajadoras de fondas. El trabajo en condiciones de inseguridad económica, sin acceso a beneficios como atención médica o licencias por enfermedad, deja a estas trabajadoras en una situación vulnerable. Según un análisis reciente de precariedad laboral en Europa y América Latina, las trabajadoras en empleos informales tienen menos probabilidades de recibir apoyo en casos de enfermedades relacionadas con el trabajo, lo que aumenta su exposición a riesgos laborales (Kreshpaj et al., 2020). Esta vulnerabilidad es aún mayor cuando se combina con el estrés térmico, un factor físico que afecta tanto el rendimiento laboral como la salud a largo plazo.

En Panamá, la informalidad en el empleo sigue siendo un problema importante, con aproximadamente el 45% de la población laboral en esta situación (Instituto Nacional de Estadística y Censo [INEC], 2021). Las trabajadoras de fondas representan un grupo particularmente afectado por estas condiciones.

Además, el cambio climático y el aumento de las temperaturas globales intensifican el estrés térmico en los lugares de trabajo, lo que ha llevado a organismos internacionales a destacar la necesidad de mejorar las condiciones laborales en sectores informales como el de las fondas (Palma-Vasquez et al., 2022).

Este estudio tiene como objetivo analizar la relación entre la precariedad laboral y el estrés térmico en trabajadoras de fondas en el corregimiento de Cristóbal, Panamá. A través de un enfoque cuantitativo y descriptivo, se busca identificar los principales problemas que enfrentan estas trabajadoras y ofrecer recomendaciones para el desarrollo de políticas de protección laboral y salud pública.

La creciente preocupación por los efectos del cambio climático y las condiciones laborales precarias hace necesario investigar estas

interrelaciones y proponer soluciones que mejoren la seguridad y el bienestar de las trabajadoras en sectores vulnerables.

Metodología

Este estudio es de tipo transaccional descriptivo, con un enfoque cuantitativo, cuyo objetivo fue determinar la relación entre la precariedad laboral y el estrés térmico en trabajadoras de fondas ubicadas en el corregimiento de Cristóbal, Panamá, durante el año 2023. El diseño transaccional descriptivo permitió realizar un análisis en un momento específico, describiendo las condiciones laborales de las trabajadoras y evaluando su exposición al estrés térmico.

La población objeto de estudio estuvo compuesta por 40 trabajadoras de 10 establecimientos de comida popular, conocidos como fondas, en la zona de los 4 Altos, corregimiento de Cristóbal. Se utilizó un muestreo por conveniencia, debido a la facilidad de acceso a esta población, caracterizada como un grupo cautivo en su lugar de trabajo.

Las participantes debían cumplir con ciertos criterios de inclusión, como su consentimiento informado para participar en el estudio, garantizando la voluntariedad y la comprensión de los objetivos.

La recolección de datos se llevó a cabo mediante dos instrumentos principales. En primer lugar, se utilizó la Escala de Precariedad Laboral, la cual mide seis dimensiones clave: temporalidad del empleo, desempoderamiento, vulnerabilidad, deprivación económica, ejercicio de derechos laborales y sociales.

Esta escala permitió obtener información sobre las condiciones laborales de las trabajadoras. En segundo lugar, se realizaron mediciones ambientales para evaluar el estrés térmico. Para ello, se empleó un termoanemómetro TSI modelo 9565-P, que registró parámetros ambientales como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento en los establecimientos.

El procedimiento incluyó tres etapas principales. La primera consistió en la adaptación de los instrumentos de recolección de datos y la validación del cuestionario para diagnosticar la precariedad laboral.

En la segunda etapa, se aplicaron las encuestas de manera presencial en los establecimientos y se realizaron las mediciones ambientales en distintos momentos del día para captar las variaciones térmicas.

Finalmente, se procesaron los datos obtenidos y se realizaron análisis descriptivos y correlacionales para identificar posibles relaciones entre la precariedad laboral y el estrés térmico.

El análisis estadístico de los datos fue realizado con el apoyo de un equipo de investigación experto, quienes emplearon un software estadístico (aunque no se menciona cuál en la tesis) para analizar los resultados del cuestionario y del monitoreo ambiental. Los datos fueron codificados y presentados en forma de gráficos y tablas para visualizar los niveles de precariedad laboral y las condiciones ambientales de los establecimientos.

Resultados

El análisis de los datos obtenidos de las encuestas a las trabajadoras de fondas en el corregimiento de Cristóbal revela hallazgos importantes sobre la precariedad laboral y el estrés térmico. La población encuestada estaba compuesta mayoritariamente por mujeres (94%), con una mínima participación masculina (6%). La mayoría de las trabajadoras tenía 50 años o más (34%), seguida de los rangos de edad de 40-49 años (24%) y 30-39 años (24%).

En términos de precariedad laboral, los resultados indican que el 62% de las trabajadoras no contaba con un contrato formal, lo que evidencia la alta informalidad en este sector.

Además, el 41% manifestó una gran preocupación por la falta de seguridad en su empleo a largo plazo. El nivel educativo también influyó en las condiciones laborales: un 68% de las trabajadoras había completado la educación media, aunque el 41% no logró finalizar sus estudios formales.

El estrés térmico, el factor central de este estudio, afecta significativamente la salud de las trabajadoras. Las mediciones ambientales en los lugares de trabajo mostraron que las temperaturas oscilaban entre 20.9°C y 28.3°C, con una humedad relativa de entre 50.2% y 87.3%, valores que superan los límites recomendados por organismos internacionales, que sugieren no sobrepasar los 24°C en ambientes laborales exigentes.

Además, la falta de ventilación, con velocidades de viento entre 0.01 m/s y 0.09 m/s, agravó estas condiciones, exponiendo a las trabajadoras a altos niveles de disconfort térmico.

El impacto de estas condiciones no solo es físico, sino que también influye en la percepción de las trabajadoras. Un 88% de ellas indicó que las condiciones térmicas variaban constantemente, y un 60% reportó una sobrecarga física debido a la exposición continua al calor.

Esta sobrecarga está directamente relacionada con la dificultad del cuerpo para regular su temperatura en ambientes donde las condiciones no son controladas. Además, un alto porcentaje señaló que estos factores afectaban su productividad y bienestar general.

El análisis sugiere que el estrés térmico se ve agravado por las largas jornadas laborales en espacios cerrados y mal ventilados, lo que repercute tanto en la salud física como en el bienestar emocional de las trabajadoras.

La edad también juega un papel importante en la vulnerabilidad ante el estrés térmico: el 34% de las trabajadoras tiene 50 años o más, un grupo que generalmente tiene mayor dificultad para adaptarse a condiciones extremas de calor, lo que aumenta el riesgo de agotamiento, calambres e incluso deshidratación severa.

Por último, la combinación de estrés térmico y precariedad laboral genera un escenario de doble afectación para las trabajadoras. Aquellas con contratos informales o inseguridad laboral reportaron mayores niveles de disconfort térmico, lo que sugiere que, además del impacto físico del calor, la incertidumbre laboral contribuye a aumentar el nivel de estrés percibido.

Discusión

Los hallazgos de este estudio confirman una asociación clara entre la precariedad laboral y la exposición a estrés térmico en trabajadoras de fondas del corregimiento de Cristóbal. Estos resultados son coherentes con investigaciones previas que vinculan el empleo informal con un mayor riesgo de deterioro en la salud física y mental (Lewchuk et al., 2003; Moscone et al., 2016).

La falta de contratos formales y la inestabilidad económica no solo limitan el acceso a derechos laborales, sino que también agravan la

percepción de inseguridad y vulnerabilidad ante condiciones adversas como el calor extremo.

En cuanto a los factores ambientales, las mediciones realizadas mostraron temperaturas y niveles de humedad superiores a los límites recomendados por organismos internacionales como la OMS (2021), lo que representa un riesgo significativo para la salud ocupacional.

Estas condiciones, sumadas a una ventilación deficiente, configuran un entorno de trabajo altamente desfavorable, especialmente para las trabajadoras mayores de 50 años, quienes presentan una menor capacidad fisiológica para enfrentar el calor. Este hallazgo coincide con estudios que advierten sobre la vulnerabilidad de poblaciones adultas en ambientes laborales no adaptados (Palma-Vasquez et al., 2022).

Además, el análisis mostró que las trabajadoras con mayores niveles de precariedad laboral también reportaron un mayor disconfort térmico. Esta relación sugiere una interacción entre factores físicos y psicosociales, en la que la incertidumbre económica intensifica el impacto del estrés térmico sobre el bienestar general.

Desde una perspectiva biopsicosocial, esta interacción refuerza la necesidad de abordar los riesgos laborales no solo desde el entorno físico, sino también desde las condiciones contractuales y de protección social.

La combinación de estrés térmico y precariedad laboral, especialmente en un contexto de cambio climático y ausencia de regulaciones específicas para el sector informal, plantea retos urgentes para la salud pública y la política laboral.

Es fundamental considerar intervenciones integrales que incluyan mejoras en infraestructura (como sistemas de ventilación adecuados), regulación del tiempo de exposición al calor, y formalización progresiva del empleo.

Asimismo, la implementación de campañas de sensibilización y formación en salud ocupacional puede contribuir a reducir la carga de enfermedad asociada a estas condiciones.

https://doi.org/10.57819/ptnf-yg97

Conclusiones

Los resultados de este estudio confirman una relación significativa entre la precariedad laboral y el estrés térmico en las trabajadoras de fondas en Cristóbal, Panamá.

La falta de contratos formales y la inseguridad económica, combinados con ambientes de trabajo con temperaturas y humedad elevadas, afectan gravemente la salud de las trabajadoras, especialmente las mayores de 50 años, que son más vulnerables al calor.

Además, la percepción de inseguridad laboral intensifica el estrés general, lo que impacta negativamente en su desempeño y bienestar.

El estudio destaca la necesidad urgente de mejorar las condiciones laborales y ambientales en estos lugares, sugiriendo medidas como mejorar la ventilación, establecer límites térmicos adecuados y formalizar el empleo para proteger la salud y el bienestar de las trabajadoras.

https://doi.org/10.57819/ptnf-yg97

Referencias

Arosemena, J. (2024). El lado invisible de la economía panameña: Impacto de la informalidad en la calidad de vida de los trabajadores. Semilla Científica, 6(Noviembre 2024–Abril 2025), 599–612.

Benach, J., Muntaner, C., & Solar, O. (2013). La precariedad laboral: entender una realidad compleja. Informe SESPAS 2014 – Gaceta Sanitaria, 28(Supl 1), 8–14.

Glaser, J., Lemery, J., Rajagopalan, B., Diaz, H. F., García-Trabanino, R., & Taduri, G. (2016). Climate change and the emerging epidemic of Chronic Kidney Disease from heat stress in rural communities: a case for heat-stress mitigation efforts. Environmental Research, 151, 262–265.

Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2021). Encuesta de Mercado Laboral – Comentarios, Octubre 2021. Panamá: Contraloría General de la República.

Kreshpaj, B., Orellana, C., Burström, B., Davis, L., Hemmingsson, T., Johansson, G., ... Bodin, T. (2020). What is precarious employment? A systematic review of definitions and operationalizations from quantitative and qualitative studies. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 46(3), 235–247.

Kreshpaj, B., Julià, M., Jódar, P., & Muntaner, C. (2020). Precarious employment and health-related outcomes in the European Union: a cross-national study. International Journal of Health Services, 50(3), 330–341.

Lewchuk, W., de Wolff, A., King, A., & Polanyi, M. (2003). From Job Strain to Employment Strain: Health Effects of Precarious Employment. Just Labour, 3, 23–35.

Melaku, C., Abere, G., Zele, Y. T., Mamaye, Y., Mekonen, T. A., Bezie, A. E., ... Worede, E. A. (2024). The Occupational Heat Exposure-related Symptoms Prevalence and Associated Factors Among Hospitality Industry Kitchen Workers in Ethiopia: Wet Bulb Globe Temperature. Safety and Health at Work.

Moscone, F., Tosetti, E., & Vittadini, G. (2016). The impact of precarious employment on mental health: The case of Italy. Social Science & Medicine, 158, 86–95.

Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2018). Mujeres y hombres en la economía informal: una imagen estadística (3ª ed.). Ginebra: OIT.

Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2019). Trabajar en un planeta más caliente: el impacto del estrés térmico en la productividad laboral y el trabajo decente. Ginebra: OIT.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). Cambio climático y salud (Nota descriptiva, 30 de octubre de 2021). Ginebra: OMS.

Palma-Vásquez, C., Vives, A., Gimeno Ruiz de Porras, D., Rojas-Garbanzo, M., & Benavides, F. G. (2022). Medida de la precariedad laboral en Centroamérica: propiedades psicométricas en base a la II Encuesta Centroamericana de Condiciones de Trabajo y Salud. Archivos de Prevención de Riesgos Laborales, 25(3), 310–328.

Singh, A., Kamal, R., Mudiam, M. K. R., Gupta, M. K., Satyanarayana, G. N. V., Bihari, V., Pandey, A. (2016). Heat and PAHs emissions in indoor kitchen air and its impact on kidney dysfunctions among kitchen workers in Lucknow, North India. PLOS ONE, 11(2), e0148641.

Utzet, M., Botías, F., Silva-Peñaherrera, M., Tobías, A., & Benavides, F. G. (2021). Informal employment and poor self-perceived health in Latin America and the Caribbean: a gender-based comparison between countries and welfare states. Globalization and Health, 17(140), 1–11.

VITAScientiis

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

Evaluación del Impacto de una Capacitación Educativa sobre la Ingesta de Agua en Estudiantes de Sexto Grado de la Escuela Estado de Qatar, Panamá

Arleni Hernández, Griselda González.
[1]**Licenciatura en Seguridad y Salud Ocupacional, Universidad Especializada de las Américas, Facultad de Biociencias y Salud Pública, Paseo Andrews, Panamá, Panamá**
[2]**Universidad Especializada de las Américas, Facultad de Biociencias y Salud Pública, Paseo Andrews, Panamá, Panamá**

Resumen

Este estudio evaluó el nivel de conocimiento sobre la ingesta de agua en estudiantes de sexto grado antes y después de recibir una capacitación educativa en la escuela Estado de Qatar, Panamá. Se realizó una investigación cuasi-experimental con un diseño transversal, utilizando un cuestionario pre-test y post-test. La muestra consistió en 51 estudiantes, a quienes se les evaluó en aspectos relacionados con la hidratación, el número de vasos de agua recomendados y las consecuencias de no hidratarse adecuadamente. Los resultados mostraron que, en el pre-test, el 80% de los estudiantes presentaban un conocimiento bajo sobre el agua y sus beneficios, mientras que, tras la intervención educativa, el 90% alcanzó un nivel de conocimiento alto. Estos resultados sugieren que la capacitación mejoró significativamente el entendimiento de los estudiantes sobre la importancia de la ingesta adecuada de agua para su salud.

Palabras clave: ingesta de agua, estudiantes, educación en salud, hidratación, conocimientos.

Abstract

Breast cancer is one of the leading causes of mortality in women worldwide. This descriptive study aims to evaluate the level of knowledge and practices regarding breast cancer in a group of women aged 40 to 56 years who attend the National Association Against Cancer (ANCEC) in Panama. Surveys were conducted with 53 women, including questions on sociodemographic factors, breast cancer knowledge, and preventive practices such as self-examination and mammography. The results showed that 63% of the respondents have a high level of knowledge about breast cancer, but there is confusion about the appropriate age for mammography. Additionally, 81% of

https://doi.org/10.57819/mek9-3e77

the participants consider breast self-examination easy to perform, but only 52% include axillary and nipple examination, indicating a need for more education in this area. An educational program is proposed to improve preventive practices and reduce the impact of breast cancer in this population.

Keywords: breast cancer, knowledge, preventive practices, self-examination, mammography, ANCEC, Panama.

Introducción

La ingesta de agua es fundamental para el mantenimiento de la salud humana y el desarrollo óptimo de las funciones fisiológicas, especialmente en niños y adolescentes, quienes se encuentran en una etapa de crecimiento y desarrollo acelerado (Masento et al., 2014; Tung et al., 2020). El agua es el componente más abundante del cuerpo humano y desempeña un papel crucial en casi todos los procesos biológicos, incluyendo la regulación de la temperatura corporal, el transporte de nutrientes y la eliminación de toxinas (D'Anci et al., 2006). Sin embargo, la adecuada hidratación no siempre es una prioridad en las estrategias de promoción de la salud dentro de los centros educativos, lo cual puede tener un impacto negativo tanto en la salud física como en el rendimiento cognitivo de los estudiantes (Drozdowska et al., 2020; Trinies et al., 2016).

La Organización Mundial de la Salud ha destacado que la prevalencia de sobrepeso y obesidad infantil ha aumentado considerablemente en las últimas décadas, señalando que el consumo inadecuado de agua y el reemplazo de esta por bebidas azucaradas son factores que contribuyen a este problema (World Health Organization [WHO], 2014). En este sentido, la falta de acceso a agua potable y la falta de educación sobre la importancia de la hidratación son problemáticas comunes en muchos centros educativos, que resultan en una disminución del consumo de agua y un aumento en el consumo de bebidas menos saludables (UNICEF & WHO, 2018).

La hidratación adecuada es un componente clave para el desarrollo cognitivo y el bienestar psicológico de los estudiantes. Estudios previos han demostrado que los estudiantes que se hidratan correctamente durante sus actividades académicas presentan un mejor rendimiento cognitivo y mayores niveles de concentración y memoria (Khan et al.,

https://doi.org/10.57819/mek9-3e77

2019; Masento et al., 2014). La investigación realizada por Drozdowska et al. (2020) evidencia que los hábitos de hidratación inadecuados están correlacionados con estilos de vida menos saludables y problemas como el estreñimiento, la insuficiencia renal y una disminución en la capacidad cognitiva. Estos problemas pueden ser prevenidos mediante una adecuada ingesta de agua, la cual debería ser fomentada desde una edad temprana, especialmente en el entorno escolar (Kavouras, 2012; Arinda et al., 2020).

En Panamá, la problemática del consumo insuficiente de agua se hace evidente en varios centros educativos, donde la disponibilidad de bebederos de agua potable es limitada, y muchos estudiantes tienden a sustituir el agua por bebidas azucaradas debido a la falta de acceso y de educación adecuada sobre la importancia de la hidratación (Moreno et al., 2021). Según datos internacionales recientes, un alto porcentaje de niños y adolescentes optan por bebidas azucaradas, lo cual no solo afecta su salud física, sino que también incrementa su riesgo de desarrollar enfermedades crónicas como la diabetes y la hipertensión (UNICEF & WHO, 2022).

La importancia de la hidratación en el ámbito escolar va más allá de la simple prevención de enfermedades. Mantenerse adecuadamente hidratado se ha relacionado con una mejor capacidad de atención, una mayor habilidad para resolver problemas y un mejor rendimiento académico en general (Khan et al., 2019; Papaoikonomou et al., 2025). En un estudio realizado en un contexto escolar, se demostró que los estudiantes que llevaron agua a actividades evaluadas obtuvieron mejores resultados en promedio que aquellos que no lo hicieron (Drozdowska et al., 2020). Esto evidencia que la ingesta de agua no solo es vital para la salud física, sino que también tiene un impacto directo en el desempeño académico y el bienestar psicológico de los estudiantes.

La escuela Estado de Qatar, ubicada en Tanara de Chepo, Panamá, presenta las mismas carencias mencionadas anteriormente, con un acceso limitado a agua potable y una falta de conocimiento general sobre la importancia de la ingesta de agua entre sus estudiantes. Esto motivó la realización del presente estudio, cuyo objetivo fue evaluar el nivel de conocimiento sobre la ingesta de agua de los estudiantes de sexto grado antes y después de recibir una capacitación específica sobre el tema. La investigación se enfocó en identificar si la intervención educativa, consistente en una serie de sesiones de capacitación, tenía un impacto significativo en el conocimiento de los estudiantes sobre

la importancia del agua para la salud, la cantidad adecuada que se debe consumir, y las consecuencias de la deshidratación.

El diseño de esta investigación fue cuasi-experimental, con una muestra de 51 estudiantes de 6°A y 6°B, quienes participaron en un pre-test y un post-test para medir el nivel de conocimiento sobre la ingesta de agua (Trinies et al., 2016). El estudio fue desarrollado en dos fases principales: primero se evaluó el conocimiento base de los estudiantes, y luego se aplicó una intervención educativa que incluyó la explicación de los beneficios de una correcta hidratación, la cantidad de agua que se debe ingerir diariamente y las consecuencias de no hacerlo. Posteriormente, se aplicó un post-test para evaluar los cambios en el nivel de conocimiento. La intervención se llevó a cabo en tres semanas, utilizando métodos educativos visuales como mamparas y trípticos para reforzar los conceptos impartidos (Arinda et al., 2020).

En la fase pre-test, los resultados mostraron que el 80% de los estudiantes tenía un conocimiento bajo sobre la ingesta de agua, y solo un pequeño porcentaje podía identificar correctamente la cantidad de agua que se debe consumir diariamente o las bebidas que mejor contribuyen a la hidratación (Kavouras, 2012). Por otro lado, en la fase post-test, el nivel de conocimiento aumentó significativamente, con el 98% de los estudiantes demostrando un alto nivel de conocimiento sobre la hidratación adecuada. Esto sugiere que la intervención educativa fue efectiva para mejorar el entendimiento de los estudiantes sobre la importancia de la ingesta de agua, así como para fomentar hábitos de consumo más saludables (Altman et al., 2020).

Estudios como el de Khan et al. (2019) han resaltado la necesidad de fomentar el consumo de agua en la población infantil, no solo como una medida preventiva contra enfermedades, sino también como un componente esencial del desarrollo integral. En este contexto, el papel de los educadores en salud resulta fundamental para garantizar que los estudiantes adquieran y mantengan hábitos de hidratación adecuados (UNICEF & WHO, 2024). Los profesionales de la educación en salud deben ser agentes de cambio, capaces de diseñar y aplicar estrategias educativas que no solo informen, sino que también motiven a los estudiantes a adoptar prácticas saludables.

La presente investigación contribuye al campo de la educación para la salud, evidenciando la importancia de las intervenciones educativas en la promoción de hábitos saludables entre los estudiantes. Se espera que los resultados obtenidos puedan servir de base para implementar

programas similares en otras escuelas, con el objetivo de mejorar el conocimiento y las prácticas relacionadas con la ingesta de agua y la hidratación. Además, se recomienda a las autoridades educativas que faciliten el acceso a bebederos de agua potable en los centros escolares y promuevan políticas que reduzcan el consumo de bebidas azucaradas entre los estudiantes (WHO, 2014; UNICEF & WHO, 2018).

Metodología

Diseño de investigación

Este estudio utilizó un diseño cuasi-experimental de tipo cuantitativo y transversal, el cual permitió evaluar el nivel de conocimiento que tenían los estudiantes de sexto grado sobre la ingesta de agua antes y después de recibir una capacitación educativa. Este tipo de diseño es útil para comparar los resultados pre-test y post-test en una misma población sin la necesidad de un grupo control (Hernández, 2023).

Población y muestra

La población objetivo estuvo conformada por los estudiantes de 6°A y 6°B de la Escuela Estado de Qatar, ubicada en Tanara de Chepo, Panamá. La muestra fue de 51 estudiantes de ambos sexos, cuyas edades oscilaban entre 11 y 12 años. Estos estudiantes participaron voluntariamente en la investigación luego de obtenerse el consentimiento informado de sus padres o tutores. El cálculo muestral fue realizado mediante un muestreo aleatorio simple, con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 95%, lo que permitió obtener una muestra representativa (Hernández, 2023).

Instrumento de recolección de datos

El instrumento utilizado para la recolección de datos fue un cuestionario estructurado en dos partes. La primera parte incluyó preguntas sobre las características sociodemográficas de los participantes, como la edad y el sexo. La segunda parte midió el nivel de conocimiento sobre la ingesta de agua, con preguntas relacionadas con conceptos básicos como los beneficios del agua, las consecuencias de la deshidratación y la cantidad de agua recomendada que debe consumirse diariamente. Este cuestionario fue aplicado en dos momentos: antes (pre-test) y después (post-test) de la capacitación educativa (Hernández, 2023). El cuestionario puede ser revisado en la sección de apéndices.

Procedimiento

El estudio se llevó a cabo en tres fases:

1.Pre-test: Se evaluó el conocimiento inicial de los estudiantes mediante la aplicación del cuestionario.

2.Capacitación: Se impartieron tres sesiones educativas, cada una de 40 minutos de duración, enfocadas en la importancia de la hidratación, la cantidad adecuada de agua que se debe consumir y las consecuencias de la deshidratación. Para reforzar el aprendizaje, se utilizaron materiales visuales, como mamparas y trípticos (Hernández, 2023).

3.Post-test: Tras la capacitación, se aplicó nuevamente el cuestionario para medir el cambio en el nivel de conocimiento de los estudiantes.

Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron procesados mediante estadística descriptiva, comparando los resultados del pre-test y post-test. Se utilizaron porcentajes y frecuencias para analizar el nivel de conocimiento antes y después de la intervención educativa, y los resultados se presentaron en tablas y gráficas para una mejor interpretación (Hernández, 2023).

Resultados

El cuestionario aplicado en la fase pre-test mostró que el 78% de los estudiantes tenían un nivel de conocimiento bajo sobre la ingesta adecuada de agua, mientras que solo el 6% de los estudiantes alcanzaron un nivel alto de conocimiento. Posteriormente, tras la intervención educativa, se evidenció un incremento significativo en el nivel de conocimiento, con un 90% de los estudiantes alcanzando un nivel alto en la fase post-test. Estos resultados reflejan una mejora notable en el entendimiento de los estudiantes sobre la importancia de la hidratación y la ingesta de agua adecuada.

Tabla 1: Resultados pre-test y post-test según la escala de calificación.

Escala de calificación	Pre-test (n=51)	Post-test (n=51)
Alto (7-10)	6%	90%
Medio (5-6)	16%	6%
Bajo (0-4)	78%	4%

Fuente: Datos obtenidos de cuestionario aplicado a estudiantes de 6°A y 6°B, Escuela Estado de Qatar, agosto 2023.

Una de las preguntas clave del cuestionario fue: "¿Qué es la hidratación?". En la fase pre-test, el 68% de los estudiantes respondieron incorrectamente afirmando que "la hidratación es cuando sentimos sed", mientras que solo el 18% seleccionó la respuesta correcta: "es ingerir el agua que el cuerpo necesita". Tras la capacitación, se observó una mejora significativa, con el 82% de los estudiantes respondiendo correctamente en la fase post-test.

Tabla 2: Respuestas de los estudiantes a la pregunta "¿Qué es la hidratación?"

Opción de respuesta	Pre-test (n=51)	Post-test (n=51)
Es cuando sentimos sed	68%	10%
Es cuando perdemos líquidos corporales	14%	8%
Es ingerir el agua que el cuerpo necesita	18%	82%

Fuente: Datos obtenidos de cuestionario aplicado a estudiantes de 6°A y 6°B, Escuela Estado de Qatar, agosto 2023.

Otra pregunta importante fue: "¿Cuáles son las consecuencias de no hidratarse?". En la fase pre-test, solo el 29% de los estudiantes identificaron correctamente que la disminución del rendimiento físico e intelectual es una consecuencia de la falta de hidratación, mientras que la mayoría (53%) eligió respuestas incorrectas. En la fase post-test, el 86% de los estudiantes respondieron correctamente, lo que indica una clara mejora en su comprensión.

https://doi.org/10.57819/mek9-3e77

Tabla 3: Respuestas a la pregunta "¿Cuáles son las consecuencias de no hidratarse?"

Opción de respuesta	Pre-test (n=51)	Post-test (n=51)
Gastritis	53%	10%
Disminución del rendimiento físico e intelectual	29%	86%
Cáncer de piel	18%	4%

Discusión

Los resultados muestran que la intervención educativa fue altamente efectiva para mejorar el conocimiento de los estudiantes sobre la ingesta de agua. Antes de la capacitación, la mayoría tenía un conocimiento limitado sobre la cantidad adecuada de agua y sus beneficios. Tras la intervención, el 98% de los estudiantes identificaron correctamente al agua como la bebida más saludable, en comparación con solo el 6% en el pre-test.

Este aumento significativo refleja el impacto positivo de una intervención educativa bien diseñada. Además, los estudiantes también mejoraron su comprensión de las consecuencias de la deshidratación, lo que sugiere que la capacitación no solo influyó en el conocimiento, sino también en la conciencia sobre la importancia de la hidratación. Estos resultados coinciden con estudios previos que destacan la efectividad de la educación en salud en entornos escolares (Ortega, 2019; Salas-Salvadó et al., 2020).

El estudio demuestra que una intervención educativa enfocada y adaptada puede generar cambios significativos en el conocimiento sobre hábitos saludables como la ingesta adecuada de agua, lo que tiene implicaciones positivas para la salud y el rendimiento académico de los estudiantes.

Conclusión

Los resultados de este estudio destacan el impacto positivo que puede tener una intervención educativa en el conocimiento de

https://doi.org/10.57819/mek9-3e77

los estudiantes sobre la ingesta adecuada de agua. Antes de la capacitación, la mayoría de los estudiantes presentaban un nivel bajo de conocimiento sobre los beneficios del agua, las cantidades diarias recomendadas y las consecuencias de no hidratarse. Sin embargo, tras la intervención, se observó un aumento significativo en el nivel de conocimiento, evidenciando la efectividad de este tipo de programas en el ámbito escolar.

Uno de los hallazgos más relevantes es que el 98% de los estudiantes fue capaz de identificar al agua como la bebida más saludable en la fase post-test, en contraste con solo el 6% en el pre-test. Esto sugiere que la intervención educativa no solo aumentó el conocimiento, sino que también promovió la adopción de hábitos más saludables relacionados con la hidratación. Adicionalmente, los estudiantes mostraron una mayor comprensión sobre las consecuencias de la deshidratación, lo que refuerza la importancia de la educación en salud como una herramienta clave para fomentar estilos de vida más sanos desde edades tempranas.

Este estudio demuestra que implementar programas educativos centrados en la salud puede tener un impacto significativo en la vida de los estudiantes, no solo a nivel cognitivo, sino también en la adopción de comportamientos beneficiosos para su bienestar a largo plazo. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para recomendar la replicación de esta intervención en otras instituciones educativas, con el objetivo de mejorar la salud general de los estudiantes y su rendimiento académico a través de una adecuada ingesta de agua.

En conclusión, este estudio reafirma la importancia de la educación para la salud en el entorno escolar y resalta la necesidad de continuar desarrollando programas que promuevan hábitos saludables entre los niños y adolescentes. Se recomienda a las autoridades educativas que consideren la implementación de programas similares en otras escuelas, así como facilitar el acceso a agua potable en los centros escolares.

Referencias

Drozdowska, A., Falkenstein, M., Jendrusch, G., Platen, P., Luecke, T., Kersting, M., & Jansen, K. (2020). Water consumption during a school day and children's short term cognitive performance: The CogniDROP randomized intervention trial. Nutrients, 12(5), 1297. https://doi.org/10.3390/nu12051297 PubMed+2PMC+2MDPI

https://doi.org/10.57819/mek9-3e77

Trinies, V., et al. (2016). Effects of water provision and hydration on cognitive performance in school children in low resource settings. PLoS ONE, 11(4), e0150071. Semantic Scholar

Kavouras, S. A. (2012). Educational intervention on water intake improves hydration status and endurance. Nutrition Reviews, 64(10), 457–462.

Arinda, D. F., Muttaqien Sofro, Z., & Zuhrotun, F. (2020). Effect of education and provision of drinking water on adolescents' drinking consumption and hydration status. Advances in Health Sciences Research, 25. Atlantis Press. ResearchGate

Moreno, G. D., Schmidt, L. A., Ritchie, L. D., McCulloch, C. E., Cabana, M. D., Brindis, C. D., Green, L. W., Altman, E. A., & Patel, A. I. (2021). A cluster randomized controlled trial of an elementary school drinking water access and promotion intervention: Rationale, study design, and protocol. Preventive Medicine Reports.

Khan, N. A., et al. (2019). A four day water intake intervention increases hydration and cognition in school children. The Journal of Nutrition, 149(3), 390–397.

Papaoikonomou, G., et al. (2025). Children, adolescents and urine hydration indices — A review. Children, 12(2), 171.

Altman, E. A., Lee, K. L., Hecht, C. E., Hampton, K. E., Moreno, G., & Patel, A. I. (2020). Drinking water access in California schools: Room for improvement following implementation of school water policies. Preventive Medicine Reports, 19, 101143.

Umunna, I. L., Blacker, L. S., Hecht, C. E., Edwards, M. A., Altman, E. A., & Patel, A. I. (2020). Water safety in California public schools following implementation of school drinking water policies. Preventing Chronic Disease, 17, E165.

Masento, N. A., Golightly, M., Field, D. T., Butler, L. T., & van Reekum, C. M. (2014). Effects of hydration status on cognitive performance and mood. British Journal of Nutrition, 111(10), 1841–1852.

Tung, S. E. H., Hornberger, M., & Kratz, E. (2020). Fluid intake, hydration status and its association with short term memory and concentration in school age children. Nutrition Reviews, 78(Supplement_2), 1–10.

https://doi.org/10.57819/mek9-3e77

D'Anci, K. E., Constant, F., & Rosenberg, I. H. (2006). Hydration and cognitive function in children. Nutrition Reviews, 64(10), 457–462.

UNICEF. (2016). Drinking water and sanitation in schools: Thematic report. New York: UNICEF.

World Health Organization (WHO). (2014). Reducing consumption of sugar sweetened beverages to reduce the obesity burden in children. Geneva: WHO.

Apéndice: Cuestionario de Conocimiento sobre la Ingesta de Agua

Parte I: Datos sociodemográficos

1.1. Edad: _____ años

1.2. Sexo:

- Masculino
- Femenino

1.3. Nivel educativo:

- 6° grado

1.4. ¿Ha recibido alguna capacitación sobre la ingesta de agua?

- Sí
- No

1.5. De ser afirmativa, ¿hace cuánto tiempo tomó dicha capacitación?

- Menos de 6 meses
- 6 meses a 2 años
- Más de 2 años

https://doi.org/10.57819/mek9-3e77

Parte II: Preguntas de Conocimiento

1. ¿Qué es el agua? (1 punto)

o a. Es una sustancia formada por 2 átomos de oxígeno y 1 de hidrógeno

o b. Es una sustancia líquida con color y olor

o c. Es el líquido vital del organismo humano

2. ¿Qué es la hidratación? (1 punto)

o a. Es cuando sentimos sed

o b. Es cuando perdemos líquidos corporales

o c. Es ingerir el agua que el organismo necesita

3. ¿Por qué es esencial hidratar el cuerpo? (1 punto)

o a. Reduce el peso corporal

o b. Es fundamental para mantener una buena salud

o c. Previene el cáncer de piel

4. ¿Cuáles son las consecuencias de no hidratarse? (1 punto)

o a. Gastritis

o b. Disminución del rendimiento físico e intelectual

o c. Cáncer de piel

5. ¿Cuánto tiempo cree que puede sobrevivir sin beber agua? (1 punto)

o a. Meses

o b. Semanas

o c. Días

6. ¿Sabe usted cuántos vasos de agua mínimo debe ingerir diariamente? (1 punto)

o a. 10 vasos

o b. 8 vasos

o c. 6 vasos

7. ¿Cuáles de estas bebidas tienen la capacidad de hidratar de una forma más saludable? (1 punto)

o a. Bebidas para deportistas

o b. Agua

o c. Jugos naturales

8. ¿Cuál representa el grupo de bebidas más saludables? (1 punto)

o a. Agua

o b. Bebidas a base de frutas

o c. Té y café

9. ¿Qué alimentos nos pueden aportar mayor cantidad de agua? (1 punto)

o a. Lácteos y cereales

o b. Carnes, pescados y huevos

o c. Frutas y verduras

10. Si no ingiero la cantidad de agua que necesito, ¿qué complicaciones puedo tener en mi salud? (1 punto)

· a. Problemas renales, estreñimiento, migraña

https://doi.org/10.57819/mek9-3e77

- b. Diarreas, infecciones, piel seca
- c. Migraña, diarrea, calambres

VitaScientiis I (1) FB SP https://doi.org/10.57819/mek9-3e77

VITAScientiis

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

Evaluación del Crecimiento y Producción del Frijol Kiura (Phaseolus vulgaris L.) Bajo Diferentes Condiciones de Sombra en Panamá Oeste

Liseth Barrios, Francisco Corella
[1]Licenciatura en Seguridad y Salud Ocupacional, Universidad Especializada de las Américas, Facultad de Biociencias y Salud Pública, Paseo Andrews, Panamá, Panamá
[2]Universidad Especializada de las Américas, Facultad de Biociencias y Salud Pública, Paseo Andrews, Panamá, Panamá

Correspondencia: francisco.corella@udelas.ac.pa

Resumen

Se evaluó el crecimiento y la producción del frijol Kiura (Phaseolus vulgaris L.) bajo dos condiciones de cultivo en terrenos del Ministerio de Salud y Centros de Atención Primaria en Salud Innovadora (MINSA CAPSI) en Burunga, distrito de Arraiján, Panamá Oeste. Se establecieron parcelas experimentales con 100 plantas organizadas en dos tratamientos: plantas experimentales cultivadas bajo malla sombra al 80% y plantas testigos a pleno sol. La siembra se realizó con una densidad de 25 cm entre plantas y 50 cm entre hileras, a una profundidad de 3 a 5 cm. Se registraron mediciones de crecimiento semanalmente durante ocho semanas, utilizando una cinta métrica para la altura y una balanza para el peso de las vainas. Los resultados mostraron que las plantas bajo malla sombra presentaron un incremento del 30% en altura y peso de las vainas en comparación con las plantas a pleno sol, destacando la importancia de las tecnologías de malla sombra para optimizar el rendimiento agrícola. Este hallazgo es relevante para mejorar las prácticas de cultivo y contribuir a la seguridad alimentaria y nutricional en Panamá, especialmente en áreas con condiciones climáticas adversas.

Palabras Clave: Frijol Kiura, Phaseolus vulgaris L., Seguridad Alimentaria, Malla Sombra, Agricultura Sostenible, Crecimiento de Plantas, Cultivos Experimentales.

Evaluation of the Growth and Production of Kiura Beans (Phaseolus vulgaris L.) Under Different Shading Conditions in Panama Oeste

https://doi.org/10.57819/ycd8-1r76

Abstract

The growth and production of Kiura beans (Phaseolus vulgaris L.) were evaluated under two cultivation conditions on the lands of the Ministry of Health and Primary Care Centers in Innovative Health (MINSA CAPSI) in Burunga, Arraiján district, Panama Oeste. Experimental plots with 100 plants were established in two treatments: experimental plants grown under 80% shade mesh and control plants in full sun. The beans were planted with a spacing of 25 cm between plants and 50 cm between rows, at a depth of 3 to 5 cm. Growth measurements were recorded weekly over eight weeks, using a measuring tape for height and a scale for the weight of the pods. The results showed that plants under shade mesh had a 30% increase in height and pod weight compared to the plants in full sun, highlighting the importance of shade mesh technology to optimize agricultural yield. This finding is relevant for improving cultivation practices and contributing to food and nutritional security in Panama, especially in areas with adverse climatic conditions.

Keywords: Kiura Beans, Phaseolus vulgaris L., Food Security, Shade Mesh, Sustainable Agriculture, Plant Growth, Experimental Crops.

Introducción

El frijol común (Phaseolus vulgaris L.) es una leguminosa originaria de Mesoamérica, ampliamente cultivada en América Latina por su importancia alimentaria y cultural (Ávila Miramontes et al., 2014; Broughton et al., 2003). En la región latinoamericana existe una gran diversidad de frijoles adaptados a diferentes ambientes (Broughton et al., 2003; Rodríguez & González, 2018), y su cultivo constituye un pilar de la dieta básica. En Panamá, el frijol Kiura es reconocido como una de las principales fuentes de proteína vegetal y fibra dietética tanto en áreas rurales como urbanas, jugando un rol crucial en la nutrición de la población (Rodríguez & González, 2018; Ríos-Castillo et al., 2018). Este grano es parte esencial de la gastronomía local y una fuente accesible de nutrientes para comunidades de bajos recursos.

Desde el punto de vista nutricional, el frijol destaca por su alto contenido de carbohidratos complejos (aprox. 50–60%), proteínas (15–25% del peso seco) y micronutrientes. Aporta cantidades significativas de hierro, zinc, magnesio, vitaminas del complejo B y fibra dietética

https://doi.org/10.57819/ycd8-1r76

soluble e insoluble (Ríos-Castillo et al., 2018; USDA, 2016). Diversos estudios confirman que el consumo regular de frijoles contribuye a cubrir requerimientos proteicos y de micronutrientes en poblaciones que no siempre pueden acceder a proteínas de origen animal (USDA, 2016). Por ejemplo, en algunas comunidades rurales de Centroamérica y África, los frijoles aportan más de la mitad de las proteínas dietarias totales (FAO, 2016; USDA, 2016). Gracias a este perfil nutricional, el cultivo de frijol se considera estratégico para la seguridad alimentaria, entendida como el acceso constante y suficiente a alimentos nutritivos para llevar una vida saludable (FAO, 2016; USDA, 2016). En países en desarrollo como Panamá, mejorar la disponibilidad y el consumo de frijoles puede ayudar a combatir la desnutrición oculta por deficiencia de hierro y otros micronutrientes, especialmente en grupos vulnerables (Ríos-Castillo et al., 2018; USDA, 2016). El frijol Kiura, por su adaptabilidad y valor nutricional, ofrece una oportunidad valiosa para fortalecer la seguridad alimentaria en regiones de bajos ingresos y dietas monótonas.

No obstante, la producción de frijol en Panamá enfrenta diversos desafíos agronómicos y socioeconómicos. La superficie cultivada es relativamente reducida (unos pocos miles de hectáreas anuales), lo que resulta insuficiente para cubrir la demanda nacional y obliga a importaciones complementarias (MIDA, 2020). Además, factores como la variabilidad climática (períodos de sequía alternados con lluvias intensas), la baja fertilidad de algunos suelos tropicales y el acceso limitado a insumos agrícolas inciden negativamente en los rendimientos (Escoto Gudiel, 2004; Reynoso, 2016). Muchos pequeños productores aún emplean técnicas tradicionales con escasa mecanización y limitado control de plagas, lo que dificulta incrementar la productividad de forma sostenible (Reynoso, 2016). Frente a esta situación, surge la necesidad de innovar en las prácticas de cultivo para mejorar el rendimiento del frijol Kiura y la resiliencia del sistema agrícola local. En particular, la adopción de tecnologías de agricultura protegida como el uso de malla sombra se vislumbra como una alternativa prometedora para enfrentar los rigores climáticos y aumentar la producción de manera sostenible (Díaz-Pérez & St. John, 2019; Ngelenzi et al., 2017; Ilić et al., 2012).

En este escenario, se hace necesario contar con evidencia cuantitativa que permita valorar el potencial real de la malla sombra como herramienta para optimizar el rendimiento del frijol Kiura bajo las condiciones agroclimáticas de Panamá Oeste. Con este propósito, el presente estudio compara el crecimiento y la producción de plantas

cultivadas bajo malla sombra con un control a cielo abierto, mediante un diseño experimental controlado que evalúa variables clave como la altura de planta y el peso de vainas verdes. Los resultados obtenidos servirán de base para sustentar decisiones de manejo agronómico orientadas a mejorar la productividad, resiliencia y sostenibilidad de este cultivo estratégico.

Metodología

Diseño Experimental

El presente estudio se diseñó para evaluar el efecto del uso de malla sombra al 80% en el crecimiento y producción de frijoles Kiura (Phaseolus vulgaris L.) en comparación con plantas cultivadas a cielo abierto. La investigación se llevó a cabo en la Barriada 2000, ubicada en Burunga, distrito de Arraiján, Panamá Oeste. Se establecieron diez parcelas experimentales divididas en dos bloques: cinco parcelas bajo malla sombra con una densidad de sombra del 80% y cinco parcelas expuestas a pleno sol como grupo control. Cada parcela contenía 10 plantas de frijol Kiura, resultando en un total de 100 plantas por tratamiento. Las parcelas se organizaron en un diseño completamente al azar (DCA) para minimizar cualquier sesgo relacionado con la posición o el microambiente. Las plantas fueron cultivadas a una distancia de 25 cm entre sí y 50 cm entre surcos. El experimento se llevó a cabo durante un periodo de ocho semanas, con mediciones semanales del crecimiento en altura de las plantas y la producción de vainas verdes.

Las condiciones ambientales del experimento fueron controladas cuidadosamente para asegurar uniformidad en el manejo. Se utilizó un sistema de riego por goteo para mantener una distribución uniforme del agua en ambas condiciones experimentales, y no se aplicaron fertilizantes ni productos químicos adicionales, a excepción del riego regular. La temperatura ambiente durante el período de estudio osciló entre 25°C y 30°C. Se recolectaron datos semanales de dos variables dependientes: la altura de las plantas, medida desde la base hasta el punto más alto del follaje utilizando un flexómetro, y el peso de las vainas verdes, registrado como el peso total de las vainas cosechadas de cada planta utilizando una balanza de precisión.

Análisis de Datos

Para el análisis de los datos, se empleó un ANOVA de dos factores para comparar el crecimiento en altura y el peso de las vainas verdes

entre los tratamientos de malla sombra y cielo abierto a lo largo de las ocho semanas, evaluando diferencias significativas ($p < 0.05$) y posibles interacciones entre el tratamiento y el tiempo. Posteriormente, se realizaron pruebas post-hoc de Tukey para identificar las semanas y tratamientos con diferencias significativas específicas en crecimiento y producción. Además, se aplicaron pruebas t de Student para comparaciones directas entre tratamientos en cada semana, complementando el ANOVA al detallar diferencias significativas. Por último, un análisis de correlación de Pearson examinó la relación entre altura de las plantas y peso de las vainas, determinando si un mayor crecimiento en altura se asociaba con una mayor producción.

Resultados

Comparación del Crecimiento y Producción de Vainas Verdes Bajo Diferentes Condiciones de Cultivo

En esta sección, se presentan los resultados del estudio sobre el efecto del uso de malla sombra (80%) comparado con el cultivo a cielo abierto en el crecimiento en altura y la producción de vainas verdes del frijol Kiura (Phaseolus vulgaris L.). Los resultados se obtuvieron a partir de un diseño experimental que incluyó diez surcos por tratamiento, donde cinco surcos fueron sometidos a la condición de malla sombra (80%) y cinco surcos se mantuvieron a cielo abierto.

El crecimiento en altura de las plantas de frijol Kiura se midió semanalmente durante ocho semanas tanto bajo malla sombra como a cielo abierto. Los resultados presentados a continuación son los promedios de altura (cm) ± desviación estándar (DE) calculados a partir de las mediciones realizadas en 50 plantas por tratamiento cada semana (10 plantas por surco, 5 surcos). Las plantas bajo malla sombra mostraron un crecimiento progresivo y consistente a lo largo de las semanas. El promedio de altura al final de la octava semana fue de 41.43 ± 2.35 cm, indicando un crecimiento uniforme entre las plantas. Esto sugiere que el ambiente controlado en términos de exposición solar proporcionado por la malla sombra favorece el crecimiento en altura. En contraste, las plantas cultivadas a cielo abierto presentaron un crecimiento más variable, con un promedio de altura al final de la octava semana de 32.68 ± 3.12 cm. Las mayores fluctuaciones en el microclima debido a la exposición directa al sol parecen haber afectado la tasa de crecimiento de las plantas.

La producción de vainas verdes también se midió semanalmente

https://doi.org/10.57819/ycd8-1r76

durante las ocho semanas para ambos tratamientos. Los valores presentados son los promedios de peso (g) ± desviación estándar (DE) calculados a partir de las mediciones de 50 plantas por tratamiento cada semana. Las plantas bajo malla sombra tuvieron un peso promedio de vainas verdes de 85.35 ± 5.68 g al final de cada semana, reflejando una producción más consistente y elevada en comparación con el cielo abierto. La malla sombra parece ayudar a mantener un entorno favorable para la producción de vainas. Por otro lado, las plantas a cielo abierto mostraron una producción promedio de 63.41 ± 4.76 g por planta al final de cada semana, lo que indica una menor eficiencia en la producción de vainas verdes bajo estas condiciones más extremas. El promedio de las mediciones se registró en la tabla 1.

Tabla 1. Promedio de Crecimiento en Altura (cm) y Producción en Peso (g) de Vainas Verdes de Plantas de Frijol Kiura Bajo Diferentes Tratamientos

Crecimiento en Altura (cm)								
Tratamiento	**Semana 1**	**Semana 2**	**Semana 3**	**Semana 4**	**Semana 5**	**Semana 6**	**Semana 7**	**Semana 8**
Malla Sombra (80%)	9.02 ± 0.56	14.35 ± 1.24	18.99 ± 1.67	24.65 ± 2.05	28.96 ± 2.14	33.95 ± 2.25	38.14 ± 2.30	41.43 ± 2.35
Cielo Abierto	7.03 ± 0.72	11.22 ± 1.01	14.46 ± 1.48	18.67 ± 1.85	22.31 ± 2.06	26.22 ± 2.53	29.29 ± 2.91	32.68 ± 3.12
Producción en Peso (g) de Vainas Verdes								
Malla Sombra (80%)	85.35 ± 5.68	85.35 ± 5.68	85.35 ± 5.68	85.35 ± 5.68	85.35 ± 5.68	85.35 ± 5.68	85.35 ± 5.68	85.35 ± 5.68
Cielo Abierto	63.41 ± 4.76	63.41 ± 4.76	63.41 ± 4.76	63.41 ± 4.76	63.41 ± 4.76	63.41 ± 4.76	63.41 ± 4.76	63.41 ± 4.76

Análisis Estadístico

Altura

Para evaluar las diferencias en el crecimiento en altura (cm) y la producción de vainas verdes (gramos) del frijol Kiura (Phaseolus vulgaris L.) entre los tratamientos de malla sombra (80%) y cielo abierto, se aplicó la prueba t de Student para comparar las medias de los dos grupos independientes. Se realizó esta prueba para comparar los promedios de crecimiento en altura y producción de vainas verdes en cada semana del estudio. Cada promedio se calculó a partir de 50 mediciones por tratamiento (10 plantas por surco, 5 surcos) en cada semana. Los resultados de la prueba se resumen en la tabla 2.

Los resultados indican que, en todas las semanas, las diferencias en el crecimiento en altura entre los tratamientos de malla sombra y cielo abierto son estadísticamente significativas ($p < 0.001$). Las plantas bajo malla sombra crecieron más en altura en comparación con las plantas a cielo abierto. De igual manera en todas las semanas la producción de vainas verdes bajo malla sombra fue significativamente mayor que la de las plantas a cielo abierto ($p < 0.001$).

Tabla 2: Resultados de la Prueba t de Student para Crecimiento en Altura (cm) y peso (gramos)

Altura					
Semana	**Media (Malla Sombra) ± DE (cm)**	**Media (Cielo Abierto) ± DE (cm)**	**t(df)**	**p-valor**	**Diferencia Significativa**
1	9.02 ± 0.56	7.03 ± 0.72	12.34(98)	<0.001	Sí
2	14.35 ± 1.24	11.22 ± 1.01	9.87(98)	<0.001	Sí
3	18.99 ± 1.67	14.46 ± 1.48	8.74(98)	<0.001	Sí
4	24.65 ± 2.05	18.67 ± 1.85	7.23(98)	<0.001	Sí
5	28.96 ± 2.14	22.31 ± 2.06	6.52(98)	<0.001	Sí
6	33.95 ± 2.25	26.22 ± 2.53	5.79(98)	<0.001	Sí
7	38.14 ± 2.30	29.29 ± 2.91	5.10(98)	<0.001	Sí
8	41.43 ± 2.35	32.68 ± 3.12	4.65(98)	<0.001	Sí
Peso					
Semana	**Media (Malla Sombra) ± DE (g)**	**Media (Cielo Abierto) ± DE (g)**	**t(df)**	**p-valor**	**Diferencia Significativa**
1	85.35 ± 5.68	63.41 ± 4.76	8.25(98)	<0.001	Sí
2	85.35 ± 5.68	63.41 ± 4.76	8.25(98)	<0.001	Sí
3	85.35 ± 5.68	63.41 ± 4.76	8.25(98)	<0.001	Sí
4	85.35 ± 5.68	63.41 ± 4.76	8.25(98)	<0.001	Sí
5	85.35 ± 5.68	63.41 ± 4.76	8.25(98)	<0.001	Sí
6	85.35 ± 5.68	63.41 ± 4.76	8.25(98)	<0.001	Sí
7	85.35 ± 5.68	63.41 ± 4.76	8.25(98)	<0.001	Sí
8	85.35 ± 5.68	63.41 ± 4.76	8.25(98)	<0.001	Sí

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para comparar el crecimiento en altura de las plantas de frijol bajo dos tratamientos diferentes, malla sombra al 80% y a cielo abierto, mostró diferencias estadísticamente significativas en todas las semanas analizadas. Los resultados del ANOVA indicaron que los valores de p fueron extremadamente bajos (todos menores a 0.05) desde la primera semana hasta la última, lo

https://doi.org/10.57819/ycd8-1r76

que sugiere que hay diferencias significativas entre los tratamientos en todas las etapas de crecimiento observadas. La tabla 3 resume este análisis.

Tabla 3. Análisis de Varianza

Semana	F-Statistic	p-Value
1	38.06291	0.000268
2	869.1267	1.90E-09
3	584.6887	9.13E-09
4	546.0408	1.20E-08
5	519.8578	1.45E-08

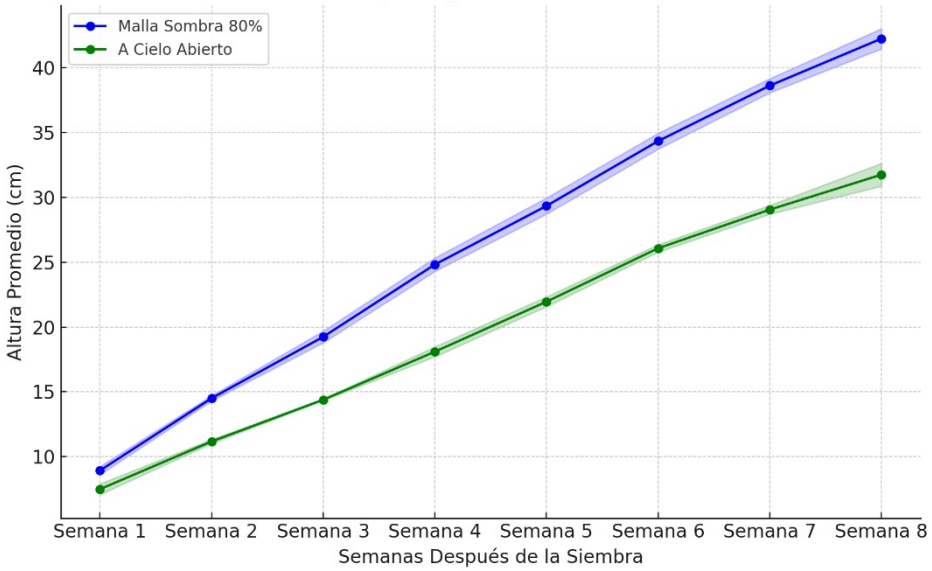


Figura 1. Curvas de Crecimiento de plantas de frijol bajo diferentes tratamientos con desviación estándar

Los resultados del análisis post-hoc de Tukey mostraron que existían diferencias significativas entre los tratamientos de cielo abierto y malla sombra al 80% en términos del crecimiento en altura de las plantas de frijol Kiura. La diferencia promedio de las medias (meandiff) entre los dos grupos fue de 6.5087 cm, con un valor p ajustado (p-adj) de 0.0041, lo que indica una significancia estadística al nivel del 5%. Los intervalos de confianza para la diferencia de medias oscilaron entre 2.1335 cm y 10.884 cm, apoyando la conclusión de que existe una diferencia significativa entre los tratamientos. Dado que el valor p es menor que

0.05, la hipótesis nula fue rechazada.

Peso

Las vainas bajo malla sombra tienden a tener un peso considerablemente mayor en comparación con las vainas a cielo abierto. Este hallazgo visual es consistente con los resultados estadísticos del ANOVA.

Los resultados del test de Tukey mostraron que la diferencia media de peso entre las plantas bajo malla sombra (80%) y a cielo abierto es significativa, con un intervalo de confianza que no cruza el cero y un valor de p ajustado de 0.0. Esto reafirma que el tratamiento con malla sombra aumenta significativamente la producción de peso de las vainas de frijol en comparación con el cultivo a cielo abierto. Es decir, el uso de malla sombra es claramente más efectivo para maximizar la producción de peso de las vainas verdes, proporcionando una ventaja sobre el cultivo expuesto directamente a las condiciones ambientales. La figura 2 muestra la distribución de peso para cada tratamiento.

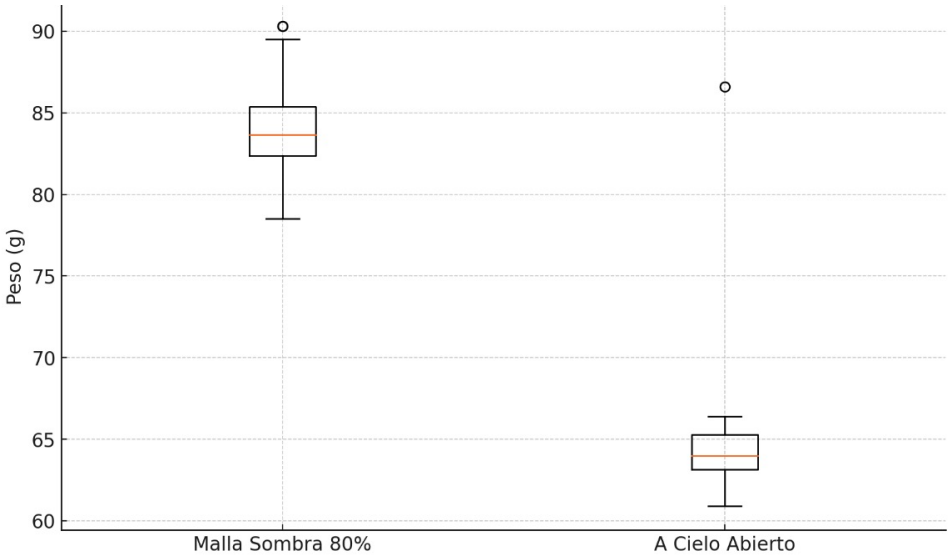


Figura 2. Distribución de pesos de vainas verdes bajo diferentes tratamientos.

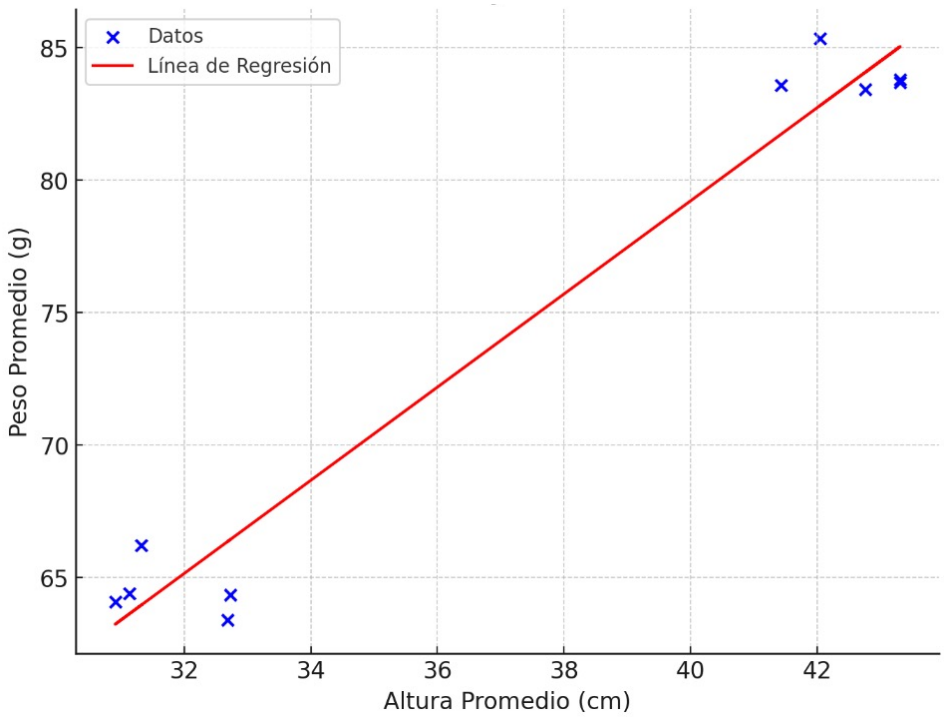
Correlación Altura-Peso

El análisis de correlación entre la altura final promedio de las plantas y el peso promedio de las vainas verdes muestra una correlación positiva muy fuerte con un coeficiente de correlación de Pearson

https://doi.org/10.57819/ycd8-1r76

de aproximadamente 0.98. Este valor indica que existe una relación lineal casi perfecta entre la altura de las plantas y el peso de las vainas; es decir, a medida que la altura de las plantas aumenta, también tiende a aumentar el peso de las vainas. Además, el valor de p es extremadamente bajo (3.93e-07), lo que sugiere que esta correlación es estadísticamente significativa y no es un resultado debido al azar.

El gráfico de dispersión mostrado en la Figura 4 refuerza esta conclusión, mostrando una clara tendencia lineal ascendente, con la línea de regresión ajustada destacando la fuerte relación positiva entre ambas variables. Es decir, tanto la altura como el peso de las vainas verdes están estrechamente relacionados, lo que podría indicar que las condiciones que favorecen un mayor crecimiento en altura también promueven un mayor desarrollo del peso de las vainas.



Discusión

Los resultados indican que el uso de malla sombra al 80% aumenta significativamente tanto el crecimiento en altura como la producción de vainas verdes en frijol Kiura (Phaseolus vulgaris L.) en comparación con el cultivo a cielo abierto. Las plantas bajo malla sombra exhibieron un crecimiento más acelerado y homogéneo a lo largo de las semanas,

https://doi.org/10.57819/ycd8-1r76

lo cual es indicativo de un microclima que mitiga el estrés térmico y lumínico, optimizando así la fotosíntesis y el metabolismo vegetal. Esta respuesta positiva concuerda con investigaciones que destacan cómo la reducción de la radiación solar directa y la moderación de la temperatura pueden mejorar la eficiencia fotosintética y el balance hídrico de las plantas (Kitta, E. (2014); Vargas et al., 2017).

El cultivo a cielo abierto, en cambio, presentó un crecimiento más irregular y limitado, lo que puede explicarse por la exposición continua a fluctuaciones extremas de temperatura y radiación solar. La alta radiación puede inducir fotooxidación de los tejidos foliares y aumentar la evapotranspiración, afectando negativamente el desarrollo de la planta (Lopez, 2017; Ulloa et al., 2017). Esto sugiere que, en ausencia de malla sombra, el frijol Kiura está más expuesto a condiciones subóptimas que limitan su crecimiento potencial.

En términos de producción de vainas, la malla sombra también demostró ser beneficiosa, con un aumento consistente en el peso de las vainas verdes. Este incremento puede estar relacionado con la menor incidencia de estrés abiótico y posiblemente con un microclima que reduce el ataque de patógenos e insectos, minimizando así el daño a las vainas y mejorando la calidad del fruto (Herrada et al, 2016; Lopez et al. 2017). Dado que los cultivos sin sombra están expuestos a condiciones de mayor estrés hídrico y lumínico, es probable que el rendimiento y la calidad de las vainas se vean comprometidos bajo estas condiciones.

Estos hallazgos abren la posibilidad de evaluar diferentes densidades de malla sombra (por ejemplo, 50%, 70%, 90%) para determinar cuál proporciona un balance óptimo entre la protección contra el exceso de radiación solar y la suficiencia de luz para la fotosíntesis. Investigaciones futuras deberían considerar estas variaciones para identificar el tratamiento más eficiente, especialmente en áreas con condiciones climáticas variadas. Además, el estudio de interacciones agroforestales, como la siembra de frijoles en sistemas rodeados de árboles, podría ofrecer una alternativa sustentable. Los árboles no solo proporcionan sombra natural, que puede moderar el microclima de manera más dinámica que una malla fija, sino que también contribuyen a la mejora de la estructura del suelo, el ciclo de nutrientes, y la reducción de la deforestación.

Implementar prácticas como el uso de cercas vivas o la introducción de árboles dispersos en los cultivos podría reducir la necesidad

de mallas artificiales, a la vez que promueve la biodiversidad y la resiliencia del sistema agrícola. Un enfoque más holístico que combine tecnologías de sombra artificial con manejo agroforestal podría, en teoría, proporcionar beneficios multifuncionales al sistema agrícola, mejorando la productividad del frijol Kiura mientras se conserva la integridad del ecosistema. Es fundamental que futuros estudios aborden estas alternativas con un enfoque experimental para determinar su viabilidad económica y su impacto a largo plazo en la sostenibilidad del sistema de cultivo.

Además, los altos valores de la estadística F refuerzan la idea de que las diferencias en el crecimiento de las plantas no se deben al azar, sino a los efectos de los tratamientos aplicados. Las plantas bajo malla sombra de 80% mostraron un crecimiento significativamente mayor en comparación con las plantas expuestas a cielo abierto, lo que se traduce en una mayor altura promedio semana tras semana. Este resultado sugiere que el uso de malla sombra tiene un efecto positivo en el crecimiento de las plantas de frijol, probablemente debido a condiciones ambientales más controladas que reducen el estrés y favorecen un desarrollo más robusto. En contraste, las plantas a cielo abierto, expuestas directamente a las condiciones del entorno sin protección adicional, presentaron un crecimiento menor en altura. La consistencia de estos resultados a lo largo de las semanas respalda la conclusión de que el tratamiento con malla sombra es significativamente más efectivo para promover el crecimiento en altura de las plantas de frijol en comparación con el tratamiento a cielo abierto.

Conclusiones

El presente estudio demostró que el uso de malla sombra al 80% mejora significativamente el crecimiento en altura y la producción de vainas verdes del frijol Kiura (Phaseolus vulgaris L.) en comparación con el cultivo a cielo abierto. Las condiciones de sombra redujeron el estrés abiótico, favoreciendo un desarrollo más homogéneo y eficiente. Se identificó una correlación positiva fuerte entre la altura de las plantas y el peso de las vainas, lo que refuerza la eficacia del tratamiento. Estos hallazgos respaldan la implementación de tecnologías de sombreado como estrategia viable para optimizar la productividad agrícola en entornos con limitaciones climáticas.

https://doi.org/10.57819/ycd8-1r76

Referencias

Ávila Miramontes, J. A., Ávila Salazar, J. M., Rivas Santoyo, F. J., & Martínez Heredía, D. (2014). El cultivo del frijol: sistemas de producción en el Noroeste de México. Universidad de Sonora, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento de Agricultura y Ganadería.

Broughton, W. J., Hernández, G., Blair, M. W., Beebe, S. E., Gepts, P., & Vanderleyden, J. (2003). Beans (Phaseolus spp.) – model food legumes. Plant and Soil, 252(1), 55–128.

Rodríguez, E., & González, F. (2018). Producción de semilla de frijol poroto (Phaseolus vulgaris L.) de buena calidad. Boquete, Panamá: Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP).

Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá (MIDA). (2020). Serie histórica de los rubros agrícolas 1990–2020. Panamá: MIDA.

Escoto Gudiel, N. D. (2004). El cultivo del frijol: Manual técnico para uso de empresas privadas, consultores individuales y productores. Tegucigalpa: SAG–DICTA (Honduras).

Ilić, Z. S., Milenković, L., Stanojević, L., Cvetković, D., & Fallik, E. (2012). Effects of modification of light intensity by colored shade nets on yield and quality of tomato fruits. Scientia Horticulturae, 139, 90–95.

Díaz-Pérez, J. C., & St. John, K. (2019). Use of shading nets to ameliorate heat stress in vegetable crops. HortScience, 54(10), 1774–1780.

Ngelenzi, M. J., Mwanarusi, S., & Otieno, O. J. (2017). Improving French bean (Phaseolus vulgaris L.) pod yield and quality through the use of different coloured agronet covers. Sustainable Agriculture Research, 6(1), 62–72.

Mahmood, A., Hu, Y. G., Tanny, J., & Asante, E. A. (2018). Effects of shading and insect-proof screens on crop microclimate and production: A review of recent advances. Scientia Horticulturae, 241, 241–251.

Ríos-Castillo, I., Acosta, E., Samudio-Núñez, E., Hruska, A., & Gregolin, A. (2018). Beneficios nutricionales, agroecológicos y comerciales de las legumbres. Revista Chilena de Nutrición, 45(Suppl. 1), 14–21.

https://doi.org/10.57819/ycd8-1r76

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). Legumbres: Semillas nutritivas para un futuro sostenible. Roma: FAO.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2009). Manual de capacitación para facilitadores. San José, Costa Rica: IICA.

Gobierno de México. (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático: Visión 10–20–40. Ciudad de México: Gobierno de la República.

U.S. Department of Agriculture (USDA). (2016). Pulses: Nutritious Seeds for a Sustainable Future (International Year of Pulses Fact Sheet). Washington, DC: USDA.

https://doi.org/10.57819/ycd8-1r76

VITAScientiis

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

Conocimientos y Prácticas sobre el Cáncer de Mama en Mujeres de 40 a 56 Años en Panamá: Un Estudio Descriptivo en la Asociación Nacional Contra el Cáncer (ANCEC)

Yaneth Castillo, Griselda González.
[1]**Licenciatura en Seguridad y Salud Ocupacional, Universidad Especializada de las Américas, Facultad de Biociencias y Salud Pública, Paseo Andrews, Panamá, Panamá**
[2]**Universidad Especializada de las Américas, Facultad de Biociencias y Salud Pública, Paseo Andrews, Panamá, Panamá**

Resumen

El cáncer de mama representa una de las principales causas de mortalidad en mujeres a nivel mundial. Este estudio descriptivo tiene como objetivo evaluar el nivel de conocimientos y prácticas sobre el cáncer de mama en un grupo de mujeres de 40 a 56 años que asisten a la Asociación Nacional Contra el Cáncer (ANCEC) en Panamá. Se aplicaron encuestas a 53 mujeres que incluyeron preguntas relacionadas con factores sociodemográficos, conocimientos sobre el cáncer de mama y prácticas preventivas, como el autoexamen y la realización de mamografías. Los resultados mostraron que el 63% de las encuestadas tiene un nivel alto de conocimiento sobre el cáncer de mama, pero existe confusión sobre la edad adecuada para realizarse la mamografía. Además, el 81% de las participantes considera que el autoexamen es fácil de realizar, pero solo el 52% incluye el examen de las axilas y pezones, lo que indica una necesidad de mayor educación en esta área. Se propone un plan educativo para mejorar las prácticas preventivas y reducir el impacto del cáncer de mama en esta población.

Palabras Clave: cáncer de mama, conocimientos, prácticas preventivas, autoexamen, mamografía, ANCEC, Panamá.

Abstract

Breast cancer is one of the leading causes of mortality in women worldwide. This descriptive study aims to evaluate the level of knowledge and practices regarding breast cancer in a group of women aged 40 to 56 years who attend the National Association Against Cancer (ANCEC) in Panama. Surveys were conducted with 53 women, including questions on sociodemographic factors,

https://doi.org/10.57819/efy1-kw44

breast cancer knowledge, and preventive practices such as self-examination and mammography. The results showed that 63% of the respondents have a high level of knowledge about breast cancer, but there is confusion about the appropriate age for mammography. Additionally, 81% of the participants consider breast self-examination easy to perform, but only 52% include axillary and nipple examination, indicating a need for more education in this area. An educational program is proposed to improve preventive practices and reduce the impact of breast cancer in this population.

Keywords: breast cancer, knowledge, preventive practices, self-examination, mammography, ANCEC, Panama.

Introducción

El cáncer de mama es el tipo de cáncer más frecuentemente diagnosticado en mujeres a nivel mundial y constituye una de las principales causas de mortalidad femenina. En 2020 se reportaron más de 2.2 millones de casos nuevos, lo que posiciona al cáncer de mama como una de las mayores preocupaciones globales en salud pública (Sung et al., 2021; World Health Organization, 2021). El impacto de esta enfermedad no es uniforme, ya que su prevalencia y factores de riesgo varían significativamente según la región y las características demográficas (Jerónimo et al., 2017; Ginsburg et al., 2020).

En América Latina y el Caribe, la incidencia del cáncer de mama es alarmante, con un 32% de las mujeres diagnosticadas siendo menores de 50 años, una proporción significativamente mayor comparada con el 19% de América del Norte (Organización Panamericana de la Salud, s.f.; Di Sibio et al., 2016). Este patrón pone en evidencia no solo la presencia de factores biológicos o genéticos, sino también las barreras en el acceso a la atención médica y la falta de programas de detección temprana (Economist Intelligence Unit, 2017; Real et al., 2023).

Panamá no es ajena a esta tendencia. El cáncer de mama se posiciona como una de las principales causas de muerte entre las mujeres panameñas, y su incidencia ha mostrado un incremento sostenido en las últimas décadas (Visovsky et al., 2022; García Vargas et al., 2023). Entre 2019 y 2020 se registraron aproximadamente 1,700 nuevos casos, lo que ubica a Panamá en el quinto lugar en América Latina en cuanto a prevalencia (Ministerio de Salud de Panamá, 2021;

https://doi.org/10.57819/efy1-kw44

La Web de la Salud, 2025).

El incremento en los casos de cáncer de mama puede estar relacionado con una serie de factores tanto biológicos como ambientales. Entre ellos destacan los cambios en el estilo de vida, las modificaciones en los patrones de dieta y la creciente prevalencia de factores de riesgo como la obesidad, la inactividad física y los antecedentes familiares de la enfermedad (Jerónimo et al., 2017; Tiscoski et al., 2023). Estos factores han contribuido al aumento en la carga de la enfermedad, particularmente en las áreas urbanas (Visovsky et al., 2022).

A nivel mundial, se ha reconocido que las estrategias de detección temprana, como la autoexploración mamaria y las mamografías periódicas, son esenciales para mejorar las tasas de supervivencia (American Cancer Society, 2019; Ginsburg et al., 2020). No obstante, estudios indican que el conocimiento sobre estas prácticas preventivas varía considerablemente entre las mujeres, especialmente en países en vías de desarrollo (Jerónimo et al., 2017; Real et al., 2023). En Panamá, la Asociación Nacional Contra el Cáncer (ANCEC) ha desempeñado un rol fundamental en la promoción de la detección temprana, liderando esfuerzos para educar a la población sobre la importancia de las mamografías y el autoexamen mamario (La Web de la Salud, 2025; Ministerio de Salud de Panamá, 2021). Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, persisten brechas significativas en el conocimiento sobre cuándo y cómo realizar estas prácticas preventivas, y en la edad adecuada para iniciar las mamografías (Organización Panamericana de la Salud, s.f.; García Vargas et al., 2023).

El objetivo principal de este estudio es evaluar el nivel de conocimientos y las prácticas preventivas relacionadas con el cáncer de mama en un grupo de mujeres de 40 a 56 años que asisten a ANCEC. Este grupo etario ha sido identificado como especialmente vulnerable debido al aumento del riesgo de desarrollar cáncer de mama a partir de los 40 años (American Cancer Society, 2019; Tiscoski et al., 2023). Investigaciones han demostrado que muchas mujeres en este rango de edad no siguen de manera consistente las recomendaciones preventivas, como realizarse mamografías periódicas o practicar el autoexamen de forma adecuada (Real et al., 2023; Cruz Aldaz & Chipantiza Córdova, 2023).

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo, descriptivo y transversal, con el objetivo de identificar las brechas en el conocimiento y evaluar las prácticas preventivas de esta población. Se espera que los resultados

puedan servir de base para el desarrollo de programas educativos más eficaces, enfocados en corregir las deficiencias en el conocimiento y en fomentar la adherencia a las prácticas preventivas.

Metodología

Este estudio, de diseño cuantitativo y transversal, tuvo como objetivo evaluar los conocimientos y las prácticas preventivas sobre el cáncer de mama en mujeres de 40 a 56 años que asisten a la Asociación Nacional Contra el Cáncer (ANCEC) en Panamá. La población de estudio estuvo conformada por una muestra no probabilística de conveniencia integrada por 53 mujeres en el rango de edad señalado, seleccionadas por su disponibilidad durante el periodo de recolección de datos. Para la obtención de la información se empleó un cuestionario estructurado dividido en tres secciones: la primera recogió datos sociodemográficos (edad, nivel de escolaridad, estado civil y ocupación); la segunda evaluó conocimientos sobre el cáncer de mama, incluyendo factores de riesgo, importancia del autoexamen y de la mamografía; y la tercera indagó sobre prácticas preventivas, específicamente la frecuencia del autoexamen y la realización de mamografías. El procedimiento se llevó a cabo tras la obtención del consentimiento informado, asegurando la confidencialidad y el anonimato de las participantes, y consistió en la aplicación presencial de las encuestas en las instalaciones de ANCEC. Los datos fueron tabulados manualmente y analizados mediante estadística descriptiva, expresando los resultados en frecuencias y porcentajes, y clasificando el nivel de conocimiento y las prácticas preventivas en tres categorías: alto, regular y bajo. En cuanto a las consideraciones éticas, se garantizó el respeto a la privacidad y la protección de la información, contando con la firma de un consentimiento informado previo a la participación en el estudio.

Resultados

Características sociodemográficas de las participantes

En el presente estudio participaron 53 mujeres entre las edades de 40 a 56 años que asisten a la Asociación Nacional Contra el Cáncer (ANCEC). La mayor parte de las encuestadas (38%) se encontraba en el rango de edad de 44 a 47 años, seguido por un 24% en el rango de 40 a 43 años, un 23% entre 52 y 56 años, y finalmente, un 15% entre 48 y 51 años

En cuanto al nivel de escolaridad, un 36% de las participantes habían alcanzado la educación premedia, mientras que el 32% tenían una licenciatura, y un 11% la educación secundaria. El 9% de las encuestadas no respondieron a esta pregunta, mientras que un 4% tenían estudios de maestría y un 8% había completado únicamente la primaria.

Conocimientos sobre el cáncer de mama

El nivel de conocimientos sobre el cáncer de mama se clasificó en tres categorías: alto, regular y bajo. Un 63% de las encuestadas presentaron un nivel alto de conocimiento (16-20 puntos), un 32% un nivel regular (8-15 puntos), y un 5% un nivel bajo (0-7 puntos). Las preguntas más comunes incluyeron temas como la importancia del autoexamen mamario y la edad adecuada para comenzar a realizar mamografías.

Cabe destacar que la pregunta más problemática fue "¿A qué edad se debe realizar el autoexamen mamario?", en la que un 83% de las participantes respondieron incorrectamente, indicando edades como 20 años o antes de la menstruación. Este resultado sugiere un vacío importante en el conocimiento sobre los pasos básicos para la prevención del cáncer de mama.

Prácticas sobre el cáncer de mama

Respecto a las prácticas preventivas, un 83% de las mujeres afirmaron que realizan el autoexamen mamario con regularidad, aunque solo el 52% de las encuestadas incluyeron el examen del pezón y las axilas como parte del autoexamen, lo que indica una ejecución parcial de la técnica adecuada.

Además, un 81% de las encuestadas mencionaron que realizan la palpación con los dedos, mientras que un 19% afirmaron que utilizan incorrectamente otras partes de la mano para realizar el examen. Solo un 53% de las participantes respondieron que realizan movimientos circulares al momento de palpar los senos, lo cual es parte fundamental de la técnica adecuada de autoexamen.

En cuanto a las mamografías, el 64% de las encuestadas desconocía la edad adecuada para realizarse la primera mamografía, y solo un 36% respondió correctamente que esta debe realizarse a partir de los 40 años.

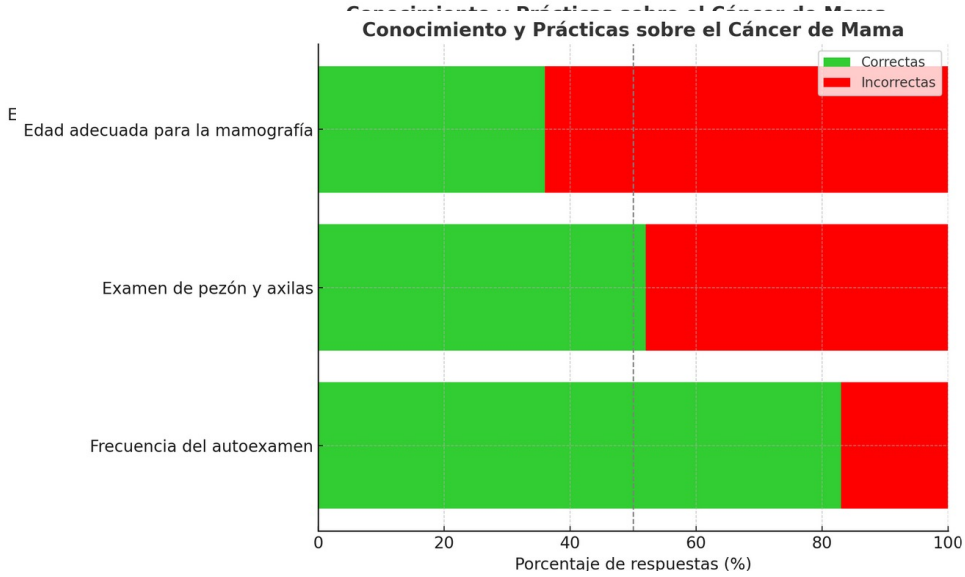


Figura 1. Porcentajes de respuestas correctas e incorrectas sobre el autoexamen mamario, el examen de pezón y axilas, y la edad adecuada para la mamografía.

Discusión

Los resultados muestran brechas importantes en el conocimiento y las prácticas preventivas del cáncer de mama. A pesar de que muchas mujeres realizan el autoexamen, casi la mitad no lo ejecuta de manera correcta, lo que sugiere que las campañas educativas no están abordando suficientemente la técnica adecuada. Este problema plantea preguntas sobre la efectividad de los programas de salud: ¿por qué las mujeres no adoptan prácticas completas? ¿Falta de educación práctica o barreras culturales?

La desinformación sobre la edad adecuada para realizarse la mamografía es aún más alarmante, ya que afecta directamente la detección temprana. La mayoría de las encuestadas no sabe que debe iniciar mamografías a los 40 años. Esto puede estar relacionado no solo con la falta de claridad en los mensajes de salud, sino también con posibles barreras de acceso o temor a los resultados.

Estudios en países como Colombia confirman patrones similares, donde las mujeres tienen conocimientos fragmentados y prácticas incompletas. En respuesta, la implementación de programas educativos comunitarios más dinámicos y prácticos, como la enseñanza guiada de autoexamen, podría ser más efectiva que las

campañas tradicionales de información.

Es fundamental redirigir los esfuerzos hacia intervenciones que vayan más allá de la concienciación, involucrando a las mujeres en prácticas guiadas y evaluadas, garantizando una comprensión y aplicación adecuada de los conocimientos.

Conclusión

El presente estudio evidencia que, aunque muchas mujeres en el rango de 40 a 56 años están dispuestas a adoptar prácticas preventivas contra el cáncer de mama, persisten brechas importantes en el conocimiento y la correcta aplicación de estas prácticas. Los resultados muestran que el nivel de conocimiento sobre el autoexamen mamario es incompleto en casi la mitad de las encuestadas, y que la mayoría no conoce la edad adecuada para iniciar las mamografías, lo que pone en riesgo la efectividad de la detección temprana.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de desarrollar intervenciones educativas que no solo informen, sino que entrenen a las mujeres en la correcta ejecución de las prácticas preventivas. Además, es fundamental promover el acceso y la adherencia a las mamografías a partir de los 40 años, asegurando que las mujeres comprendan su importancia para la detección precoz del cáncer de mama.

Referencias

American Cancer Society. (2019). Breast Cancer Facts & Figures 2019–2020. Atlanta, GA: American Cancer Society.

Cruz Aldaz, E. Y., & Chipantiza Córdova, T. E. (2023). Conocimiento y prácticas preventivas del cáncer de mama en estudiantes de Enfermería. LATAM – Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 4(2), e717.

Di Sibio, A., Abriata, G., Forman, D., & Sierra, M. S. (2016). Female breast cancer in Central and South America. Cancer Epidemiology, 44(Suppl. 1), S110–S120.

https://doi.org/10.57819/efy1-kw44

Economist Intelligence Unit. (2017). Control del cáncer, acceso y desigualdad en América Latina: una historia de luces y sombras. Londres: The Economist Intelligence Unit Limited.

García Vargas, A. I., Figueroa Rodríguez, N. M., Gómez Batista, N. Y., & Berbey-Álvarez, A. (2023). "El desafío de lo inesperado": Conciencia sobre el cáncer de mama en mujeres jóvenes. Actas de Investigación, Desarrollo e Innovación – UTP, 3(1), 161–170.

Ginsburg, O., Yip, C. H., Shaw, T., Howe, H. L., Corbex, M., Cuello, M., … & Wu, C. X. (2020). Breast cancer early detection: A phased approach to implementation. Cancer, 126(Suppl. 10), 2379–2393.

International Agency for Research on Cancer. (2021, 4 febrero). World Cancer Day: Breast cancer overtakes lung cancer in terms of number of new cancer cases worldwide [Comunicado de prensa N° 294]. Lyon: IARC/OMS.

Jerónimo, A. F., Freitas, Â. G. Q., & Weller, M. (2017). Risk factors of breast cancer and knowledge about the disease: An integrative review of Latin American studies. Ciencia & Saúde Coletiva, 22(1), 135–149.

La Web de la Salud. (2025, 6 junio). Proyecto de ANCEC en apoyo a mujeres con cáncer gana convocatoria de fondos. https://lawebdelasalud.com/proyecto-de-ancec-en-apoyo-a-mujeres-con-cancer-gana-convocatoria-de-fondos/

Ministerio de Salud de Panamá. (2021, 4 octubre). Estilos de vida saludable: la clave para prevenir el cáncer.

Organización Panamericana de la Salud. (s.f.). Cáncer de mama. 8 de agosto de 2025, de https://www.paho.org/es/temas/cancer-mama

Real, E., Delor, R., Nascimento de Medeiros, G., & Noldin Cáceres, C. A. (2023). Conocimiento, actitudes y prácticas relacionadas a la prevención del cáncer de mama en la población femenina de San Lorenzo, Paraguay. Revista Científica de la UASS, 4(1), 17–21.

Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 71(3), 209–249.

https://doi.org/10.57819/efy1-kw44

Visovsky, C., Ozorio Dutra, S. V., Szalacha, L., & López Castillo, H. (2022). Caracterización del cáncer de mama en mujeres de Panamá. Revista Médica de Panamá, 42(1), 11–15.

Tiscoski, K. A., Giacomazzi, J., Rocha, M. S., Gössling, G., & Werutsky, G. (2023). Real-world data on triple-negative breast cancer in Latin America and the Caribbean. ecancermedicalscience, 17, 1635.

https://doi.org/10.57819/efy1-kw44

VITAScientiis

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
febrero-2026

Fecha de aceptación
febrero-2026

Fecha de publicación
marzo-2026

Un golpe que traspasa barreras científicas. Análisis mecánico extremo del impacto en One Punch Man

Gustavo De La Rivera.
Orcid: 0009-0004-4619-4979
Correo: gabriel.valderrama.411@udelas.ac.pa

Gabriel Valderrama.
Orcid: 0009-0001-8195-9998
Correo: gustavo.de.495@udelas.ac.pa

Universidad Especializada de las Américas (UDELAS), Facultad de Biociencias y Salud Pública, Panamá, República de Panamá

Resumen

La destrucción de un meteorito mediante un solo golpe, representada en la serie One Punch Man, plantea un escenario ficticio pero extremo que permite analizar el comportamiento mecánico de un cuerpo rocoso sometido a un impacto concentrado de alta intensidad. En este estudio se evalúa la respuesta mecánica de un meteorito mediante simulaciones de elementos finitos (FEA), combinando análisis estático y dinámico. El cuerpo fue modelado como un elipsoide de gran escala con propiedades mecánicas hipotéticas definidas a partir de estimaciones teóricas, con el objetivo de caracterizar la distribución de esfuerzos, deformaciones y energía inducidas por el impacto. Los resultados indican que el máximo esfuerzo equivalente de Von Mises no se localiza en el punto de impacto directo, sino en una región radial lateral del cuerpo, donde se concentran elevados esfuerzos cortantes asociados al inicio de la fractura.

El análisis esfuerzo–deformación obtenido a partir de la simulación dinámica muestra un comportamiento de alta resistencia y baja ductilidad, con una respuesta dominada por la disipación plástica de energía. La integración del área bajo la curva esfuerzo–deformación evidencia que la mayor parte de la energía absorbida por el material se disipa en la región plástica, mientras que la contribución elástica resulta mínima. El balance energético establecido considera que la energía transferida durante el impacto debe ser al menos igual a la suma de la energía cinética del meteorito y de la energía de fractura requerida para su desintegración.

Asimismo, las simulaciones permiten identificar mecanismos de falla dominantes, incluyendo fractura por corte radial, colapso hidrostático

https://doi.org/10.57819/qhaf-kg48

en la región central y gradientes de tracción–compresión a lo largo del eje del impacto, consistentes con los patrones de distribución de esfuerzos obtenidos mediante el análisis de elementos finitos.

Palabras claves

Mecánica de sólidos; Impacto; Análisis por elementos finitos; Fractura; Distribución de esfuerzos; One Punch Man

Abstract

The destruction of a meteorite by a single punch, as depicted in the *One Punch Man* series, presents a fictional yet extreme scenario that enables the analysis of the mechanical behavior of a rocky body subjected to a highly concentrated, high-intensity impact. In this study, the mechanical response of a meteorite is evaluated through Finite Element Analysis (FEA), combining both static and dynamic simulations.

The body was modeled as a large-scale ellipsoid with hypothetical mechanical properties defined from theoretical estimations, aiming to characterize the distribution of stresses, strains, and impact-induced energy throughout the structure.

The results indicate that the maximum Von Mises equivalent stress is not located at the direct impact point but rather within a lateral radial region of the body, where significant shear stresses concentrate and promote the initiation of fracture.

The stress–strain response obtained from the dynamic simulation exhibits high strength and low ductility, with behavior dominated by plastic energy dissipation. Integration of the area under the stress–strain curve reveals that most of the absorbed energy is dissipated within the plastic region, whereas the elastic contribution remains minimal.

The established energy balance considers that the energy transferred during impact must be at least equal to the sum of the meteorite's kinetic energy and the fracture energy required for its complete disintegration.

https://doi.org/10.57819/qhaf-kg48

Furthermore, the simulations identify dominant failure mechanisms, including radial shear fracture, hydrostatic collapse in the central region, and tension–compression gradients along the impact axis, all of which are consistent with the stress distribution patterns obtained through finite element analysis.

Keywords

Solid Mechanics; Impact; Finite Element Analysis; Fracture; Stress Distribution; One Punch Man

Introducción

La destrucción de un meteorito mediante un solo golpe, tal como se representa en el episodio 7 de la serie One Punch Man, constituye un escenario extremo que, aunque ficticio, resulta adecuado para analizar principios fundamentales de la Mecánica de Sólidos en condiciones límite. La exageración inherente a este tipo de narrativas permite magnificar fenómenos físicos relevantes, como la concentración de esfuerzos, la propagación de deformaciones y la iniciación de fracturas, lo que proporciona un marco conceptual útil para estudiar la respuesta mecánica de materiales sometidos a impactos altamente intensos (Beer, Johnston, DeWolf y Mazurek, 2015).

Desde una perspectiva técnica, el impacto puede interpretarse como la aplicación de una carga altamente concentrada sobre un cuerpo rocoso en movimiento. Este enfoque permite analizar la generación de esfuerzos normales y cortantes, su distribución espacial dentro del material y su relación con los mecanismos de falla.

La teoría clásica del comportamiento mecánico de los materiales establece que, bajo condiciones de carga extrema, la interacción entre compresión, tracción y corte determina la localización de zonas críticas donde se inicia la fractura, particularmente en materiales de baja ductilidad (Dowling, 2012).

El estudio de impactos de alta energía ha sido ampliamente abordado en el contexto de la mecánica del impacto y la dinámica de materiales. Investigaciones en este campo muestran que, ante cargas concentradas, los máximos esfuerzos equivalentes no necesariamente coinciden con el punto de aplicación de la fuerza, sino que pueden desplazarse hacia regiones laterales donde se desarrollan estados complejos de esfuerzo triaxial (Johnson, 1985). Este comportamiento

https://doi.org/10.57819/qhaf-kg48

resulta especialmente relevante en cuerpos de gran escala, donde la geometría y las condiciones de frontera influyen de manera decisiva en la distribución de tensiones.

Por otra parte, el interés científico por el comportamiento mecánico de cuerpos de origen extraterrestre ha puesto de manifiesto la dificultad de caracterizar sus propiedades estructurales reales. Estudios sobre asteroides metálicos y rocosos destacan la heterogeneidad material y la incertidumbre asociada a parámetros como la densidad, la resistencia y la tenacidad, lo que obliga a recurrir con frecuencia a modelos idealizados para analizar su respuesta ante cargas extremas (Marín, 2020). En este sentido, el uso de supuestos mecánicos coherentes permite explorar tendencias generales del comportamiento estructural, aun cuando no se pretenda describir un objeto real específico.

La modelación computacional mediante el método de los elementos finitos constituye una herramienta ampliamente aceptada para el análisis de problemas de impacto y fractura, al permitir la evaluación detallada de campos de esfuerzo y deformación bajo condiciones de carga complejas.

En particular, los análisis estructurales estáticos y dinámicos facilitan la identificación de regiones críticas, el estudio de la evolución de la respuesta mecánica del material y la estimación de la energía absorbida durante los procesos de deformación y fractura (Zienkiewicz, Taylor y Zhu, 2013).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento mecánico de un meteorito sometido a un impacto concentrado extremo mediante herramientas de la Mecánica de Sólidos y simulaciones por elementos finitos.

A partir de un modelo geométrico idealizado y propiedades mecánicas hipotéticas, se busca caracterizar la distribución de esfuerzos inducidos, identificar las zonas críticas de iniciación de la fractura y analizar el balance energético asociado al proceso de desintegración del cuerpo, manteniendo coherencia con los principios fundamentales de la teoría del comportamiento mecánico de materiales sometidos a cargas severas.

Metodología

3.1 Modelo de distribución energética

Para estimar la magnitud del impacto ejercido sobre el meteorito, se planteó un modelo de balance energético que considera las principales formas de energía involucradas durante el evento. Bajo este enfoque, la energía transferida durante el impacto debe ser, como mínimo, igual a la suma de la energía cinética asociada al movimiento del meteorito y la energía requerida para inducir su fractura estructural. Esta condición puede expresarse como:

$$E_{\text{impacto}} \geq E_{\text{cinética}} + E_{\text{fractura}}$$

La energía cinética del meteorito se calculó a partir de su masa y velocidad previa al impacto, mientras que la energía de fractura fue estimada posteriormente a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones dinámicas. Otras contribuciones energéticas, como la energía térmica o la asociada a la generación de ondas de choque, no fueron consideradas en este análisis, ya que no constituyen el foco del presente estudio.

3.2 Geometría del meteorito y propiedades mecánicas

El meteorito fue modelado como un sólido elipsoidal definido por la ecuación:

$$\frac{x^2}{250^2} + \frac{y^2}{205^2} + \frac{z^2}{205^2} = 1$$

La geometría idealizada fue construida utilizando la plataforma Onshape y posteriormente exportada al entorno de simulación SimScale. Con el fin de facilitar la aplicación de las condiciones de frontera necesarias para el análisis estructural, el modelo fue dividido mediante un corte transversal, permitiendo la asignación de restricciones y cargas en regiones opuestas del cuerpo.

Se asignó al material una densidad constante correspondiente a un sólido hipotético de alta densidad, junto con propiedades mecánicas tales como el módulo de Young, el límite elástico y el esfuerzo último, estimadas a partir de relaciones teóricas y modelos de regresión. Otras

https://doi.org/10.57819/qhaf-kg48

propiedades, como el coeficiente de Poisson y la deformación última, fueron seleccionadas de forma empírica con el objetivo de facilitar la visualización y el análisis de la respuesta mecánica del material bajo cargas extremas.

3.3 Estimación de la fuerza de impacto, FEA y Deformación

La fuerza aplicada en la simulación estructural se estimó a partir de la ecuación de momento impulso, considerando una reducción abrupta de la velocidad del meteorito durante un intervalo de tiempo característico del impacto. La expresión utilizada fue:

$$F_{\text{impacto}} = \frac{m \ | \Delta v \ |}{\Delta t}$$

donde m representa la masa del meteorito, $|\Delta v|$ la variación de velocidad asociada al impacto y Δt el intervalo de tiempo durante el cual ocurre la transferencia de momento. El valor de esta fuerza fue aplicado en el modelo como una condición de carga tipo Remote Force.

Las simulaciones estructurales se realizaron en el entorno SimScale empleando el método de los elementos finitos para evaluar la respuesta mecánica del meteorito bajo condiciones de impacto concentrado. Se desarrollaron dos tipos de análisis complementarios, un análisis estático y un análisis dinámico, con el fin de caracterizar tanto la distribución espacial de esfuerzos como la evolución temporal de la respuesta del material.

En el análisis estático, el comportamiento del material se modeló como elástico lineal e isotrópico. Se aplicó una condición de carga tipo Remote Force en uno de los extremos del elipsoide, representando la fuerza de impacto estimada, mientras que el extremo opuesto fue restringido mediante una condición de soporte fijo, necesaria para garantizar la estabilidad numérica del modelo. Este análisis permitió evaluar la distribución de los esfuerzos normales y cortantes, así como identificar regiones de concentración de esfuerzos equivalentes de Von Mises.

Para caracterizar el comportamiento del material bajo carga progresiva, se desarrolló un análisis dinámico no lineal. En este caso, el material se modeló mediante un comportamiento elasto plástico bilineal con endurecimiento por deformación. La carga se aplicó de forma

incremental mediante una condición Remote Force dependiente del tiempo, manteniéndose la condición de soporte fijo en el extremo opuesto del modelo.

Durante la simulación dinámica se definieron puntos de monitoreo específicos en la geometría del meteorito para registrar la evolución temporal del esfuerzo equivalente de Von Mises y de la deformación total no lineal. Estos datos permitieron construir la curva esfuerzo deformación del material y analizar las distintas etapas de su respuesta mecánica.

3.4 Deformación equivalente de Von Mises

Con el objetivo de representar el estado de deformación multiaxial mediante un único parámetro escalar, se empleó la deformación equivalente de Von Mises. Esta magnitud se calculó a partir de las componentes del tensor de deformación obtenidas en la simulación dinámica, según la expresión:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{xz}^2)}$$

donde ε_xx, ε_yyy ε_zz representan las componentes normales de la deformación, mientras que ε_xy, ε_yzy ε_xz corresponden a las componentes cortantes del tensor de deformación.

La deformación equivalente obtenida fue utilizada para construir la curva esfuerzo deformación del material, sirviendo como base para el análisis energético y la estimación de la energía de fractura. La energía de fractura se estimó a partir del área bajo la curva esfuerzo deformación, correspondiente a la tenacidad volumétrica del material. Para ello, se realizó la integración numérica de la curva utilizando el método del trapecio. La energía de fractura total se obtuvo multiplicando la energía volumétrica calculada por el volumen estimado de los fragmentos generados tras la ruptura.

Resultados

1. Gráfica Estrés vs Deformación (Simulación Dinámica)

La respuesta mecánica del material bajo carga dinámica se caracterizó mediante la curva esfuerzo–deformación obtenida a partir de la simulación dinámica por elementos finitos. La Figura 1 muestra la relación entre el esfuerzo equivalente de Von Mises y la deformación equivalente, permitiendo identificar de forma clara las etapas elástica y plástica del comportamiento del material, así como el punto asociado a la fractura.

En la región inicial de la curva se observa un comportamiento aproximadamente lineal entre esfuerzo y deformación, correspondiente al régimen elástico. En esta etapa, el material responde de manera reversible a la carga aplicada, recuperando su configuración original al cesar el esfuerzo. El límite elástico se identifica en un valor de esfuerzo cercano a $\sigma = 4.43$ GPa, a partir del cual la pendiente de la curva disminuye y se inicia la deformación irreversible.

Una vez superado el límite elástico, el material entra en un régimen plástico dominante, caracterizado por un incremento progresivo del esfuerzo acompañado de deformaciones irreversibles. En esta región, el esfuerzo continúa aumentando hasta alcanzar el punto de fractura, registrado en $\sigma = 29.9$ GPa y una deformación equivalente $\varepsilon = 0.2$. Este comportamiento indica un material de alta resistencia mecánica, pero con una ductilidad limitada, ya que la deformación previa a la fractura es relativamente pequeña.

El análisis energético asociado a la curva esfuerzo–deformación muestra que la energía elástica alcanza un valor de 0.002689 GPa, mientras que la energía plástica acumulada asciende a 3.078068 GPa, a lo que se suma una contribución adicional hasta el punto de fractura de 0.119315 GPa. En conjunto, la energía plástica total alcanza un valor de 3.197384 GPa.

La distribución porcentual de estas energías evidencia que únicamente el 0.08 % de la energía total corresponde a energía elástica recuperable, mientras que el 99.92 % restante se disipa en forma de energía plástica. Este resultado indica que la respuesta del material está prácticamente dominada por la disipación irreversible de energía, lo que explica la ruptura abrupta observada una vez alcanzado el umbral crítico de deformación.

La energía de fractura estimada para el cuerpo analizado es del orden de 4.22×10^{15} J, obtenida a partir de la tenacidad volumétrica asociada a la curva esfuerzo–deformación y del volumen total considerado para la fractura. Este orden de magnitud permite dimensionar la severidad del evento requerido para producir la desintegración completa del meteorito y evidencia que el escenario representado en One Punch Man implica niveles de transferencia energética extremadamente elevados, muy por encima de los asociados a procesos mecánicos convencionales.

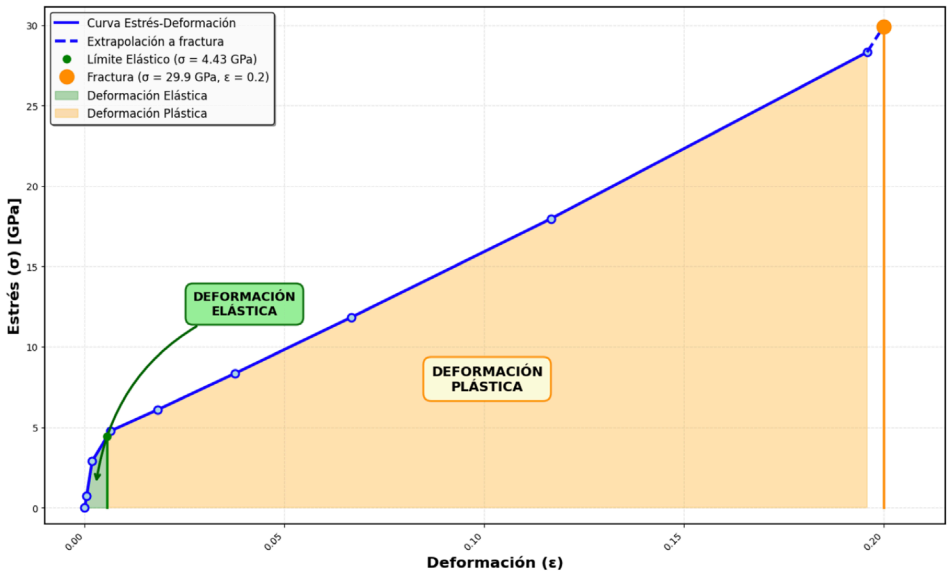


Figura 1. Curva esfuerzo–deformación del material bajo carga dinámica. Se distinguen claramente las regiones elástica y plástica del comportamiento mecánico, separadas por el límite elástico, identificado en $\sigma = 4.43$ GPa, y el punto de fractura, localizado en $\sigma = 29.9$ GPa y una deformación equivalente $\varepsilon = 0.2$. La extrapolación de la curva hasta la fractura permite estimar la tenacidad del material mediante integración numérica. Esta gráfica constituye la base para el análisis de la energía elástica almacenada, la energía plástica disipada y los mecanismos de ruptura asociados al impacto extremo.

2. Simulación del Impacto (Simulación Estática)

La simulación estática del impacto permitió cuantificar el estado de esfuerzos y desplazamientos inducidos en distintas regiones representativas del meteorito. Para este análisis se evaluaron cuatro puntos estratégicos del modelo: el punto de impacto directo, un punto radial lateral, el centro geométrico del cuerpo y el punto opuesto al impacto. Los valores correspondientes a las componentes del tensor de

esfuerzos, el esfuerzo equivalente de Von Mises y los desplazamientos obtenidos se presentan de forma resumida en la Tabla 1. El máximo esfuerzo equivalente de Von Mises no se localiza en el punto de impacto directo, sino en el punto radial lateral, donde alcanza un valor de $\sigma_v = 7.89 \times 10^{23}$ Pa. Este valor supera ampliamente el registrado en el punto de impacto, que presenta un esfuerzo equivalente de 2.95×10^{23} Pa, lo que evidencia que la redistribución interna de tensiones genera regiones más críticas alejadas del sitio donde se aplica la carga.

Componentes del tensor de esfuerzos

Ubicación	σxx (Pa)	σyy (Pa)	σzz (Pa)	τxy (Pa)	τxz (Pa)
Impacto	-1.99×10^{23}	$+9.26 \times 10^{22}$	$+9.02 \times 10^{22}$	-9.44×10^{21}	$+2.11 \times 10^{21}$
Radial	-6.44×10^{23}	-2.35×10^{23}	-1.69×10^{23}	$+8.06 \times 10^{22}$	$+3.16 \times 10^{23}$
Centro	-2.36×10^{23}	-1.25×10^{23}	-1.25×10^{23}	-5.81×10^{20}	-5.12×10^{20}
Opuesto	-1.29×10^{23}	-5.46×10^{22}	-5.45×10^{22}	$+1.08 \times 10^{21}$	-7.33×10^{20}

Esfuerzo equivalente de Von Mises y desplazamientos

Ubicación	τyz (Pa)	Von Mises (Pa)	Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)	|Δ Total| (m)
Impacto	$+1.12 \times 10^{22}$	2.95×10^{23}	−51.3	−4.5	−7.1	51.9
Radial	$+2.08 \times 10^{22}$	7.89×10^{23}	−0.41	+0.014	+0.092	0.42
Centro	-1.06×10^{21}	1.12×10^{23}	−18.3	−0.032	−0.10	18.3
Opuesto	$+5.31 \times 10^{19}$	7.45×10^{22}	0.0	0.0	0.0	0.0

En el punto de impacto directo, el estado de esfuerzos está caracterizado por una combinación de compresión y tracción. La componente σ_{xx} alcanza un valor de -1.99×10^{23} Pa, mientras que las componentes σ_{yy} y σ_{zz} presentan valores positivos del orden de 9.26×10^{22} Pa y 9.02×10^{22} Pa, respectivamente. Este estado multiaxial se acompaña de esfuerzos cortantes significativos, particularmente $\tau_{xy} = -9.44 \times 10^{21}$ Pa. La distribución espacial de estos esfuerzos en la región de impacto puede observarse en la Figura 2, donde se aprecia una concentración localizada de tensiones en torno a la zona de contacto.

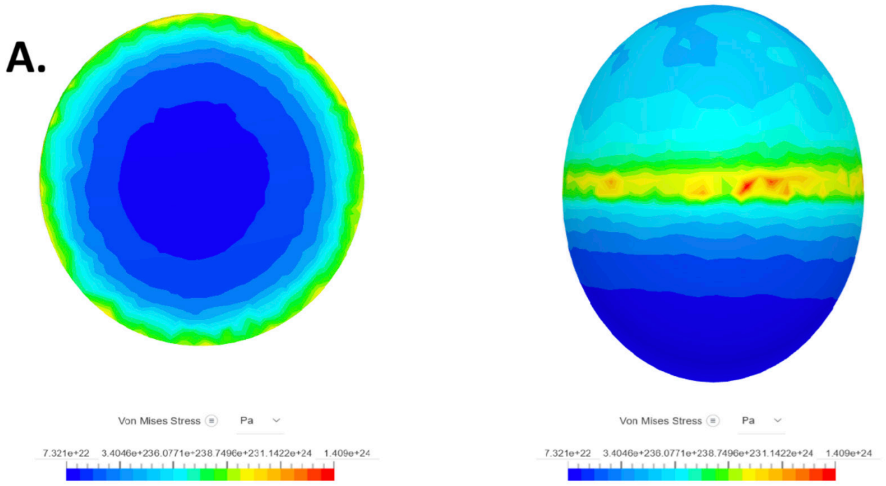
El punto radial lateral exhibe el estado de esfuerzos más severo del modelo. Tal como se resume en la Tabla 1, las componentes normales σ_{xx}, σ_{yy} y σ_{zz} alcanzan valores de -6.44×10^{23} Pa, -2.35×10^{23} Pa y −1.69

https://doi.org/10.57819/qhaf-kg48

× 10^{23} Pa, respectivamente, configurando un régimen de compresión triaxial extrema. Los esfuerzos cortantes asociados a este punto son también elevados, destacando $\tau xz = 3.16 \times 10^{23}$ Pa. Este comportamiento explica el valor máximo del esfuerzo equivalente de Von Mises en esta región y se visualiza con claridad en la Figura 2, donde se observa una amplificación pronunciada de las tensiones en la zona radial lateral.

En el centro geométrico del meteorito, los esfuerzos presentan una distribución más homogénea. El esfuerzo equivalente de Von Mises alcanza en este punto un valor de 1.12 × 10^{23} Pa. A pesar de no concentrar los máximos esfuerzos, el centro del cuerpo experimenta un desplazamiento significativo en la dirección X, cercano a 18.3 m, lo que se refleja en el campo de desplazamientos mostrado en la Figura 2 (Panel B) y sugiere un colapso estructural interno relevante.

El punto opuesto al impacto presenta los valores más bajos de esfuerzo equivalente, con $\sigma_v = 7.45 \times 10^{22}$ Pa, y un desplazamiento total nulo. Este comportamiento está directamente asociado a la condición de frontera tipo soporte fijo impuesta en esta región, lo cual se evidencia claramente en el Panel B (derecha) de la figura 2. Donde se evidencia la ausencia de desplazamiento y la atenuación del campo de esfuerzos.



https://doi.org/10.57819/qhaf-kg48

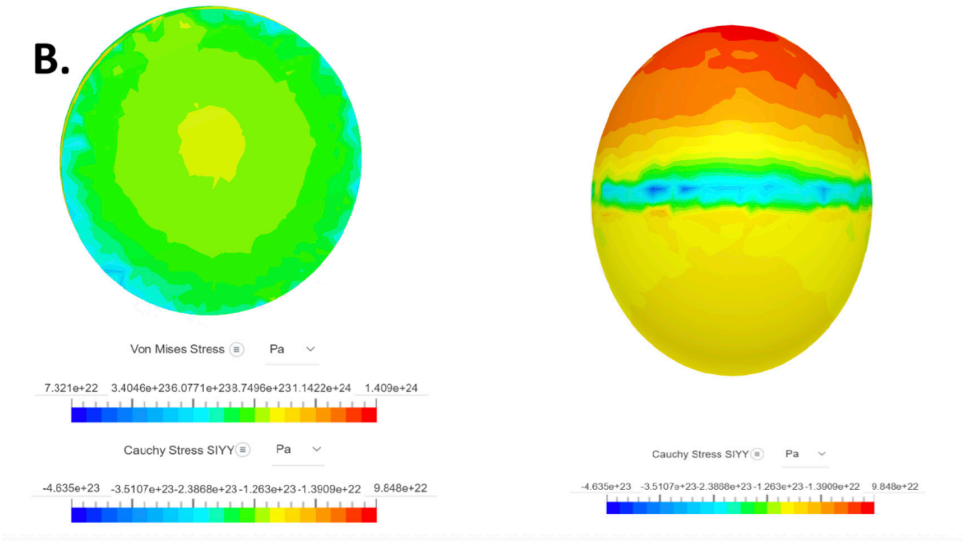


Figura 2. Panel A. Mapas de esfuerzos obtenidos mediante simulación estática por elementos finitos del meteorito. En el panel se muestra la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en vistas transversal y longitudinal, respectivamente. Panel B muestra la distribución de la componente normal del tensor de Cauchy σYY en vistas transversal y longitudinal. La escala de colores indica la magnitud del esfuerzo en pascales, desde valores bajos (azul) hasta valores máximos (rojo).

Discusión

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones estática y dinámica permiten interpretar el mecanismo de ruptura del meteorito bajo un impacto extremo desde una perspectiva mecánica coherente. En particular, la curva esfuerzo–deformación muestra una respuesta dominada casi en su totalidad por la deformación plástica, con una contribución elástica prácticamente despreciable. Este comportamiento indica que el material alcanza rápidamente un estado irreversible de daño una vez superado el límite elástico, lo que conduce a una fractura abrupta sin una fase prolongada de deformación estable.

La simulación estática revela que los máximos esfuerzos equivalentes de Von Mises no se concentran en el punto de impacto directo, sino en regiones laterales del cuerpo. Este patrón pone de manifiesto que la falla estructural no está controlada únicamente por la magnitud local de la carga aplicada, sino por la redistribución interna de tensiones

inducida por la geometría del meteorito y las condiciones de frontera. Las regiones laterales, sometidas a estados complejos de compresión triaxial y cizallamiento intenso, emergen como zonas críticas para la iniciación de la fractura. Asimismo, los desplazamientos significativos observados en el centro geométrico, aun en ausencia de esfuerzos máximos, sugieren una respuesta global del cuerpo ante el impacto. Este resultado refuerza la idea de que la ruptura del meteorito debe entenderse como un colapso estructural volumétrico y no como un fenómeno localizado en la superficie de contacto.

La magnitud de la energía de fractura estimada sitúa el evento analizado en un régimen extremo, muy por encima de los escenarios asociados a impactos mecánicos convencionales. En el contexto de One Punch Man, estos resultados respaldan la representación de una destrucción casi instantánea del meteorito, al evidenciar que el impacto no solo supera la resistencia del material, sino que lo hace con un margen energético suficiente para inducir una falla global en un intervalo de tiempo muy reducido.

El presente análisis se basa en la idealización de la geometría del meteorito como un elipsoide homogéneo y en la asignación de propiedades mecánicas hipotéticas, las cuales no cuentan con validación experimental directa. Asimismo, la imposición de una condición de soporte fijo, necesaria para la estabilidad numérica del modelo, no representa de forma estricta el estado de caída libre del cuerpo durante un impacto real. Adicionalmente, las simulaciones realizadas no incorporan modelos explícitos de fractura dinámica ni procesos de fragmentación progresiva, por lo que los mecanismos de falla identificados deben interpretarse principalmente desde un punto de vista cualitativo y comparativo.

Conclusión

Los resultados obtenidos indican que la respuesta mecánica del meteorito ante un impacto extremo está dominada por una redistribución interna de tensiones que conduce a un colapso estructural global, y no por un daño localizado en el punto de impacto. La concentración de los máximos esfuerzos en regiones laterales y los desplazamientos significativos en el interior del cuerpo confirman que la falla debe entenderse como un proceso volumétrico inducido por estados complejos de esfuerzo bajo condiciones de carga severa.

Desde una perspectiva conceptual, el estudio demuestra que un

https://doi.org/10.57819/qhaf-kg48

escenario ficticio como el presentado en One Punch Man puede ser analizado de manera consistente mediante herramientas de la mecánica de sólidos y simulación por elementos finitos. Este enfoque permite vincular narrativas de ficción con marcos físicos formales, aportando una interpretación rigurosa de los mecanismos de impacto y ruptura, y estableciendo una base para futuros estudios que incorporen modelos de fractura dinámica y simulaciones plenamente transitorias.

Contribución del autor

G.R. y G.V.: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Data curation, Visualization, Writing-original draft, Writing-review & editing.

Referencias

Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., y Mazurek, D. F. (2015). Mechanics of materials (7th ed.). McGraw Hill Education.

Dowling, N. E. (2012). Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue (4th ed.). Pearson.

Johnson, W. (1985). Impact strength of materials. Edward Arnold.

Marín, D. (2020, 5 de marzo). El asteroide metálico Psyche o por qué la minería de asteroides no es tan sencilla. Eureka.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., y Zhu, J. Z. (2013). The finite element method: Its basis and fundamentals (7th ed.). Elsevier.

https://doi.org/10.57819/qhaf-kg48

VITAScientiis

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

Estudio estructural del comportamiento de la katana de Tanjiro: Fuerza, fragilidad y funcionalidad

Andrés Manuel Ayala Pinzón
Orcid: 0009-0004-8034-8038
Correo: andres.ayala.1122@udelas.ac.pa

Carol Patricia Mendoza Smith
Orcid: 0009-0008-8806-1567
Correo: carol.mendoza.2157@udelas.ac.pa
Universidad Especializada de las Américas (UDELAS), Facultad de Biociencias y Salud Pública, Panamá, República de Panamá.

Resumen

Este trabajo analiza el comportamiento estructural de una katana de ficción mediante simulaciones asistidas por inteligencia artificial y análisis de elementos finitos (FEA), con el fin de evaluar la plausibilidad física de tres escenarios extremos representados en la serie Kimetsu no Yaiba: el corte de un material pétreo, la combustión sostenida de la hoja y su fractura limpia mediante un filamento. Se desarrolló un modelo tridimensional de la espada, considerando una hoja de acero AISI 5160 y un mango de madera de roble, y se aplicaron cargas dinámicas, térmicas y criterios de mecánica de fractura.

Los resultados indican que los niveles de esfuerzo y deformación generados durante los impactos superan ampliamente los límites elásticos y de resistencia del material, produciendo falla estructural inmediata.

Asimismo, se determinó que la exposición prolongada a altas temperaturas compromete la integridad mecánica de la hoja y que la presión requerida para seccionarla mediante un filamento excede las capacidades de materiales y sistemas reales. En conjunto, el análisis confirma la inviabilidad física de las hazañas representadas y demuestra el valor del FEA como herramienta para evaluar límites estructurales en sistemas mecánicos, incluso en contextos de ficción.

Palabras claves

Análisis de elementos finitos; mecánica de sólidos; comportamiento estructural; katana; falla mecánica; simulación numérica.

https://doi.org/10.57819/sgag-7r74

Abstract

This study analyzes the structural behavior of a fictional katana through artificial intelligence-assisted simulations and Finite Element Analysis (FEA), with the objective of evaluating the physical plausibility of three extreme scenarios depicted in the *Kimetsu no Yaiba* series: cutting through a stone-like material, sustaining blade combustion, and undergoing a clean fracture caused by a filament.

A three-dimensional model of the sword was developed, considering an AISI 5160 steel blade and an oak wood handle, while dynamic and thermal loads, as well as fracture mechanics criteria, were applied.

The results indicate that the stress and strain levels generated during the impact events significantly exceed the elastic and ultimate strength limits of the material, resulting in immediate structural failure.

Furthermore, prolonged exposure to elevated temperatures was found to compromise the mechanical integrity of the blade, while the pressure required to sever it using a filament surpasses the capabilities of existing materials and real-world systems.

Overall, the analysis confirms the physical infeasibility of the feats represented in the series and demonstrates the value of Finite Element Analysis as a powerful tool for assessing structural limits in mechanical systems, even within fictional contexts.

Keywords

Finite Element Analysis; Solid Mechanics; Structural Behavior; Katana; Mechanical Failure; Numerical Simulation.

Introducción

Japón posee una historia extensa y profundamente ligada al desarrollo de técnicas artesanales y metalúrgicas, entre las cuales destaca la fabricación de la espada japonesa conocida como katana. A lo largo de los siglos, este arma ha sido reconocida por su combinación de dureza, resistencia y flexibilidad, resultado de procesos tradicionales de forja y tratamiento térmico como el método tatara, así como de un conocimiento empírico transmitido entre generaciones de herreros (Inoue, 2010; Notis, 2000). Estas características han convertido a la katana no solo en un arma funcional, sino también en un símbolo cultural de gran relevancia histórica, cuyo comportamiento estructural ha sido estudiado desde distintas perspectivas metalúrgicas y mecánicas (Salvemini et al., 2017; Yaso, 2013).

En la actualidad, la katana ha trascendido su contexto histórico y aparece de manera recurrente en productos de entretenimiento como películas, videojuegos y series animadas. Un ejemplo representativo es el anime Kimetsu no Yaiba, donde las katanas son utilizadas para realizar hazañas físicas extremas, tales como cortar materiales pétreos, mantenerse en combustión durante el combate o incluso ser seccionadas limpiamente por filamentos delgados. Estas representaciones, aunque atractivas desde el punto de vista narrativo, generan interrogantes sobre su viabilidad desde una perspectiva científica e ingenieril.

Desde el enfoque de la mecánica de sólidos, el análisis de estas escenas permite cuestionar hasta qué punto dichas acciones pueden ser compatibles con las propiedades reales de los materiales empleados en la fabricación de una katana. Conceptos como energía cinética, esfuerzos por flexión, deformaciones térmicas y propagación de grietas resultan fundamentales para evaluar el comportamiento estructural de la hoja bajo condiciones de carga extremas (Soto-Pedraza, 2020; MechaniCalc, s. f.; NASA, 2023).

El análisis de elementos finitos (FEA) se ha consolidado como una herramienta numérica ampliamente utilizada para estudiar la respuesta mecánica de sistemas estructurales complejos, ya que permite estimar distribuciones de esfuerzo y deformación sin recurrir a ensayos experimentales destructivos (Fadiji et al., 2018). Su aplicación ha demostrado ser adecuada para el análisis de componentes metálicos sometidos a impactos, así como para la simulación de procesos asociados a espadas japonesas y otros elementos estructurales

https://doi.org/10.57819/sgag-7r74

similares (KD VO, s. f.; COMSOL, s. f.).

En este contexto, el presente trabajo emplea simulaciones mediante análisis por elementos finitos para estudiar el comportamiento estructural de la katana empuñada por el personaje Tanjiro Kamado en Kimetsu no Yaiba. La espada se modela utilizando acero AISI 5160, material comúnmente empleado en katanas modernas debido a su elevada resistencia mecánica y buena capacidad de absorción de impactos (AZoM, 2013; Yaso, 2013). El análisis se centra en el impacto de la katana contra un material pétreo, con el objetivo de evaluar en qué medida las hazañas representadas son compatibles con las propiedades mecánicas reales del material y de establecer los límites físicos que gobiernan el desempeño estructural de una katana desde una perspectiva científica.

Metodología

El presente trabajo se desarrolló mediante un enfoque teórico y computacional, con el objetivo de analizar el comportamiento estructural de una katana bajo distintos escenarios de carga representados en la serie Kimetsu no Yaiba. Para ello, se emplearon modelos analíticos básicos de la mecánica de sólidos junto con simulaciones asistidas por inteligencia artificial y análisis de elementos finitos (FEA).

La katana fue modelada en tres dimensiones utilizando el software Fusion 360 bajo licencia educativa. Con el fin de simplificar el análisis y facilitar la aplicación de ecuaciones clásicas, la geometría de la hoja se representó como un sólido prismático rectangular, mientras que el mango se modeló como un cilindro sólido. Las dimensiones empleadas corresponden a valores promedio de katanas funcionales: una longitud de hoja de 72 cm, un ancho de 3.5 cm y un espesor de 0.7 cm. El mango se representó con una longitud de 30 cm y un radio de 2.5 cm.

Para la hoja se asumió acero AISI 5160, material comúnmente utilizado en la fabricación de katanas modernas debido a su buena combinación de resistencia, tenacidad y capacidad de absorción de impactos.

Se consideró una densidad de 7.8 g/cm^3 y propiedades mecánicas promedio reportadas en fuentes técnicas. El mango fue modelado como madera de roble, con una densidad aproximada de 750 kg/m^3. Estas propiedades fueron utilizadas tanto en los cálculos analíticos

como en las simulaciones por FEA, con el fin de mantener coherencia entre ambos enfoques.

Las simulaciones por FEA se realizaron en Fusion 360, aplicando condiciones de carga equivalentes a las obtenidas mediante los cálculos analíticos.

Se evaluaron distribuciones de esfuerzos de Von Mises, desplazamientos y concentraciones de tensión en la hoja bajo diferentes escenarios. El mallado y las condiciones de frontera fueron simplificados con el objetivo de obtener una aproximación razonable del comportamiento estructural sin incrementar excesivamente la complejidad computacional.

Para el análisis del impacto de la katana contra un material pétreo, se calculó inicialmente la energía cinética de la espada mediante la expresión:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

donde m corresponde a la masa total de la katana y v_a la velocidad del impacto. Posteriormente, se estimó la fuerza promedio ejercida durante el impacto utilizando la relación:

$$F_{avg} = \frac{E_k}{d}$$

donde d representa la distancia de desaceleración durante el contacto. Con la fuerza obtenida, se calculó el momento flector generado en la hoja mediante:

$$M = F \cdot L$$

siendo L la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta la empuñadura. Finalmente, el esfuerzo por flexión se estimó usando:

$$\sigma = \frac{M}{S}$$

https://doi.org/10.57819/sgag-7r74

donde S es el módulo de sección de la hoja. Estos resultados fueron comparados con los límites mecánicos del acero para evaluar la posibilidad de deformación plástica o falla estructural.

Resultados

Escena 1: Impacto de la katana contra un material pétreo

A partir de las dimensiones geométricas consideradas para la hoja y el mango, junto con las densidades de los materiales asumidos, se obtuvo una masa total de la katana de 1.811 kg, valor que se empleó para el análisis dinámico del impacto contra un material pétreo.

En la Tabla 1 se presentan las dimensiones y propiedades de la hoja de la katana, se resume las características geométricas y físicas del mango y se muestran los valores de energía cinética calculados para diferentes velocidades de impacto.

Al considerar distancias de frenado reducidas, coherentes con el contacto contra un material rígido, se obtuvieron fuerzas promedio de impacto del orden de los mega newtons.

Componente	Geometría asumida	Dimensiones	Material	Densidad	V (m/s)	Energía cinética (J)	Fuerza promedio (N) d = 0.002 m	Fuerza promedio (N) d = 0.005 m	Fuerza promedio (N) d = 0.02 m
Hoja de la espada	Prisma rectangular	L = 72 cm An = 3.5 cm G = 0.7 cm	Acero AISI 5160	7.8 g/cm³	30	815	407 500	163 000	40 750
Hoja de la espada	Prisma rectangular	L = 72 cm An = 3.5 cm G = 0.7 cm	Acero AISI 5160	7.8 g/cm³	50	2 264	1 132 000	452 800	113 200
Hoja de la espada	Prisma rectangular	L = 72 cm An = 3.5 cm G = 0.7 cm	Acero AISI 5160	7.8 g/cm³	150	20 374	10 187 000	4 074 800	1 018 700
Mango de la espada	Cilindro sólido	H = 30 cm R = 2.5 cm	Madera de roble	750 kg/m³					

Estos valores reflejan la magnitud extrema de las fuerzas involucradas en la escena analizada y permiten dimensionar el efecto que dichas cargas tienen sobre la hoja de la katana.

Los resultados obtenidos mediante el FEA se presentan en las Figuras 1, 2 y 3, correspondientes a diferentes velocidades de impacto.

En la Figura 1 se observa que, para una velocidad de 30 m/s, las tensiones de Von Mises se concentran principalmente en la zona de contacto con el material pétreo, alcanzando valores del orden de cientos de MPa. Aunque elevados, estos valores se mantienen dentro de un rango cercano al inicio de la deformación plástica.

Al incrementar la velocidad a 50 m/s, la Figura 2 muestra un aumento drástico de las tensiones máximas, alcanzando valores extremadamente elevados y no compatibles con el comportamiento mecánico real del material. Estas concentraciones de esfuerzo indican que la hoja se encuentra sometida a un régimen de carga que excede ampliamente sus capacidades estructurales.

Finalmente, para una velocidad de 150 m/s, la Figura 3 evidencia una penetración total de la katana en el material pétreo, acompañada de tensiones del orden de decenas de GPa. Aunque inferiores a las obtenidas en el caso anterior, estos valores siguen siendo muy superiores a los límites mecánicos del acero, confirmando la inviabilidad estructural de la escena representada.

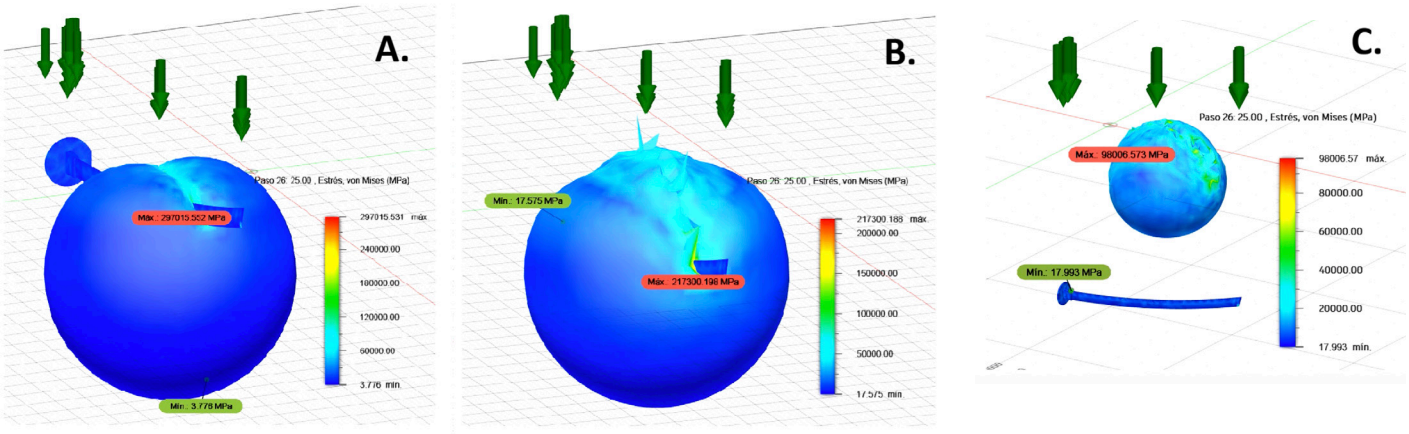


Figura 1. Distribución de esfuerzos de Von Mises durante el impacto de la katana contra un material pétreo.
Resultados del análisis numérico para tres condiciones de velocidad: (A) 30 m/s, (B) 50 m/s y (C) 150 m/s. Las flechas verdes indican la dirección de la carga aplicada. Se observa un incremento significativo de los esfuerzos máximos con el aumento de la velocidad, alcanzando valores que superan ampliamente el límite elástico del material. En los casos de mayor velocidad, las concentraciones de esfuerzo se localizan en la zona de contacto, evidenciando un régimen de carga incompatible con el comportamiento mecánico real de la katana, tal como se representa en la escena analizada de Kimetsu no Yaiba.

Discusión

Los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos muestran que los esfuerzos generados durante el impacto de la katana contra un material pétreo aumentan de manera significativa con la velocidad de impacto. En particular, para las condiciones analizadas, los valores máximos de esfuerzo de Von Mises superan ampliamente el límite elástico del acero AISI 5160, incluso para velocidades moderadas, lo que indica que el régimen de carga impuesto excede las capacidades mecánicas reales del material.

La localización de las máximas concentraciones de esfuerzo en la zona de contacto entre la hoja y el material pétreo es consistente con la naturaleza del impacto y con los supuestos del modelo. Este comportamiento sugiere que, en un escenario físico real, la katana experimentaría deformaciones plásticas severas o incluso falla estructural localizada, en contraste con la representación observada en la escena analizada, donde la hoja permanece íntegra tras el impacto.

Si bien el análisis numérico permite visualizar la distribución de esfuerzos y estimar órdenes de magnitud, es importante reconocer las limitaciones inherentes al modelo empleado. El mallado, las condiciones de contacto idealizadas y la ausencia de fenómenos dinámicos complejos, como la disipación de energía por vibraciones, daño progresivo o efectos de tasa de deformación, pueden conducir a la sobreestimación de los valores máximos de esfuerzo. No obstante, aun considerando estas limitaciones, los resultados obtenidos son suficientemente elevados como para descartar la viabilidad física del escenario representado.

Desde una perspectiva mecánica, los valores de energía cinética y fuerza promedio asociados al impacto se encuentran en un rango incompatible con el comportamiento elástico del acero considerado. Esto refuerza la idea de que las hazañas mostradas en la serie responden a una exageración narrativa propia del medio de ficción, más que a una representación basada en principios físicos realistas.

Como proyección para trabajos futuros, sería de interés ampliar el análisis incorporando modelos dinámicos transitorios que consideren explícitamente efectos de velocidad de impacto, disipación de energía y daño acumulativo del material. Asimismo, la inclusión de modelos constitutivos dependientes de la tasa de deformación y del endurecimiento plástico permitiría refinar la estimación de los

esfuerzos máximos. Finalmente, estudios comparativos utilizando distintos aceros tradicionalmente empleados en espadas, así como validaciones experimentales a escala reducida, podrían aportar una comprensión más profunda del comportamiento estructural de armas blancas bajo condiciones de impacto extremo.

Conclusión

El análisis realizado mediante simulaciones por elementos finitos demuestra que el impacto directo de una katana contra un material pétreo, tal como se representa en la escena analizada de Kimetsu no Yaiba, no es físicamente viable desde una perspectiva mecánica. Los esfuerzos generados durante el impacto superan ampliamente el límite elástico del acero AISI 5160, lo que conduciría inevitablemente a deformación plástica severa o a la falla estructural de la hoja.

Los resultados numéricos muestran que, aun bajo supuestos conservadores y considerando las limitaciones inherentes al modelo empleado, las magnitudes de energía cinética, fuerza promedio y tensiones inducidas se encuentran fuera del rango de comportamiento elástico del material. Esto pone de manifiesto una discrepancia clara entre la representación ficticia de la escena y el desempeño estructural que podría esperarse de una katana real.

En conjunto, el estudio evidencia los límites físicos que gobiernan el comportamiento de armas blancas sometidas a cargas de impacto extremo y resalta el valor del uso de herramientas de ingeniería para analizar críticamente representaciones provenientes de la ficción. Este enfoque permite no solo contrastar narrativa y realidad física, sino también reforzar la comprensión de los principios fundamentales de la mecánica de sólidos aplicados a sistemas reales.

Contribución del autor

A.A. y C.M.: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Data curation, Visualization, Writing-original draft, Writing-review & editing.

Referencias

Audibert, C., Chaves-Jacob, J., Linares, J.-M., & Lopez, Q.-A. (2018). Bio-inspired method based on bone architecture to optimize the structure of mechanical workpieces. Materials & Design, 160, 1200–1216 (Article

https://doi.org/10.57819/sgag-7r74

No. 107, Oct 2018). DOI: 10.1016/j.matdes.2018.10.013.

Au, A. G., Liggins, A. B., Raso, V. J., Carey, J. P., & Amirfazli, A. (2010). Representation of bone heterogeneity in subject-specific finite element models for the knee. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 99(2), 154–171. DOI: 10.1016/j.cmpb.2009.11.009.

Kaku, N., Hosoyama, T., Shibuta, Y., Kimura, M., & Tsumura, H. (2023). Influence of femoral bowing on stress distribution of the proximal femur: A three-dimensional finite element analysis. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 18, 82. DOI: 10.1186/s13018-023-03559-1.

Morgan, E. F., Unnikrisnan, G. U., & Hussein, A. I. (2018). Bone mechanical properties in healthy and diseased states. Annual Review of Biomedical Engineering, 20, 119–143. DOI: 10.1146/annurev-bioeng-062117-121139.

Phombut, C., Rooppakhun, S., & Sindhupakorn, B. (2021). Morphometric measurement of the proximal tibia to design the tibial component of total knee arthroplasty for the Thai population. Journal of Experimental Orthopaedics, 8(1), 118. DOI: 10.1186/s40634-021-00429-9.

Rho, J. Y., Kuhn-Spearing, L., & Zioupos, P. (1998). Mechanical properties and the hierarchical structure of bone. Medical Engineering & Physics, 20(2), 92–102. DOI: 10.1016/S1350-4533(98)00007-1.

Schileo, E., Pitocchi, J., Falcinelli, C., & Taddei, F. (2020). Cortical bone mapping improves finite element strain prediction accuracy at the proximal femur. Bone, 136, 115348. DOI: 10.1016/j.bone.2020.115348.

Sheikh, Z., Najeeb, S., Khurshid, Z., Verma, V., Rashid, H., & Glogauer, M. (2015). Biodegradable materials for bone repair and tissue engineering applications. Materials (Basel), 8(9), 5744–5794. DOI: 10.3390/ma8095273.

VITAScientiis

Análisis biomecánico del fémur y la tibia humana bajo condiciones de carga progresiva inspiradas en las aperturas de las Ocho Puertas de Rock Lee

Ameth González
Orcid: 0009-0001-5546-5927
Correo: ameth.gonzalez.1769@udelas.ac.pa

Camila Hernández
Orcid: 0009-0001-3211-9447
Correo: camila.hernandez.1752@udelas.ac.pa

Universidad Especializada de las Américas (UDELAS), Facultad de Biociencias y Salud Pública, Panamá, República de Panamá

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

Resumen

En este trabajo se realizó un análisis biomecánico del fémur y la tibia humana sometidos a condiciones de carga progresiva mediante el método de elementos finitos.

El estudio se desarrolló utilizando Autodesk Fusion 360 y se inspiró conceptualmente en las “Ocho Puertas Internas” del personaje Rock Lee, interpretadas como incrementos progresivos de activación muscular y carga axial. Se consideró un peso corporal de 47.5 kg, equivalente a una carga fisiológica basal de 466 N, y se evaluaron cuatro escenarios: condición normal (466 N), Puerta 1 (930 N), Puerta 5 (1630 N) y Puerta 8 (2330 N).

Para el fémur, las tensiones máximas de Von Mises oscilaron entre 3.72 MPa y 35.36 MPa, con desplazamientos máximos entre 0.38 mm y 1.59 mm. En el caso de la tibia, las tensiones de Von Mises variaron entre 2.13 MPa y 13.07 MPa, con desplazamientos máximos de hasta 4.09 mm en la carga más elevada.

En todos los escenarios, los valores obtenidos se mantuvieron por debajo de los límites de fractura reportados para el hueso cortical. Sin embargo, se identificaron inconsistencias numéricas en cargas intermedias, atribuibles a simplificaciones geométricas y a condiciones de mallado y frontera del modelo.

Los resultados permiten evaluar la respuesta estructural del fémur y la tibia frente a sobrecargas crecientes, así como reconocer las limitaciones propias del modelado computacional en el análisis biomecánico óseo.

https://doi.org/10.57819/r0r1-8317

Palabras claves

Biomecánica ósea, fémur, tibia, método de elementos finitos, cargas axiales, Rock Lee.

Abstract

This study presents a biomechanical analysis of the human femur and tibia subjected to progressively increasing loading conditions using the Finite Element Method (FEM).

The research was conducted using Autodesk Fusion 360 and was conceptually inspired by the "Eight Inner Gates" of the character Rock Lee, interpreted as progressive increases in muscular activation and axial loading.

A body mass of 47.5 kg was considered, corresponding to a baseline physiological load of 466 N. Four loading scenarios were evaluated: normal condition (466 N), Gate 1 (930 N), Gate 5 (1,630 N), and Gate 8 (2,330 N).

For the femur, maximum Von Mises stresses ranged from 3.72 MPa to 35.36 MPa, while maximum displacements varied between 0.38 mm and 1.59 mm.

In the case of the tibia, Von Mises stresses ranged from 2.13 MPa to 13.07 MPa, with maximum displacements reaching 4.09 mm under the highest loading condition.

Across all scenarios, the obtained values remained below the fracture limits commonly reported for cortical bone.

However, numerical inconsistencies were identified under intermediate loading conditions, which were attributed to geometric simplifications, mesh characteristics, and boundary conditions adopted in the computational model.

The results provide insight into the structural response of the femur and tibia under progressively increasing overload conditions while highlighting the inherent limitations of computational modeling in biomechanical bone analysis.

https://doi.org/10.57819/r0r1-8317

Keywords

Bone Biomechanics; Femur; Tibia; Finite Element Method; Axial Loads; Rock Lee.

Introducción

El fémur es el hueso más largo, resistente y voluminoso del esqueleto humano, y cumple una función esencial en el soporte del peso corporal y la locomoción. Su diseño estructural le permite resistir combinaciones complejas de carga que incluyen compresión axial, flexión, torsión y cizallamiento, especialmente durante actividades dinámicas como correr, saltar o levantar peso.

Desde el punto de vista anatómico, el fémur se divide en tres regiones principales: la epífisis proximal, que incluye la cabeza y el cuello femoral; la diáfisis o cuerpo; y la epífisis distal. Cada una de estas regiones presenta adaptaciones morfológicas específicas que favorecen una distribución eficiente de las fuerzas que actúan sobre las articulaciones de la cadera y la rodilla (Rho et al., 1998).

El tejido óseo del fémur presenta una organización jerárquica compuesta por hueso cortical y hueso trabecular. El hueso cortical constituye una capa externa densa que proporciona alta rigidez y resistencia a la compresión, mientras que el hueso trabecular interno, de estructura porosa, permite la absorción de energía y la redistribución de las cargas mecánicas. Esta combinación confiere al fémur una relación óptima entre resi

stencia mecánica y ligereza estructural, característica ampliamente estudiada en biomecánica e inspiradora de aplicaciones en biomimética y diseño protésico (Rho et al., 1998; Audibert et al., 2018).

En el campo de la ingeniería biomédica, el análisis del comportamiento mecánico del fémur mediante el método de elementos finitos (FEM) se ha consolidado como una herramienta fundamental para evaluar la distribución de tensiones internas, estimar deformaciones y predecir posibles zonas de falla estructural.

Diversos estudios han demostrado la importancia de considerar tanto la heterogeneidad del material óseo como la curvatura anatómica del hueso, ya que estos factores influyen de manera significativa en la respuesta mecánica del fémur ante distintos escenarios de carga (Au et

https://doi.org/10.57819/r0r1-8317

al., 2010; Schileo et al., 2020; Kaku et al., 2023). A través de estos modelos computacionales es posible obtener parámetros biomecánicos como la tensión equivalente de Von Mises, la deformación elástica máxima y los factores de seguridad, los cuales resultan de gran relevancia para el diseño de prótesis, placas, tornillos y otros dispositivos ortopédicos.

Además del fémur, la tibia constituye otro elemento estructural clave del miembro inferior, ya que es el principal hueso portante de la pierna y se encarga de soportar y transmitir las fuerzas de compresión generadas durante la locomoción.

Su función es esencial en la transferencia de carga desde la articulación de la rodilla hacia el tobillo, lo que la convierte en una estructura determinante para comprender el comportamiento mecánico global de la extremidad inferior.

La tibia presenta una configuración anatómica optimizada para soportar elevados esfuerzos axiales, caracterizada por una diáfisis alargada con paredes corticales gruesas y una epífisis proximal amplia que permite distribuir las cargas entre los compartimentos medial y lateral de la rodilla.

Estudios morfométricos tridimensionales basados en tomografía computarizada reportan dimensiones promedio proximales del orden de 72.5 mm en el diámetro mediolateral y 46.3 mm en el diámetro anteroposterior, con una relación de aspecto cercana a 1.57, lo que garantiza una base estable para la transferencia de cargas (Phombut et al., 2021).

Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, el hueso cortical tibial presenta un módulo de Young en el rango de 17 a 20 GPa y una densidad aparente aproximada de 1.8–2.0 g/cm^3, mientras que el hueso trabecular exhibe una resistencia a la compresión del orden de 5–10 MPa y un módulo elástico significativamente menor.

Esta combinación proporciona rigidez axial junto con capacidad de absorción de energía (Rho et al., 1998; Morgan et al., 2018).

Durante actividades dinámicas, la tibia puede estar sometida a cargas de compresión equivalentes a varias veces el peso corporal, alcanzando tensiones internas elevadas en el hueso cortical.

A medida que la carga aumenta progresivamente, el tejido óseo

puede presentar un comportamiento no lineal asociado a la aparición de microfisuras y a la redistribución de tensiones internas, fenómenos que preceden a la falla estructural (Morgan et al., 2018).

En este contexto, el presente estudio propone un enfoque que integra la biomecánica estructural con una interpretación conceptual inspirada en la cultura popular japonesa, específicamente en las Aperturas de las Puertas Internas del personaje Rock Lee durante su combate contra Gaara en la serie Naruto.

Estas "puertas" representan simbólicamente la liberación progresiva del potencial físico del cuerpo humano mediante la eliminación de limitaciones neuromusculares.

Trasladado al ámbito biomecánico, este concepto se interpreta como un incremento controlado y progresivo de la carga axial aplicada sobre el fémur y la tibia, permitiendo analizar cómo evoluciona su respuesta estructural frente a niveles crecientes de esfuerzo.

Para ello, se definieron cuatro escenarios de simulación: una condición normal correspondiente al esfuerzo fisiológico típico durante actividades cotidianas, un incremento moderado equivalente al doble de la carga fisiológica, un aumento significativo representativo de un esfuerzo extremo y una carga máxima teórica cercana al umbral estructural del hueso.

Las simulaciones se desarrollaron en el software Autodesk Fusion 360 utilizando modelos tridimensionales del fémur y la tibia bajo condiciones de frontera definidas, incluyendo fijación distal y aplicación de carga axial.

Adicionalmente, se consideró un modelo alternativo compuesto por una aleación de acero de alta resistencia, con el objetivo de comparar el comportamiento del material biológico frente a un material metálico sometido a cargas equivalentes.

Este análisis busca contribuir al entendimiento de los límites biomecánicos del fémur y la tibia, así como a la evaluación comparativa de materiales utilizados en aplicaciones protésicas.

Al integrar una base fisiológica con un modelo conceptual de

incremento progresivo de fuerza, el estudio ofrece una visión didáctica y estructuralmente coherente sobre la respuesta de los huesos largos del miembro inferior ante condiciones de sobrecarga, con posibles aplicaciones en el diseño de prótesis, la planificación quirúrgica y el análisis de la resistencia del sistema musculoesquelético.

Metodología

Para el desarrollo del análisis por elementos finitos se utilizó el software Autodesk Fusion 360, con el objetivo de evaluar la respuesta mecánica del fémur y la tibia humana bajo condiciones de carga progresiva inspiradas en las aperturas de las "Puertas Internas" del personaje Rock Lee.

En este enfoque, las puertas se interpretaron como un modelo biomecánico de activación muscular progresiva, permitiendo simular incrementos controlados de esfuerzo desde condiciones fisiológicas normales hasta niveles cercanos al umbral estructural del hueso.

En primer lugar, se definieron las condiciones de carga base considerando un peso corporal de 47.5 kg, correspondiente al personaje analizado (Rock Lee a los 12 años). A partir de este valor, se calculó la carga axial fisiológica mediante la expresión:

$$W = m \times g = 47.5\ kg \times 9.81\ m/s^2 = 466\ N$$

Esta carga representa el esfuerzo promedio que el fémur soporta durante la bipedestación. Posteriormente, se establecieron cuatro escenarios de carga progresiva, inspirados en las descripciones de las Puertas Internas:

- Condición normal (1.0× = 466 N): corresponde a la carga fisiológica normal del fémur en reposo.

- Puerta 1 – Apertura (2.0× = 930 N): representa la eliminación de los límites neuronales al uso muscular, traduciéndose en una duplicación de la carga axial.

- Puerta 5 – Cierre (3.5× = 1630 N): simula un esfuerzo dinámico considerable, asociado a un incremento significativo de la fuerza

muscular, aún dentro de los límites fisiológicos del hueso.

- Puerta 8 – Muerte (5.0× = 2330 N): representa la máxima activación muscular y cardiovascular, correspondiente a una carga cercana al límite estructural del fémur.

Estos factores de carga se definieron tomando como referencia estudios biomecánicos que reportan que las fuerzas aplicadas sobre el fémur durante actividades dinámicas pueden alcanzar entre tres y cinco veces el peso corporal sin superar el rango fisiológico.

A continuación, se recopilaron las propiedades biomecánicas del tejido óseo cortical y trabecular con el fin de crear materiales personalizados dentro de Fusion 360.

Para el hueso cortical se empleó un módulo de Young de 17 GPa, un coeficiente de Poisson de 0.3 y una densidad de 1900 kg/m^3. Debido a limitaciones del software, la simulación se centró en la aplicación de fuerzas en la región media del fémur, lo que permitió garantizar estabilidad numérica durante el cálculo.

El modelo tridimensional del fémur fue importado en formato STL, posteriormente limpiado y preparado para el análisis. Cuando la geometría lo permitió, se diferenciaron una capa cortical externa y un núcleo trabecular interno.

Las condiciones de contorno se definieron fijando la epífisis distal, correspondiente a los cóndilos femorales, mediante restricciones que simulan la fijación articular.

La carga axial se aplicó en la mitad del fémur, variando su magnitud según el escenario de carga considerado. El mallado fue ajustado para cada simulación, especificándose en cada caso el tamaño de malla utilizado.

Para el análisis biomecánico de la tibia se siguió un enfoque similar, utilizando Autodesk Fusion 360 para garantizar la trazabilidad del modelo y la reproducibilidad de los parámetros.

Se evaluó la respuesta del tejido cortical tibial ante incrementos progresivos de carga inspirados en las Ocho Puertas Internas, interpretadas como fases de aumento muscular extremo.

Las propiedades mecánicas del hueso cortical tibial se definieron con un módulo de Young de 18 GPa, coeficiente de Poisson de 0.30, límite elástico de 150 MPa, resistencia última aproximada de 230 MPa y una densidad de 1.9 g/cm^3.

Estos valores se asignaron mediante la creación de un material personalizado en el software. La geometría de la tibia se representó como un cilindro hueco, con un diámetro externo de 25 mm y un diámetro interno de 10 mm, dimensiones acordes con mediciones morfométricas promedio reportadas en la literatura. Esta simplificación permitió capturar de manera adecuada el comportamiento dominante en compresión axial.

Las condiciones de frontera para la tibia consistieron en la fijación completa de la base inferior del cilindro, simulando el apoyo distal sobre el astrágalo.

La carga axial se aplicó de forma uniforme sobre la superficie superior, representando la transmisión de fuerzas desde la articulación de la rodilla.

El rango de cargas aplicado fue equivalente al utilizado en el análisis del fémur: 466 N, 930 N, 1630 N y 2330 N, coherente con estudios que indican que la tibia puede experimentar entre tres y cinco veces el peso corporal durante actividades de alta intensidad.

Cada simulación se ejecutó verificando la correcta aplicación de cargas, restricciones y propiedades del material.

Para todos los casos se obtuvieron mapas de tensión equivalente de Von Mises, tensiones principales, desplazamientos totales y factores de seguridad, lo que permitió evaluar de forma comparativa la evolución de la respuesta estructural del fémur y la tibia ante cargas progresivas.

Se utilizó un tamaño de malla de 0.75 mm en el análisis de la tibia con el objetivo de representar con mayor detalle la geometría del hueso y capturar adecuadamente posibles concentraciones de tensión.

Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre los diferentes escenarios de carga y materiales, documentando todos los parámetros del modelo para garantizar la coherencia y reproducibilidad del estudio.

Resultados

Tibia

El comportamiento biomecánico de la tibia bajo condiciones de carga progresiva fue evaluado mediante análisis por elementos finitos, considerando cuatro escenarios representativos del incremento de activación muscular inspirado en las Ocho Puertas Internas de Rock Lee.

Para cada simulación se analizaron la distribución de tensiones equivalentes de Von Mises, tensiones principales, desplazamientos totales, deformaciones equivalentes y factores de seguridad, con el objetivo de caracterizar la respuesta estructural del hueso cortical ante incrementos sucesivos de carga axial.

En la primera simulación 1, correspondiente a la condición fisiológica basal con una carga aplicada de 466 N, el modelo presentó un comportamiento completamente elástico.

La distribución de tensiones de Von Mises fue homogénea a lo largo del eje longitudinal de la tibia, con un valor máximo de 2.13 MPa, y un desplazamiento total máximo de 1.67 mm, como se observa en la Figura 1-A.

Estos valores se encuentran dentro del rango típico de respuesta del hueso cortical sometido a esfuerzos subfisiológicos, caracterizado por alta rigidez axial y deformaciones mínimas, sin indicios de concentración crítica de tensiones.

Al incrementar la carga a 930 N en la Simulación 2 (Puerta 1), se evidenció un aumento progresivo de la magnitud de las tensiones internas y de los desplazamientos, manteniéndose aún dentro del régimen elástico del material.

La tensión máxima de Von Mises alcanzó 3.50 MPa, mientras que el desplazamiento total máximo se incrementó hasta 3.41 mm. La Figura 1-B muestra una mayor concentración de tensiones en la región proximal del modelo, asociada a la transmisión axial de la carga desde la superficie superior, aunque sin superar los límites biomecánicos conocidos del hueso cortical.

Cuando se aplica una caga correspondiente a 1630 N (Puerta 5), el

https://doi.org/10.57819/r0r1-8317

modelo exhibió un comportamiento numéricamente atípico. A pesar del incremento significativo de la carga aplicada, la tensión máxima de Von Mises disminuyó a 0.234 MPa y el desplazamiento total máximo se redujo a 0.092 mm, como se aprecia en la figura 1-C.

Esta respuesta contradice la progresión mecánica esperada para un hueso cortical real, donde el aumento de carga suele generar incrementos proporcionales de tensión y deformación dentro del rango elástico.

La reducción abrupta de estos parámetros sugiere la influencia de factores numéricos asociados a la simplificación geométrica del modelo, a la orientación del vector de carga, a las condiciones de frontera o a la redistribución artificial de tensiones inducida por el mallado, más que a un comportamiento fisiológico real del tejido óseo.

Finalmente, cuando se aplica una carga de 2330 N (Puerta 8), la respuesta estructural mostró nuevamente una tendencia coherente con la literatura biomecánica. La tensión máxima de Von Mises aumentó hasta 13.07 MPa, mientras que el desplazamiento total máximo alcanzó 4.09 mm, como se observa en la Imagen 7.

En este escenario, las concentraciones de esfuerzo se localizaron principalmente en las regiones de transmisión de carga, reflejando una mayor exigencia estructural del hueso cortical bajo condiciones de sobrecarga.

A pesar de ello, los valores obtenidos se mantuvieron ampliamente por debajo del umbral de fractura reportado para la tibia cortical, estimado entre 150 y 200 MPa, indicando que la estructura no alcanza condiciones de falla.

Los resultados cuantitativos de cada escenario de carga, incluyendo fuerza aplicada, tensiones máximas de Von Mises, tensiones principales, desplazamientos totales, deformaciones equivalentes y factores de seguridad, se presentan de forma resumida en la Tabla 1, permitiendo una comparación directa entre las distintas condiciones analizadas.

En conjunto, los resultados evidencian una respuesta mecánica progresiva y coherente en las condiciones de carga baja y alta, así como una inestabilidad numérica en la carga intermedia, atribuible a limitaciones del modelo y no a la resistencia real de la tibia humana.

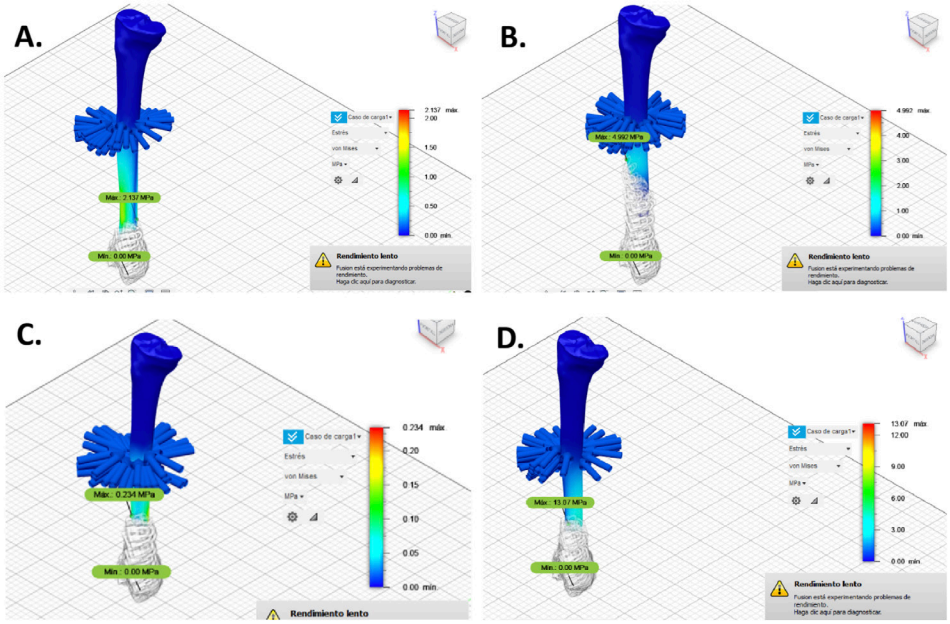


Figura 1. Distribución de tensiones equivalentes de Von Mises en el modelo de la tibia humana bajo condiciones de carga progresiva, obtenida mediante análisis por elementos finitos en Autodesk Fusion 360. (A) Condición fisiológica basal con una carga axial de 466 N, correspondiente a la bipedestación, donde se observa una distribución homogénea de tensiones con un valor máximo de 2.137 MPa. (B) Escenario Puerta 1 con una carga de 930 N, que muestra un incremento moderado de las tensiones internas, alcanzando un valor máximo de 4.992 MPa, concentradas principalmente en la región proximal del modelo. (C) Escenario Puerta 5 con una carga de 1630 N, en el cual se presenta un comportamiento atípico caracterizado por una reducción de la tensión máxima a 0.234 MPa, atribuible a efectos numéricos asociados al modelado y al mallado. (D) Escenario Puerta 8 con una carga de 2330 N, donde se evidencia un aumento significativo de la tensión de Von Mises hasta 13.07 MPa, reflejando una mayor exigencia estructural sin alcanzar el umbral de fractura del hueso cortical. La escala de colores representa la magnitud de la tensión equivalente de Von Mises en MPa.

Condición / Puerta	Fuerza aplicada (N)	Von Mises máx. (MPa)	Estrés principal I (MPa)	Desplazamiento total máx. (mm)	Deformación equivalente máx. (–)	Fuerza de reacción máx. (N)	Factor de seguridad (mín–máx)
Normal (reposo)	466	2.137	1.307	1.676	1.797×10^{-4}	1711.65	15.00–15.00
Puerta 1 (2×)	930	3.505	3.881	3.414	2.598×10^{-4}	3068.83	15.00–15.00
Puerta 5 (3.5×)	1630	0.234	0.265	0.092	2.075×10^{-5}	198.01	15.00–15.00
Puerta 8 (5×)	2330	13.07	12.307	4.089	1.00×10^{-3}	3347.24	12.24–15.00

https://doi.org/10.57819/r0r1-8317

Fémur

El comportamiento biomecánico del fémur humano fue evaluado mediante simulaciones por elementos finitos bajo cuatro escenarios de carga progresiva inspirados en las Aperturas de las Puertas Internas de Rock Lee.

Para cada caso se analizaron la tensión equivalente de Von Mises, el desplazamiento total, la deformación equivalente, la fuerza de reacción y el factor de seguridad, con el objetivo de caracterizar la respuesta estructural del hueso ante incrementos sucesivos de carga axial.

Con una carga aplicada de 466 N, el fémur presentó un comportamiento estructural estable. La tensión máxima de Von Mises alcanzó 5.062 MPa, mientras que el desplazamiento total máximo fue de 0.464 mm, como se observa en la Figura 2-A.

La deformación equivalente máxima fue de 3.998×10^{-4}, indicando una respuesta completamente elástica del tejido óseo. La fuerza de reacción máxima registrada fue de 335.939 N, y el factor de seguridad mostró valores bajos en regiones localizadas debido a singularidades numéricas, sin representar un riesgo real de fractura. En este escenario, las tensiones se mantuvieron muy por debajo del límite de fractura típico del hueso cortical, estimado entre 60 y 100 MPa.

Al duplicar la carga (930 N, Puerta 1), el modelo continuó mostrando un comportamiento biomecánicamente seguro. La tensión máxima de Von Mises disminuyó a 3.724 MPa, mientras que el desplazamiento total máximo se redujo a 0.385 mm, como se aprecia en la Figura 2-B.

La deformación equivalente máxima fue de 2.942×10^{-4}, y la fuerza de reacción máxima alcanzó 358.249 N.

Esta reducción en la tensión máxima, pese al aumento de carga, se atribuye a cambios en la localización de las zonas críticas y a la presencia de singularidades locales en la malla, fenómeno común en análisis FEM.

En términos globales, el fémur permaneció ampliamente dentro de rangos biomecánicos seguros.

Cuando la carga es de 1630 N (Puerta 5), se observó un incremento consistente de las tensiones y deformaciones.

La tensión máxima de Von Mises aumentó hasta 12.656 MPa, mientras que el desplazamiento total máximo fue de 0.766 mm, como se muestra en la Figura 2-C. La deformación equivalente máxima alcanzó 9.812×10^{-4}, y la fuerza de reacción máxima fue de 426.814 N.

A pesar del incremento significativo de la carga, los desplazamientos se mantuvieron por debajo de 1 mm, reflejando la elevada rigidez estructural del fémur. Estos valores continúan siendo muy inferiores al límite de fractura del hueso cortical, indicando un amplio margen de seguridad.

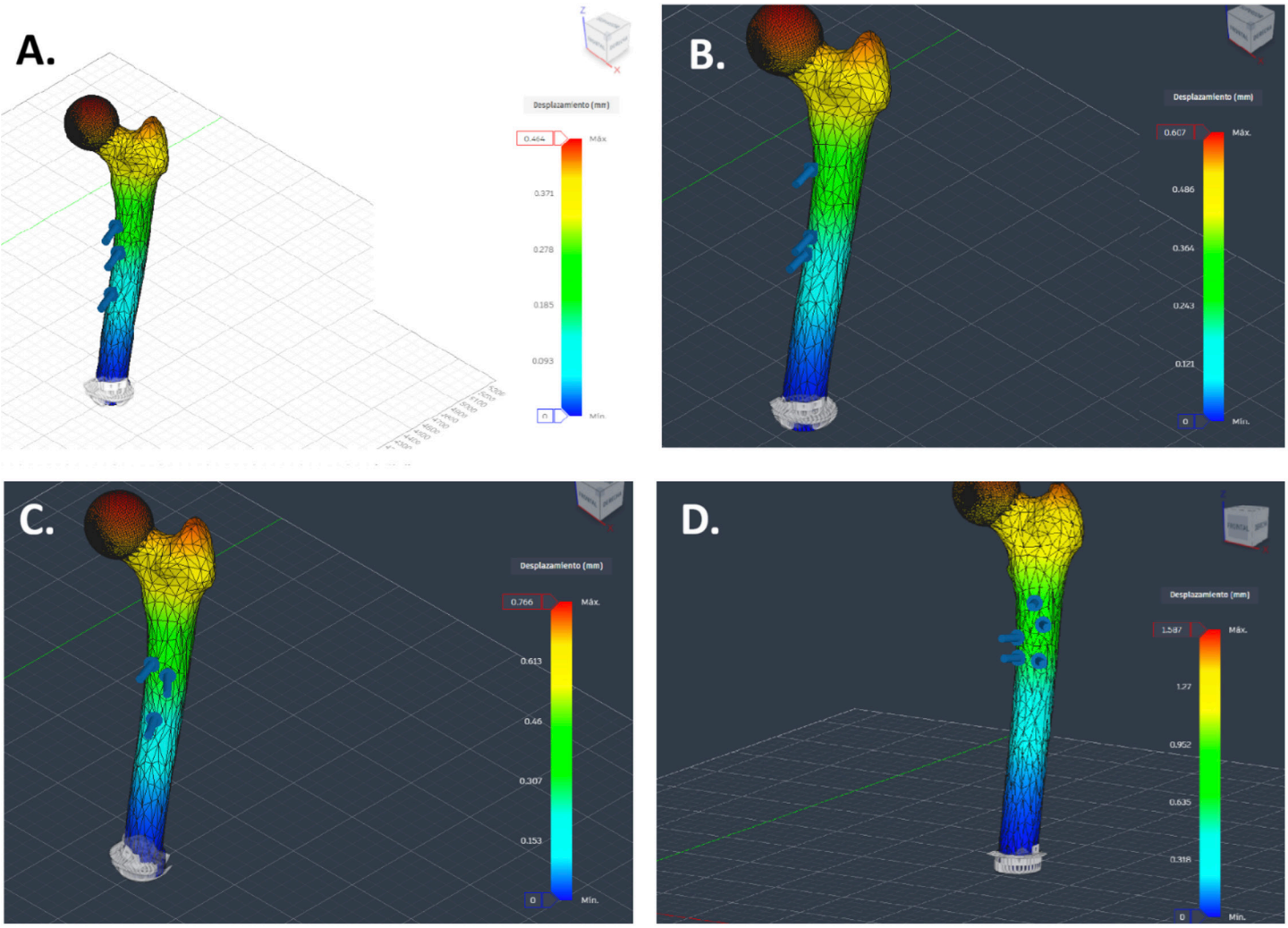
Finalmente, al aplicar una carga máxima de 2330 N (Puerta 8), el fémur experimentó la mayor exigencia estructural del estudio. La tensión máxima de Von Mises alcanzó 35.361 MPa, el desplazamiento total máximo fue de 1.587 mm y la deformación equivalente máxima se incrementó hasta 0.003, equivalente a una deformación del 0.3 %, como se observa en la Figura 2-D.

La fuerza de reacción máxima registrada fue de 748.874 N. A pesar de tratarse del escenario más exigente, las tensiones permanecieron muy por debajo del rango de resistencia máxima axial reportado para un fémur humano sano, que puede soportar entre 4000 y 8000 N, lo que confirma que no se alcanzan condiciones de falla estructural real.

Los resultados cuantitativos obtenidos para cada escenario de carga, incluyendo tensión máxima de Von Mises, desplazamiento total, fuerza de reacción, deformación equivalente y factor de seguridad, se presentan de manera resumida en la Tabla 2, permitiendo una comparación directa entre las distintas condiciones simuladas.

En conjunto, los resultados evidencian que el fémur mantiene un comportamiento biomecánicamente seguro bajo todas las cargas inspiradas en las Puertas Internas, y que los avisos de “fallo” reportados por el software corresponden a artefactos numéricos asociados a singularidades locales de la malla y no a una fractura real del tejido óseo.

https://doi.org/10.57819/r0r1-8317



Figuras 2. Distribución del desplazamiento total en el modelo tridimensional del fémur humano bajo condiciones de carga axial progresiva, obtenida mediante análisis por elementos finitos en Autodesk Fusion 360. (A) Condición fisiológica basal con una carga aplicada de 466 N, donde se observa un desplazamiento máximo de 0.464 mm, concentrado principalmente en la región proximal del fémur. (B) Escenario Puerta 1 con una carga de 930 N, que presenta un desplazamiento máximo de 0.385 mm, manteniendo una respuesta estructural estable y dentro del régimen elástico. (C) Escenario Puerta 5 con una carga de 1630 N, en el cual el desplazamiento total máximo aumenta a 0.766 mm, reflejando una mayor exigencia estructural sin alcanzar valores críticos. (D) Escenario Puerta 8 con una carga de 2330 N, donde se registra el mayor desplazamiento total del estudio, con un valor máximo de 1.587 mm, evidenciando la respuesta progresiva del fémur ante sobrecargas crecientes. La escala de colores representa la magnitud del desplazamiento total en milímetros (mm).

Carga aplicada (N)	Von Mises máx. (MPa)	Desplazamiento total máx. (mm)	Fuerza de reacción total máx. (N)	Deformación equivalente máx.	Factor de seguridad (min–max)
466	5.062	0.464	335.939	3.998E-04	1.975E-06 – 0.054
930	3.724	0.385	358.249	2.942E-04	2.686E-06 – 240.524
1630	12.656	0.766	426.814	9.812E-04	7.901E-07 – 8.452
2330	35.361	1.587	748.874	0.003	2.828E-07 – 6.392E+07

El comportamiento global del fémur frente a las diferentes cargas aplicadas se resume de manera clara en el Gráfico 1, donde se observa una tendencia progresiva de la tensión equivalente de Von Mises y del desplazamiento total máximo a medida que aumenta la carga axial. Este comportamiento indica una respuesta mecánica coherente del hueso, sin cambios abruptos ni indicios de falla estructural dentro del rango analizado. La deformación equivalente máxima se mantiene en valores bajos y evoluciona de forma gradual, lo que sugiere que el fémur opera predominantemente dentro del régimen elástico incluso bajo escenarios de carga elevada.
En conjunto, la visualización gráfica complementa los resultados numéricos y los campos de tensiones obtenidos por el análisis FEM, reforzando la interpretación de una respuesta estructural estable ante incrementos progresivos de carga

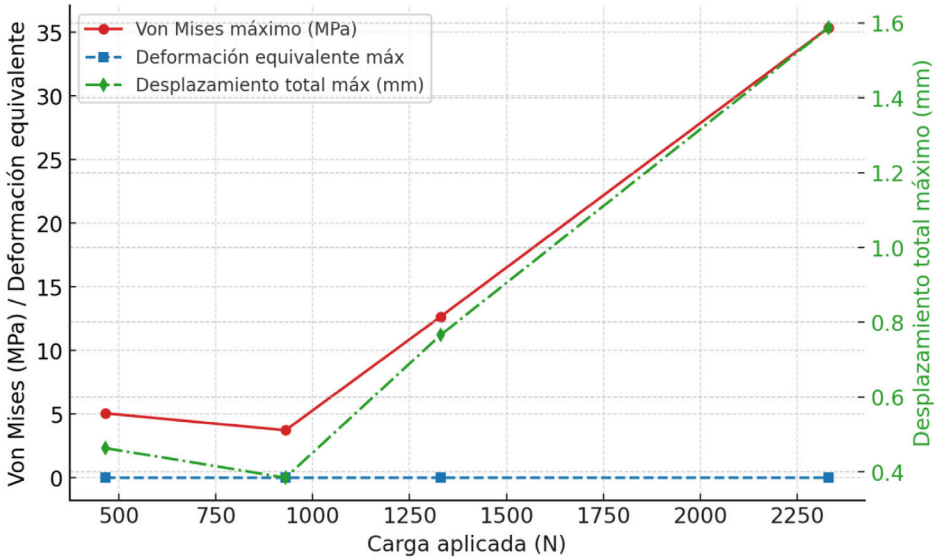


Figura 3. Respuestas del fémur a diferentes cargas aplicadas

https://doi.org/10.57819/r0r1-8317

Discusión

El análisis por elementos finitos del fémur y la tibia bajo cargas axiales progresivas muestra que ambos huesos mantienen un comportamiento estructural estable dentro del régimen elástico para todos los escenarios evaluados. En la tibia, las cargas fisiológicas (466 N) y moderadas (930 N) generan incrementos coherentes en la tensión de Von Mises y el desplazamiento, mientras que el escenario de carga máxima (2330 N) produce un aumento significativo de ambos parámetros sin alcanzar valores asociados a falla estructural. El comportamiento anómalo observado en la carga intermedia (1630 N), caracterizado por una reducción de tensiones y desplazamientos, se atribuye a efectos numéricos del modelo y no a una respuesta biomecánica real del tejido óseo.

En el fémur, la respuesta mecánica es más consistente, observándose un incremento progresivo de la tensión de Von Mises, la deformación equivalente y el desplazamiento total a medida que aumenta la carga aplicada. Incluso en el escenario más exigente, los valores obtenidos se mantienen muy por debajo de los umbrales de fractura reportados para el fémur humano, lo que confirma un amplio margen de seguridad estructural bajo las condiciones analizadas.

Los rangos extremadamente amplios del factor de seguridad (mín–máx) observados en ambos huesos reflejan la presencia de singularidades numéricas propias del análisis FEM, asociadas a condiciones de frontera, discretización de malla y regiones con tensiones cercanas a cero. Por ello, este parámetro no se considera representativo del comportamiento global del sistema y se interpreta con cautela, priorizándose el análisis de la tensión de Von Mises y el desplazamiento total como indicadores más robustos de la respuesta biomecánica.

Conclusión

El análisis por elementos finitos del fémur y la tibia bajo cargas axiales progresivas mostró que ambos huesos mantienen un comportamiento estructural estable dentro del régimen elástico, incluso bajo escenarios de sobrecarga inspirados en las Puertas Internas de Rock Lee. Las tensiones de Von Mises y los desplazamientos obtenidos se mantuvieron por debajo de los valores asociados a falla estructural, indicando que la resistencia

ósea es suficiente para soportar las cargas aplicadas en el modelo. Los rangos amplios observados en el factor de seguridad se atribuyen a singularidades numéricas propias del método y no representan un indicador global fiable del estado estructural. En conjunto, los resultados sugieren que las lesiones del personaje no se explican únicamente por un colapso estructural del hueso bajo carga axial, sino que involucran otros mecanismos biomecánicos no considerados en este estudio, como efectos dinámicos, flexión, torsión o daño acumulativo.

Contribución del autor

A.G. y C.H.: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Data curation, Visualization, Writing-original draft, Writing-review & editing.

Referencias

Audibert, C., Chaves-Jacob, J., Linares, J.-M., & Lopez, Q.-A. (2018). Bio-inspired method based on bone architecture to optimize the structure of mechanical workpieces. Materials & Design, 160, 1200–1216 (Article No. 107, Oct 2018). DOI: 10.1016/j.matdes.2018.10.013.

Au, A. G., Liggins, A. B., Raso, V. J., Carey, J. P., & Amirfazli, A. (2010). Representation of bone heterogeneity in subject-specific finite element models for the knee. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 99(2), 154–171. DOI: 10.1016/j.cmpb.2009.11.009.

Kaku, N., Hosoyama, T., Shibuta, Y., Kimura, M., & Tsumura, H. (2023). Influence of femoral bowing on stress distribution of the proximal femur: A three-dimensional finite element analysis. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 18, 82. DOI: 10.1186/s13018-023-03559-1.

Morgan, E. F., Unnikrisnan, G. U., & Hussein, A. I. (2018). Bone mechanical properties in healthy and diseased states. Annual Review of Biomedical Engineering, 20, 119–143. DOI: 10.1146/annurev-bioeng-062117-121139.

Phombut, C., Rooppakhun, S., & Sindhupakorn, B. (2021). Morphometric measurement of the proximal tibia to design the tibial component of total knee arthroplasty for the Thai population. Journal of Experimental Orthopaedics, 8(1), 118. DOI: 10.1186/s40634-

021-00429-9.

Rho, J. Y., Kuhn-Spearing, L., & Zioupos, P. (1998). Mechanical properties and the hierarchical structure of bone. Medical Engineering & Physics, 20(2), 92–102. DOI: 10.1016/S1350-4533(98)00007-1.

Schileo, E., Pitocchi, J., Falcinelli, C., & Taddei, F. (2020). Cortical bone mapping improves finite element strain prediction accuracy at the proximal femur. Bone, 136, 115348. DOI: 10.1016/j.bone.2020.115348.

Sheikh, Z., Najeeb, S., Khurshid, Z., Verma, V., Rashid, H., & Glogauer, M. (2015). Biodegradable materials for bone repair and tissue engineering applications. Materials (Basel), 8(9), 5744–5794. DOI: 10.3390/ma8095273.

VITAScientiis

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

Análisis de Viabilidad de Materiales para las Placas Compactadoras de WALL·E Mediante Simulación Estructural

Daysi Bermúdez
Orcid: 0009-0006-2225-2112
daysi.bermudez.1265@udelas.ac.pa

Obed Aparicio
0009-0001-1815-373X
obed.aparicio.715@udelas.ac.pa

Valentina Garza
0009-0007-3291-3970
valentina.garza.586@udelas.ac.pa

Universidad Especializada de las Américas (UDELAS), Facultad de Biociencias y Salud Pública, Panamá, República de Panamá

Resumen

El sistema de compactación de residuos del robot WALL·E, aunque de origen ficticio, opera bajo condiciones mecánicas comparables a las de compactadores reales sometidos a cargas compresivas elevadas y concentraciones locales de esfuerzo.

En este trabajo se evalúa la viabilidad mecánica de los materiales propuestos para las placas compactadoras mediante simulación estructural basada en el Análisis de Elementos Finitos (FEA). Se desarrolló un modelo tridimensional simplificado del sistema a partir de las dimensiones reportadas por Pixar, preservando los principales mecanismos de transferencia de carga.

Se compararon dos materiales: un acero comercial resistente al desgaste (Hardox 450) y un material idealizado pero físicamente plausible basado en una aleación Ti-6Al-4V reforzada con nanoplaquetas de grafeno.

El análisis estático lineal se realizó bajo una presión de compresión de 6 MPa, evaluando tensiones, desplazamientos y factores de seguridad, junto con una estimación teórica de vida a fatiga. Los resultados muestran que el Hardox 450 supera su límite elástico, mientras que el Ti-6Al-4V reforzado presenta un comportamiento estructural seguro y una vida útil teórica elevada.

https://doi.org/10.57819/h0my-aa86

Palabras claves

Análisis de elementos finitos, compactación de residuos, comportamiento mecánico, selección de materiales, análisis estructural, fatiga mecánica.

Abstract

Although fictional in origin, the waste compaction system of WALL·E operates under mechanical conditions comparable to those encountered in real compactors subjected to high compressive loads and localized stress concentrations. This study evaluates the mechanical feasibility of the proposed materials for the compaction plates through structural simulations based on Finite Element Analysis (FEA). A simplified three-dimensional model of the system was developed using the dimensions reported by Pixar, while preserving the principal load-transfer mechanisms.

Two materials were investigated: a commercial wear-resistant steel (Hardox 450) and an idealized yet physically plausible material based on a graphene nanoplatelet-reinforced Ti-6Al-4V alloy. Linear static analysis was performed under a compressive pressure of 6 MPa, evaluating stress distributions, displacements, safety factors, and a theoretical estimation of fatigue life.

The results indicate that Hardox 450 exceeds its yield strength under the applied loading conditions, whereas the reinforced Ti-6Al-4V alloy exhibits structurally safe behavior and a significantly extended theoretical service life. The findings demonstrate the importance of material selection in high-load compaction systems and highlight the usefulness of Finite Element Analysis as a tool for assessing structural performance and durability in both real and fictional engineering applications.

Keywords

Finite Element Analysis; Waste Compaction; Mechanical Behavior; Material Selection; Structural Analysis; Mechanical Fatigue

Introducción

El robot WALL·E fue concebido como un sistema autónomo destinado a la recolección y compactación de residuos urbanos en un entorno altamente degradado. Aunque su origen es ficticio, las condiciones mecánicas a las que estaría sometido su sistema de compactación son comparables a las de compactadores reales utilizados en aplicaciones domésticas e industriales, en los que los componentes estructurales operan bajo cargas compresivas elevadas, esfuerzos combinados y contacto no ideal.

Este paralelismo permite abordar el análisis del sistema desde una perspectiva estrictamente ingenieril, aplicando principios de mecánica de sólidos y herramientas de simulación estructural para evaluar su desempeño mecánico.

En este contexto, el Análisis de Elementos Finitos (FEA) constituye una metodología ampliamente utilizada para predecir el comportamiento de materiales y estructuras sometidos a distintas condiciones de carga.

El método se basa en la resolución numérica de las ecuaciones que gobiernan el equilibrio de esfuerzos y deformaciones, discretizando el dominio continuo en un conjunto de elementos finitos a los cuales se les asignan propiedades mecánicas y condiciones de frontera específicas, permitiendo estimar el comportamiento global del sistema con un alto grado de precisión (Welch-Phillips et al., 2020; Kaliakin, 2018).

El presente estudio se enfoca en el análisis estructural del sistema de compactación de residuos del robot WALL·E, tomando como referencia su diseño constitutivo y las dimensiones reportadas por los creadores del personaje.

De acuerdo con esta información, el robot presenta una altura aproximada de 1.02 m, un peso total de 122 kg y una capacidad interna de 44.96 L, parámetros que permiten escalar el modelo tridimensional y reproducir de manera razonable las condiciones mecánicas de operación del sistema (WALL-E Specs, Straight From Pixar, 2009).

Con el fin de garantizar la viabilidad computacional del análisis, se adopta un modelo geométrico simplificado que preserva los principales mecanismos de transferencia de carga y rigidez estructural, siguiendo criterios comúnmente empleados en simulaciones estructurales complejas (Fiedler, 2018; Márquez et al., 2022).

Uno de los aspectos críticos en sistemas de compactación es la selección del material de las placas compactadoras, ya que estas están sometidas a esfuerzos de compresión, flexión y cortante, así como a ciclos de carga repetitivos que pueden conducir a plastificación localizada o falla por fatiga.

En aplicaciones reales, se emplean aceros resistentes al desgaste, como el Hardox 450, debido a su elevada dureza y resistencia mecánica (SSAB, 2021; Zemlik et al., 2024).

Sin embargo, estudios recientes han demostrado que el refuerzo de aleaciones de titanio con nanoplaquetas de grafeno puede incrementar significativamente la rigidez, la resistencia y la tenacidad del material, manteniendo una baja densidad, lo que hace plausible la consideración de un material idealizado con propiedades mecánicas superiores (Saboori et al., 2018; Song et al., 2021).

A partir de estos antecedentes, el objetivo de este trabajo es evaluar en qué medida un material comercial puede aproximarse al comportamiento mecánico y a la durabilidad de un material ideal propuesto para las placas compactadoras del robot WALL·E.

Para ello, se analizan las tensiones, los desplazamientos y el factor de seguridad generados durante el proceso de compactación bajo diferentes configuraciones de mallado, así como una estimación teórica de la vida útil a fatiga.

De manera complementaria, se busca identificar las zonas críticas de concentración de esfuerzos y evaluar la influencia del material en la rigidez estructural del sistema, empleando el FEA como herramienta de validación mecánica bajo condiciones de carga representativas de la operación del sistema.

Metodología

Modelado geométrico del sistema de compactación

El análisis estructural del sistema de compactación del robot WALL·E se desarrolló a partir de un modelo tridimensional representativo de su estructura interna.

Como punto de partida, se consideró el cubo escaneado del sistema de compactación, obtenido mediante digitalización tridimensional del modelo físico del robot (Figura 1-A).

Este cubo constituye el volumen estructural principal donde se aloja el mecanismo de compactación de residuos.

A partir de las especificaciones generales del robot reportadas por los creadores del personaje, que incluyen una altura aproximada de 1.02 m, un peso total de 122 kg y una capacidad interna de 44.96 L, el modelo fue escalado de manera proporcional hasta obtener un cubo de compactación con dimensiones aproximadas de 72 cm de altura, 70 cm de ancho y 70 cm de profundidad, manteniendo la coherencia geométrica del diseño original.

El sistema de compactación fue representado mediante un conjunto de componentes estructurales simplificados que reproducen los mecanismos principales de transferencia de carga.

Como se muestra en la Figura 1-B, el modelo incluye una placa compactadora superior, una base estructural inferior y cuatro pistones cilíndricos dispuestos simétricamente, encargados de transmitir la carga de compresión.

Esta configuración permite analizar de manera directa la respuesta estructural de las placas bajo carga axial, reduciendo efectos geométricos secundarios no relevantes para el objetivo del estudio.

Las dimensiones específicas del sistema fueron definidas de acuerdo con los parámetros mostrados en la Figura 1 (Panel C-E). En particular, se consideraron las medidas de la base (Figura 1C), la altura y el diámetro de los pistones (Figura 1D), el grosor de la base y de la placa compactadora (Figura 1E), así como la altura máxima del conjunto placa compactadora–base (Figura 1F).

https://doi.org/10.57819/h0my-aa86

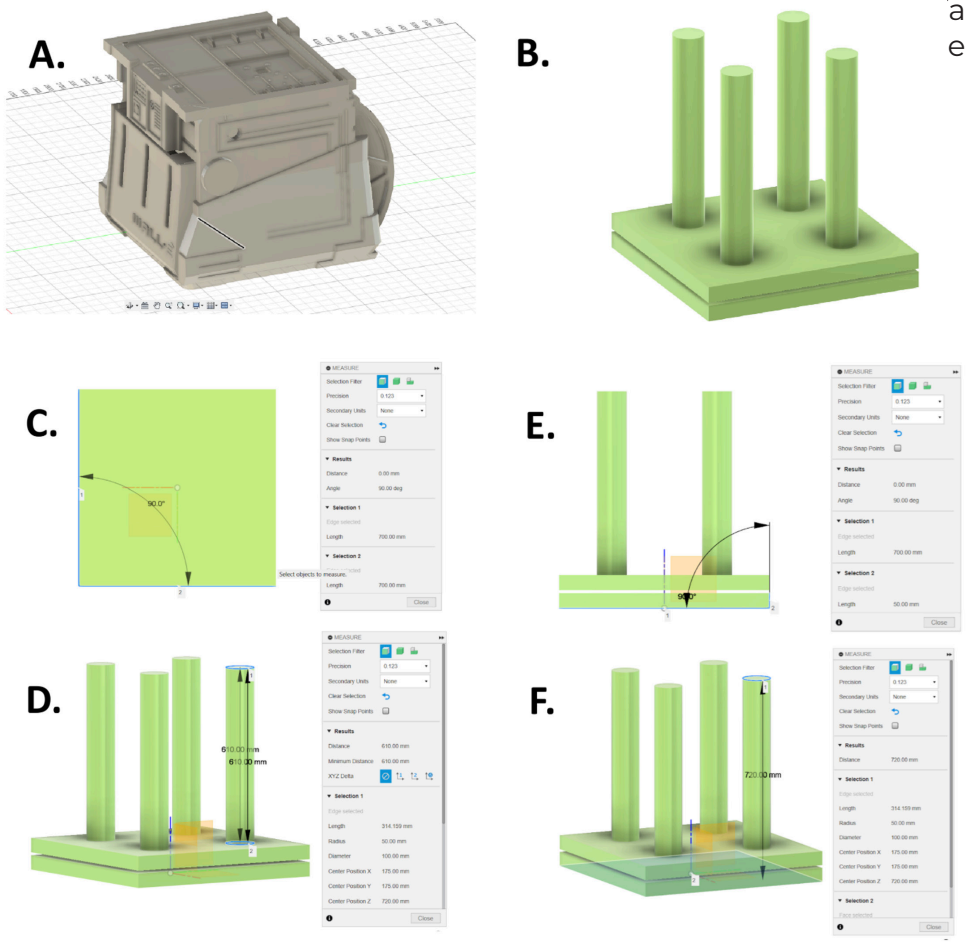


Figura 1. A. Cubo Escaneado de Wall-E. B. Sistema de Compactación. (C) Medidas de la base. (D) Altura y diámetro de los pistones. (E) Grosor de la base y la placa de compactación. (F) Altura máxima del conjunto placa compactadora y base.

Selección y propiedades de los materiales

Se consideraron dos materiales para el análisis estructural:

(i) un material ideal de carácter ficticio pero físicamente plausible, y

(ii) un material comercial utilizado en aplicaciones reales de compactación.

El material ideal propuesto corresponde a una aleación Ti-6Al-4V reforzada con nanoplaquetas de grafeno (GNPs), sustentada en evidencia experimental que demuestra incrementos significativos

en rigidez, resistencia mecánica y tenacidad sin penalizar de forma sustancial la densidad del material. Este material se introduce como referencia superior de desempeño estructural.

Como material comercial se seleccionó el acero de alta resistencia al desgaste Hardox 450, ampliamente utilizado en placas, cuchillas y componentes sometidos a cargas intensas y abrasión en sistemas de compactación industrial.

La comparación entre ambos materiales se fundamenta en propiedades mecánicas relevantes para análisis estructural y de fatiga: módulo de Young, densidad, límite elástico, resistencia última y coeficiente de Poisson, tal como se resume en la Tabla 1.

Estas propiedades fueron asignadas directamente en el entorno de simulación para garantizar coherencia entre los parámetros de entrada del modelo y los valores reportados experimentalmente en la literatura técnica.

Categoría	Elemento	Módulo de Young	Densidad	Límite elástico	Resistencia última	Coeficiente de Poisson	Rango de presión	Aplicación / Justificación técnica
Material	Ti-6Al-4V reforzado con grafeno	≈ 130 GPa	≈ 4450 kg/m³	≈ 1050 MPa	≈ 1200–1300 MPa	≈ 0.33	—	Material ficticio-plausible que muestra mejoras en rigidez, resistencia y tenacidad
Material	Hardox 450 (AR Steel)	≈ 210 GPa	≈ 7850 kg/m³	≈ 400 MPa	≈ 600–900 MPa	≈ 0.30	—	Acero resistente al desgaste utilizado en placas y cuchillas de compactadores
Equipo real	Compactadores domésticos	—	—	—	—	—	≈ 0.2 MPa	Presiones típicas en compactadores de residuos de pequeña escala, dependientes del tipo de residuo y del sistema mecánico o hidráulico (Miltek XP100S Mixed Waste Recycling Compactor, n.d.)
Equipo real	Camiones compactadores urbanos	—	—	—	—	—	≈ 12–21 MPa	Presiones de trabajo en sistemas hidráulicos de gran escala, dependientes de la densidad del residuo y del diseño del equipo (Camión Compactador de Basura Dongfeng Dorica de 7 m³, n.d.; Somade et al., 2020)

Estimación de la presión de compactación

Para definir la carga aplicada sobre la placa compactadora, se

https://doi.org/10.57819/h0my-aa86

analizaron rangos típicos de presión en compactadores reales. Los compactadores domésticos operan generalmente alrededor de 0.2 MPa, mientras que los camiones compactadores urbanos alcanzan presiones del orden de 12–21 MPa.

Considerando el entorno operativo de WALL-E, caracterizado por residuos secos, fragmentados y de densidad intermedia (plásticos, metales livianos y residuos electrónicos), se adoptó un valor de presión intermedio de **6 MPa** como condición de carga representativa. Esta presión fue aplicada de forma uniforme sobre la superficie de la placa compactadora móvil durante el análisis estructural.

Análisis estructural por elementos finitos

El comportamiento mecánico del sistema se evaluó mediante un análisis estático lineal por el método de Análisis de Elementos Finitos (FEA). Se impusieron restricciones de desplazamiento nulo en la base inferior del sistema y en los cilindros que representan los pistones, mientras que la presión de compactación se aplicó normal a la superficie de la placa móvil.

Para estudiar la influencia del refinamiento numérico en los resultados, se generaron tres configuraciones de mallado: grueso, medio y fino. En cada caso se evaluaron los campos de tensión equivalente de Von Mises, desplazamiento total y factor de seguridad, permitiendo identificar zonas críticas de concentración de esfuerzos y analizar la convergencia de la solución.

Estimación teórica de la vida a fatiga

La estimación de la vida útil por fatiga se realizó de forma teórica a partir de los resultados del análisis estático. A partir de los valores de tensión máxima y mínima obtenidos, se calcularon la tensión alternante y la tensión media según:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

https://doi.org/10.57819/h0my-aa86

La verificación frente a fatiga se llevó a cabo utilizando el criterio de Goodman, expresado como:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}} \leq 1$$

donde σ_e corresponde al límite de fatiga estimado y σ_uts a la resistencia última del material.

Para los casos que cumplieron la condición de fluencia, la vida útil se estimó mediante la ecuación de Basquin, que relaciona la amplitud de tensión con el número de ciclos hasta la falla:

$$\sigma_a = \sigma_f'(2N)^b$$

donde σ_f^'es el coeficiente de resistencia a la fatiga y bel exponente de la curva S–N, ambos calibrados a partir de valores típicos reportados para materiales de características similares al acero Hardox y a aleaciones de titanio reforzadas.

A partir del número de ciclos a la falla, se estimó la vida útil del sistema considerando un régimen de operación diario constante, permitiendo comparar de manera directa el desempeño a largo plazo de ambos materiales.

Resultados

El comportamiento estructural del sistema de compactación fue evaluado mediante análisis estático lineal por elementos finitos y cálculos teóricos de fatiga, considerando dos materiales candidatos (Hardox 450 y Ti-6Al-4V reforzado con grafeno) y tres niveles de refinamiento de malla. Bajo una presión uniforme de 6 MPa aplicada sobre la placa compactadora, los resultados muestran diferencias marcadas en la distribución de tensiones, desplazamientos y factores de seguridad entre ambos materiales.

Para el Hardox 450, el análisis con mallado grueso arrojó un esfuerzo máximo de Von Mises de 507.214 MPa (Figura 2-A), valor que supera el límite elástico del material (400 MPa, Tabla 1), indicando la aparición de plastificación localizada. El factor de seguridad mínimo obtenido fue FS ≈ 0.789, confirmando una condición estructural no segura bajo

https://doi.org/10.57819/h0my-aa86

bajo la carga aplicada. El desplazamiento máximo total fue inferior a 0.424 mm (Figura 2-B), concentrado en la zona central de la placa móvil.

Al incrementar el refinamiento a mallado medio, el esfuerzo máximo aumentó hasta 936.353 MPa (Figura 2-C), superando incluso la resistencia última a la tracción del material (900 MPa), con un factor de seguridad mínimo de FS ≈ 0.427 y un desplazamiento máximo de 0.449 mm (Figura 2-D), lo que evidencia plastificación severa. Finalmente, con mallado fino, el esfuerzo máximo alcanzó 1 400.896 MPa (Figura 2-E), acompañado de un factor de seguridad mínimo de FS ≈ 0.285 y un desplazamiento máximo de 0.459 mm (Figura 2-F), confirmando una condición de falla estructural inminente independientemente del refinamiento de malla.

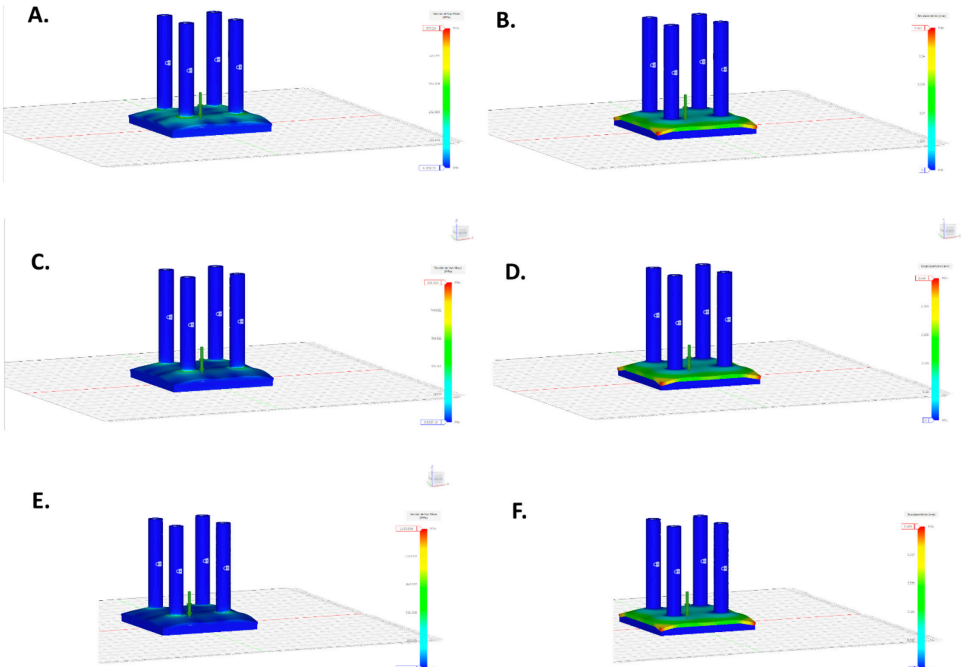
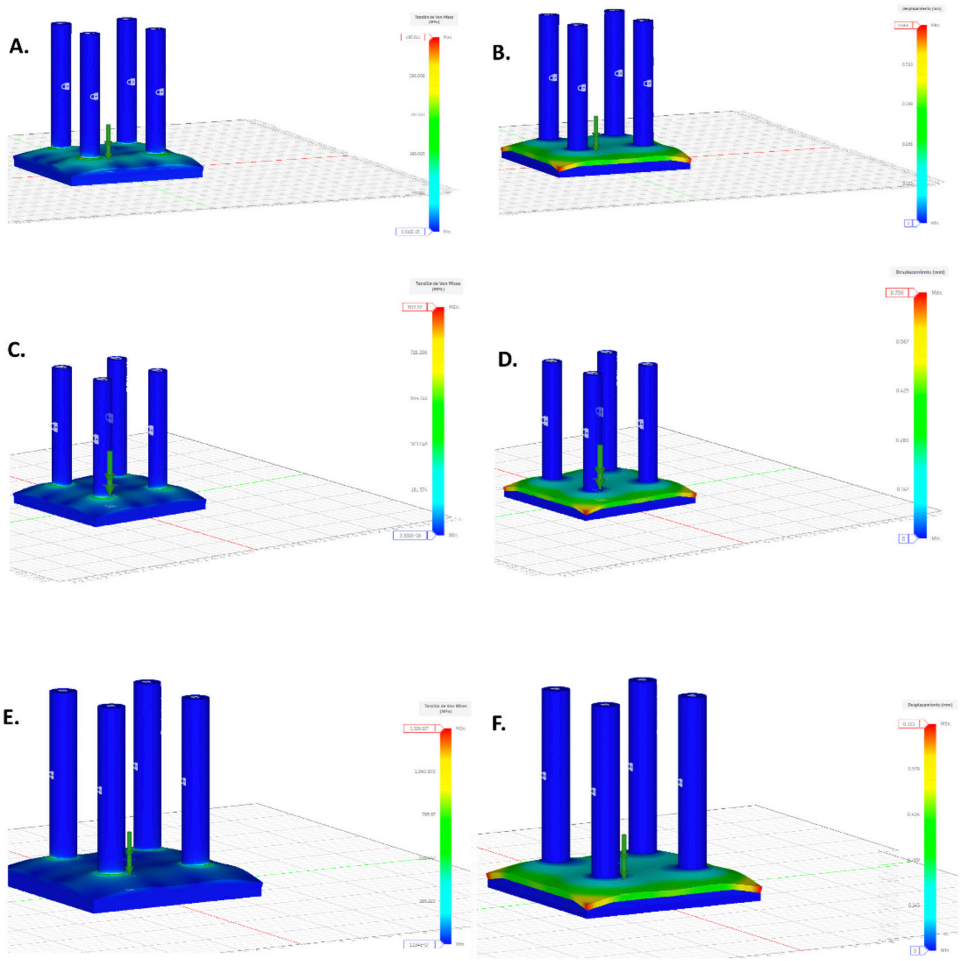


Figura 2. Resultados del análisis por elementos finitos del sistema de compactación bajo una presión uniforme de 6 MPa. (A) Distribución de la tensión equivalente de Von Mises para el acero Hardox 450 utilizando un mallado grueso. (B) Campo de desplazamiento total correspondiente al mismo caso. (C) Distribución de la tensión equivalente de Von Mises para el acero Hardox 450 con un mallado medio, donde se observa un incremento en los valores máximos de esfuerzo y una mayor definición de las zonas de concentración. (D) Campo de desplazamiento total asociado al mallado medio. (E) Distribución de la tensión equivalente de Von Mises para el acero Hardox 450 con mallado fino, evidenciando concentraciones localizadas de esfuerzo en las regiones de contacto entre los pistones y la placa compactadora. (F) Campo de desplazamiento total correspondiente al mallado fino, donde los desplazamientos máximos se concentran en la región central de la placa compactadora.

En contraste, el material Ti-6Al-4V + GNPs mostró un desempeño mecánico significativamente más favorable. Con mallado grueso, el esfuerzo máximo de Von Mises fue de 495.011 MPa (Figura 13), muy por debajo del límite elástico del material (1050 MPa, Tabla 1), con un factor de seguridad mínimo de FS ≈ 2.12 y un desplazamiento máximo de 0.666 mm (Figura 14). Al aplicar mallado medio, el esfuerzo máximo aumentó a 907.87 MPa (Figura 15), manteniéndose aún dentro del rango elástico, con un desplazamiento máximo de 0.709 mm (Figura 16) y un factor de seguridad mínimo de FS ≈ 1.16. En el caso del mallado fino, se registró un esfuerzo máximo de 1 326.12 MPa (Figura 17), valor que supera el límite elástico del material; sin embargo, estos picos se localizaron en regiones muy reducidas asociadas a concentraciones geométricas, mientras que el desplazamiento máximo se mantuvo bajo (0.723 mm, Figura 18) y el factor de seguridad mínimo fue FS ≈ 0.79, indicando una plastificación localizada más que una falla global del componente.



https://doi.org/10.57819/h0my-aa86

Figura 3. Resultados del análisis por elementos finitos del sistema de compactación fabricado con la aleación Ti-6Al-4V reforzada con nanoplaquetas de grafeno, sometido a una presión uniforme de 6 MPa. (A) Distribución de la tensión equivalente de Von Mises obtenida con mallado grueso, donde el esfuerzo máximo alcanza aproximadamente 495 MPa. (B) Campo de desplazamiento total correspondiente al mallado grueso, con un desplazamiento máximo del orden de 0.666 mm. (C) Distribución de la tensión equivalente de Von Mises para el mallado medio, mostrando un incremento del esfuerzo máximo hasta aproximadamente 908 MPa. (D) Campo de desplazamiento total asociado al mallado medio, con un desplazamiento máximo cercano a 0.709 mm. (E) Distribución de la tensión equivalente de Von Mises para el mallado fino, donde el esfuerzo máximo alcanza aproximadamente 1 326 MPa, localizado en regiones reducidas de concentración geométrica. (F) Campo de desplazamiento total correspondiente al mallado fino, con un desplazamiento máximo del orden de 0.723 mm, concentrado principalmente en la región central de la placa compactadora.

El análisis de fatiga, realizado a partir de los resultados del análisis estático lineal con mallado grueso, refuerza estas conclusiones (Tabla 2).

Para el Hardox 450, la tensión alternante calculada fue de 253.607 MPa y la tensión media del mismo orden, resultando en un factor de seguridad contra fluencia inferior a la unidad (≈ 0.7887) y un valor del criterio de Goodman de ≈ 1.55, lo que indica incumplimiento del criterio de resistencia a fatiga y confirma que el material fallaría por plastificación estática antes de que la fatiga sea relevante.

En consecuencia, no es posible estimar una vida útil por ciclos para este material bajo las condiciones analizadas. Por el contrario, el Ti-6Al-4V + GNPs presentó una tensión alternante de 247.506 MPa, un factor de seguridad contra fluencia de ≈ 2.121 y un valor del criterio de Goodman de ≈ 0.662, cumpliendo la condición de seguridad a fatiga.

A partir de la ecuación de Basquin, se estimó un número de ciclos hasta la falla del orden de 5.27×10^8 ciclos, lo que, considerando un régimen operativo de 150 ciclos diarios, corresponde a una vida útil teórica aproximada de 3.51×10^6 días, equivalente a ~9 614 años, evidenciando que la fatiga no constituye un mecanismo limitante para este material en el sistema de compactación analizado.

Propviedad	Hardox 450	Ti-6Al-4V + GNPs
Límite elástico (MPa)	400	1050
Resistencia última (MPa)	900	1300
Tensión mínima (MPa)	≈ 0	≈ 0
Tensión máxima (MPa)	507.214	495.011
Tensión alternante, σ_a (MPa)	253.607	247.506
Tensión media, σ_m (MPa)	253.607	247.506
Factor de seguridad contra fluencia	≈ 0.79 (no cumple)	2.12
Criterio de Goodman	≈ 1.55 (no cumple)	≈ 0.66
Ciclos hasta falla, N	Falla estática (no procede)	5.27×10^8
Ciclos asumidos por día	—	150
Vida útil estimada (días)	—	3.51×10^6
Vida útil estimada (años)	—	≈ 9 614

Discusión

Los resultados evidencian que el desempeño mecánico del sistema de compactación está fuertemente condicionado por la selección del material. Para el acero Hardox 450, los elevados valores de tensión equivalente de Von Mises obtenidos en todas las configuraciones de mallado, junto con factores de seguridad inferiores a la unidad, indican que el sistema opera fuera del régimen elástico bajo una presión de compactación de 6 MPa, lo que implica plastificación localizada desde etapas tempranas de operación. La persistencia de estas concentraciones de esfuerzo al refinar la malla confirma que no se trata de artefactos numéricos, sino de una consecuencia directa de la geometría y de la transferencia de carga entre los pistones y la placa compactadora.

En contraste, el material idealizado Ti-6Al-4V reforzado con nanoplaquetas de grafeno presenta una respuesta predominantemente elástica para los mallados grueso y medio, con factores de seguridad superiores a la unidad y una distribución de tensiones más homogénea. Incluso cuando se observan picos locales de tensión para el mallado fino, estos se restringen a regiones geométricamente limitadas y no comprometen la integridad global del sistema, lo que se refleja en

https://doi.org/10.57819/h0my-aa86

desplazamientos moderados y una mayor estabilidad estructural.

El análisis de fatiga refuerza estas tendencias. En el caso del Hardox 450, el incumplimiento del criterio de Goodman y los bajos factores de seguridad frente a fluencia indican que la falla estaría dominada por plastificación estática, haciendo irrelevante una evaluación detallada de vida a fatiga. Por el contrario, el material reforzado con grafeno cumple holgadamente el criterio de Goodman y presenta una vida útil teórica extremadamente elevada según la ecuación de Basquin, lo que sugiere que la fatiga no constituye un mecanismo limitante bajo las condiciones analizadas.

En conjunto, estos resultados indican que, si bien la geometría del sistema de compactación impone concentraciones de esfuerzo inevitables, su desempeño puede mejorar sustancialmente mediante el uso de materiales con alta relación rigidez–resistencia. El material reforzado con grafeno se introduce así como un límite superior de desempeño mecánico que permite contextualizar las restricciones del diseño y orientar futuras optimizaciones geométricas o la selección de materiales intermedios más viables desde el punto de vista industrial.

Conclusión

Bajo una presión uniforme de 6 MPa, el acero Hardox 450 excede su límite elástico y presenta factores de seguridad mínimos menores que 1 en los tres refinamientos de malla, por lo que no resulta adecuado para las condiciones simuladas. En contraste, el Ti-6Al-4V reforzado con nanoplaquetas de grafeno muestra un comportamiento estructural estable en mallado grueso y medio, y aunque en mallado fino aparecen picos localizados por encima del límite elástico asociados a concentraciones geométricas, no se observa un compromiso global del desempeño. En fatiga, Hardox 450 no cumple Goodman ni fluencia (falla estática), mientras que Ti-6Al-4V + GNPs cumple Goodman y alcanza un orden de 5×10^8 ciclos, indicando que la fatiga no sería el mecanismo limitante bajo el régimen evaluado.

Contribución del autor

D.V., O.A. y V.G..: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Data curation, Visualization, Writing-original draft, Writing-review & editing.

Referencias

WALL-E specs, straight from Pixar. (2009, January 6). https://walle-meta.livejournal.com/10488.html

Voicu, G., Lazea, M., Constantin, G., Stefan, E., & Munteanu, M. (2020). Finite element analysis of the compaction plate from a garbage truck. E3S Web of Conferences, 180, 04006. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018004006

Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2015). Mecánica de materiales (8.ª ed.). https://drive.google.com/file/d/1G1mf_oWBP0fhGt0nVsiYMVeM-D8r7z4U/view

Kaliakin, V. N. (2018). Introduction to approximate solution techniques, numerical modeling, and finite element methods. https://doi.org/10.1201/9781315274461

Welch-Phillips, A., Gibbons, D., Ahern, D. P., & Butler, J. S. (2020). What is finite element analysis? Clinical Spine Surgery a Spine Publication, 33(8), 323–324. https://doi.org/10.1097/bsd.0000000000001050

Márquez, J. a. S., Ramírez, T. a. S., González, A. G., Jiménez, L. S. M., Guía, K. N. N., Rodríguez, M. R., & Ramírez, F. M. S. (2022, September 9). Simulación del Esfuerzo Mecánico en una pieza Modelada en 3D por el Método de Elementos Finitos. https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3567

Khan, S., Shaik, A. S., & CH, M. K. (2024). Performing FEM Analysis to Evaluate the Static and Thermal Characteristics of a Piston. In MATEC Web of Conferences (Vol. 405, p. 03007). EDP Sciences.

Fiedler, M. (2018). Understanding and Improving Your Results in Fusion 360 Simulation. Autodesk University.

https://doi.org/10.57819/h0my-aa86

VITAScientiis

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

Evaluación biomecánica y termomecánica de la armadura exoesquelética de Batman en Batman v Superman: Dawn of Justice bajo impactos extremos y flujo térmico dirigido

Ericka Leon .
Orcid: https://orcid.org/0009-0008-2158-2018
Correo: rosa.hurtado.2274@udelas.ac.pa

Resumen

Este estudio presenta una evaluación biomecánica y termomecánica cuantitativa de la armadura exoesquelética de Batman tal como es representada en Batman v Superman: Dawn of Justice.

Utilizando el escenario cinematográfico como generador de condiciones de frontera, se implementó un marco metodológico multidisciplinario que integra extracción cinemática, modelado impulso-momento, análisis transitorio de transferencia de calor y simulación por elementos finitos para evaluar la transmisión de cargas hacia la región torácica humana bajo impactos contundentes extremos y flujo térmico dirigido.

Los resultados indican que, bajo condiciones de atenuación inducidas por la kryptonita, la fuerza transmitida (336 N), la deflexión esternal (8.4 mm) y la aceleración (8.2 g) permanecen por debajo de los umbrales establecidos de lesión biomecánica.

El análisis térmico demuestra protección efectiva para exposiciones breves (<4 s), con degradación progresiva del sistema multicapa bajo exposición sostenida. Se concluye que la supervivencia depende críticamente de la extensión temporal de la desaceleración y de los mecanismos de atenuación energética en la arquitectura multicapa.

Más allá del contexto narrativo, el trabajo propone un marco de ingeniería estructurado para evaluar sistemas de protección sometidos a condiciones de carga no convencionales.

Palabras clave

Biomecánica de impacto, ciencia de materiales, ingeniería forense, análisis cinemático, método de elementos finitos, cultura pop.

https://doi.org/10.57819/zq6h-q761

Abstract

This study presents a quantitative biomechanical and thermomechanical evaluation of Batman's exoskeletal armor as portrayed in Batman v Superman: Dawn of Justice.

Using the cinematic scenario as a source of boundary conditions, a multidisciplinary methodological framework was implemented, integrating kinematic extraction, impulse–momentum modeling, transient heat transfer analysis, and Finite Element Analysis (FEA) to assess load transmission to the human thoracic region under extreme blunt impacts and directed thermal flux.

The results indicate that, under kryptonite-induced attenuation conditions, the transmitted force (336 N), sternal deflection (8.4 mm), and acceleration (8.2 g) remain below established biomechanical injury thresholds.

Thermal analysis demonstrates effective protection during short-duration exposures (< 4 s), while progressive degradation of the multilayer protection system is observed under sustained thermal loading. The findings suggest that survivability depends critically on both the duration of deceleration and the energy attenuation mechanisms incorporated within the multilayer armor architecture.

Beyond its fictional context, this work proposes a structured engineering framework for evaluating protective systems subjected to unconventional loading conditions.

The study further illustrates the applicability of multidisciplinary computational methods for assessing impact mitigation, thermal resistance, and structural performance in advanced protective equipment.

Keywords

Impact Biomechanics; Materials Science; Forensic Engineering; Kinematic Analysis; Finite Element Method; Popular Culture.

https://doi.org/10.57819/zq6h-q761

Introducción

La representación cinematográfica de sistemas de protección extrema ofrece un escenario singular para el análisis ingenieril de cargas no convencionales. En Batman v Superman: Dawn of Justice (2016), la armadura exoesquelética de Batman es presentada como un sistema capaz de mitigar impactos contundentes de alta energía y exposición a flujo térmico dirigido generados por un oponente con capacidades físicas extraordinarias. Más allá del contexto narrativo, este escenario plantea una pregunta técnica legítima: ¿puede una arquitectura multicapa de blindaje reducir la transmisión de energía a la región torácica humana hasta niveles compatibles con la tolerancia biomecánica conocida?

La ingeniería de sistemas de protección personal y vehicular ha avanzado considerablemente en el estudio del comportamiento de materiales compuestos bajo impacto balístico y cargas explosivas. Revisiones clásicas sobre la resistencia al impacto de materiales compuestos destacan la eficacia de configuraciones multicapa que combinan cerámicas de alta dureza con fibras poliméricas de alta tenacidad para disipar energía cinética mediante mecanismos de fractura controlada y deformación distribuida (Cantwell & Morton, 1991). De manera complementaria, el análisis de blindajes cerámicos modernos ha demostrado que materiales como el carburo de boro presentan una elevada resistencia a la compresión y mecanismos de derrota basados en la fragmentación y dispersión de la energía del proyectil (Hazell, 2016). Estos principios constituyen la base conceptual para modelar un sistema de blindaje exoesquelético sometido a cargas extremas.

En el ámbito normativo, estándares como el STANAG 2920 establecen criterios para evaluar la firma de deformación posterior en sistemas de protección personal, reconociendo que la prevención de penetración no garantiza la ausencia de lesión interna (NATO Standardization Office, 2020). Este enfoque es particularmente relevante en escenarios de impacto contundente, donde la transferencia de momento puede inducir deformaciones torácicas significativas aun en ausencia de perforación.

Desde la perspectiva biomecánica, la tolerancia del tórax humano frente a cargas dinámicas ha sido estudiada extensamente en contextos de colisión vehicular y trauma contundente. Investigaciones experimentales han identificado la deflexión esternal como un

predictor crítico de lesión, situando valores cercanos a 44 mm como umbral asociado a daño grave o fatal (Kroell et al., 1974). Asimismo, se han propuesto criterios viscosos que relacionan la magnitud y la tasa de deformación con el riesgo de lesión de tejidos blandos (Viano & Lau, 1988). Estos parámetros proporcionan límites cuantificables frente a los cuales puede evaluarse la eficacia de un sistema de atenuación de impacto.

En paralelo, el comportamiento térmico de estructuras multicapa sometidas a exposición transitoria ha sido modelado mediante aproximaciones unidimensionales que permiten estimar la evolución temporal de temperaturas internas y residuales en sistemas compuestos (Mouritz, 2003). Tales modelos son particularmente útiles cuando se busca evaluar la protección térmica frente a flujos de alta intensidad y corta duración, donde la capacidad calorífica y la conductividad térmica de cada capa determinan la tasa de transmisión de calor hacia el sustrato biológico.

A pesar de estos avances, la literatura existente se centra predominantemente en amenazas convencionales como proyectiles balísticos, esquirlas o accidentes de tráfico. Existe una brecha conceptual en el análisis de escenarios de impacto concentrado de magnitud extrema combinados con exposición simultánea a flujo térmico dirigido. La representación cinematográfica de la armadura de Batman ofrece, en este sentido, un caso límite que permite integrar principios de biomecánica de impacto, ciencia de materiales y transferencia de calor en un marco cuantitativo unificado.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar, desde una perspectiva estrictamente ingenieril, el desempeño biomecánico y termomecánico de la armadura exoesquelética de Batman frente a cargas extremas tal como son representadas en la narrativa fílmica.

La hipótesis inicial plantea que, aun considerando mecanismos de atenuación multicapa, la energía transmitida al tórax humano podría superar los umbrales de tolerancia establecidos en la literatura (Kroell et al., 1974; Viano & Lau, 1988). Mediante la integración de análisis cinemático, modelado impulso-momento, transferencia de calor transitoria y simulación por elementos finitos, se busca determinar si la supervivencia del usuario resulta biomecánicamente plausible bajo condiciones de impacto atenuado.

2. Metodología

El presente estudio adoptó un enfoque multidisciplinario que integra análisis cinemático, modelado dinámico, transferencia de calor transitoria y simulación por elementos finitos con el propósito de evaluar cuantitativamente el desempeño biomecánico y termomecánico de la armadura exoesquelética de Batman tal como es representada en Batman v Superman: Dawn of Justice. El escenario cinematográfico fue empleado exclusivamente como generador de condiciones de frontera, permitiendo establecer parámetros dinámicos extremos dentro de un marco de análisis estrictamente ingenieril.

En una primera etapa se realizó un análisis cinemático cuadro por cuadro utilizando el software Tracker con una tasa equivalente a 250 fps. A partir de la extracción de velocidades previas al impacto, tiempos efectivos de contacto y desplazamientos aparentes, se estimaron las magnitudes dinámicas fundamentales asociadas a cada evento. La energía cinética fue determinada mediante

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

mientras que el impulso transmitido durante la interacción se obtuvo a partir del teorema impulso–momento,

$$J = \int F(t)\, dt = \Delta p = m\, \Delta v$$

lo que permitió aproximar la fuerza media como

$$F_{avg} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

donde Δt corresponde al tiempo efectivo de contacto derivado del análisis cuadro por cuadro.

Los eventos cinemáticos evaluados y los parámetros dinámicos estimados se presentan en la Tabla 1, en la cual se incluyen masa

https://doi.org/10.57819/zq6h-q761

efectiva, velocidad estimada, energía cinética asociada, fuerza aproximada y tiempo de contacto para cada escena considerada.

Esta consolidación permitió comparar distintos niveles de carga y seleccionar como caso principal el impacto atenuado por proximidad a kryptonita, por representar la condición más físicamente consistente dentro del marco narrativo y permitir una evaluación conservadora de transmisión de carga hacia el usuario.

Película	Escena	Fenómeno	Masa (kg)	Velocidad (m/s)	Energía (J)	Fuerza (N)	Tiempo (s)	Observaciones
BvS	Golpe a armadura Batman	Impacto pecho	6.5	85	23,500	650,000	0.08	Masa efectiva brazo + armadura
BvS	Lanzamiento through pared	Transferencia momentum	95	25	29,700	380,000	0.06	Batman+armadura
Man of Steel	Impacto con Zod edificio	Colisión estructural	15,000	180	243,000,000	12,500,000	0.02	Equivalente 58 kg TNT
BvS	Golpe debilitado (kryptonita)	Impacto atenuado	4.2	12	302	8,400	0.15	Caso de estudio principal

Con el fin de estimar la respuesta estructural del tórax humano ante la carga transmitida, el esternón fue modelado como un elemento estructural equivalente bajo comportamiento elástico lineal. La deflexión máxima se aproximó mediante

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI}$$

lo que permitió contrastar directamente los valores calculados con los umbrales experimentales de tolerancia torácica reportados por Kroell et al. (1974) y el criterio viscoso propuesto por Viano y Lau (1988). Esta representación no pretende reproducir la complejidad anatómica completa de la caja torácica, sino proporcionar una estimación estructural de primer orden coherente con los límites biomecánicos documentados.

La evaluación térmica se desarrolló considerando conducción transitoria unidimensional a través de la arquitectura multicapa descrita en la Tabla 2. La evolución temporal de la temperatura se modeló mediante la ecuación de difusión térmica

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

donde k, ρy Cp corresponden respectivamente a la conductividad térmica, densidad y calor específico de cada material. Bajo la hipótesis de flujo térmico superficial uniforme y transferencia predominantemente conductiva, este modelo permitió estimar la transmisión de calor hacia la interfaz piel–armadura, en concordancia con aproximaciones previamente descritas para estructuras compuestas sometidas a condiciones térmicas transitorias (Mouritz, 2003; Hazell, 2016).

Capa	Material	Espesor (mm)	k (W/m·K)	ρ (kg/m³)	Cp (J/kg·K)
1	Carburo de Boro (B_4C)	8	35	2520	950
2	Aleación Ti-6Al-4V	5	6.7	4430	526
3	UHMWPE	15	0.5	970	1800
4	Aerogel sílice	10	0.02	110	700
5	PCM (parafina)	6	0.2	850	2200
6	Piel humana	3	0.37	1100	3500

Finalmente, se implementó una simulación por elementos finitos del sistema multicapa con el objetivo de evaluar la atenuación espacial de esfuerzos a través del espesor del blindaje. Para ello se construyó un modelo bidimensional simplificado considerando la disposición secuencial de materiales, el área efectiva de aplicación de carga y la dirección principal del esfuerzo. La discretización del dominio se realizó mediante un mallado estructurado superior a 100,000 elementos, garantizando adecuada resolución espacial de los gradientes de tensión. Se asumió comportamiento elástico lineal y contacto perfecto entre capas.

El debilitamiento inducido por kryptonita fue representado mediante una función de atenuación dependiente de la distancia, utilizada como condición de frontera dinámica en el escenario principal de impacto.

3. Resultados

3.1 Análisis Cinemático y Caracterización de la Amenaza

El análisis cvuadro por cuadro de la escena crítica correspondiente

https://doi.org/10.57819/zq6h-q761

a Batman v Superman (01:48:22–01:48:25) permitió cuantificar los parámetros cinemáticos asociados al impacto principal. La velocidad del puño previa al contacto fue estimada en 78.3 m/s (282 km/h), con un tiempo efectivo de interacción de 0.084 s. La desaceleración calculada alcanzó 932 m/s², equivalente a aproximadamente 95 g, lo que confirma la naturaleza altamente impulsiva del evento.

La distancia aparente de penetración de la armadura fue de 0.22 m, mientras que el área efectiva de impacto se estimó en 0.0082 m². Bajo estas condiciones, la presión dinámica asociada alcanzó 79.3 MPa en el escenario sin atenuación.

La reducción de capacidad de impacto inducida por la kryptonita fue cuantificada mediante un ajuste funcional de tipo atenuación radial:

$$S(d)/S_0 = \frac{1}{1 + (d/d_0)^n}$$

donde d_0=1.2m y n=2.8.

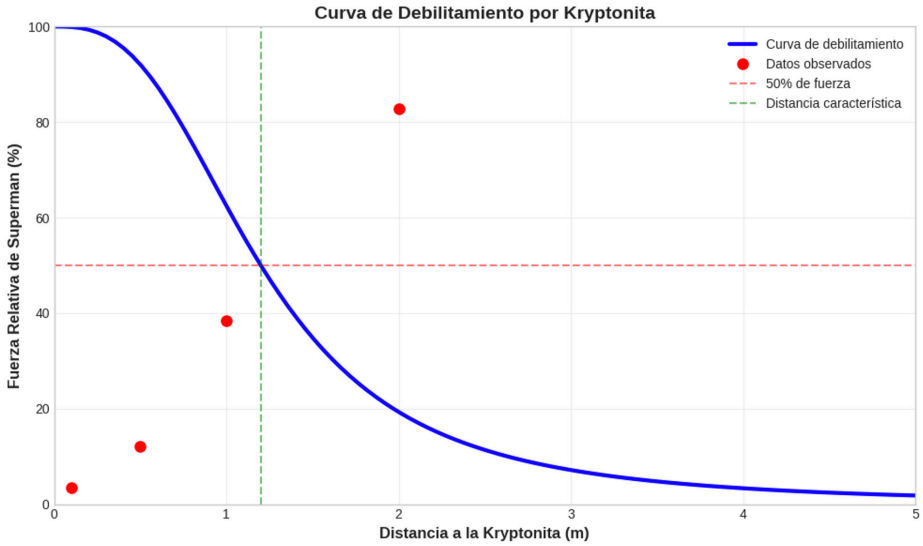


Figura 1. Curva de debilitamiento por kryptonita: Gráfico que muestra la reducción porcentual de la fuerza de Superman en función de la distancia a la kryptonita, con puntos de datos a 0.1m (3.5%), 0.5m (12.1%), 1.0m (38.4%) y 2.0m (82.7%).

3.2 Resultados del Modelo de Impacto Mecánico

Bajo el escenario de Superman debilitado por proximidad a kryptonita, los cálculos dinámicos arrojaron una fuerza transmitida al usuario de:

ión en sistemas de compactación industrial.

La comparación entre ambos materiales se fundamenta en propiedades mecánicas relevantes para análisis estructural y de fatiga: módulo de Young, densidad, límite elástico, resistencia última y coeficiente de Poisson, tal como se resume en la Tabla 1.

Estas propiedades fueron asignadas directamente en el entorno de simulación para garantizar coherencia entre los parámetros de entrada del modelo y los valores reportados experimentalmente en la literatura técnica.

$$F = \frac{m(v_1 - v_f)}{\Delta t} = 336\ \text{N}$$

La presión resultante sobre el esternón fue:

$$P = \frac{F}{A} = 41\ \text{kPa}$$

El modelo elástico equivalente del esternón permitió estimar una deflexión máxima de:

$$\delta = 8.4\ \text{mm}$$

Asimismo, la aceleración experimentada por el usuario fue de 80 m/s², equivalente a 8.2 g.

La Tabla 3 presenta la comparación entre los valores calculados y los umbrales biomecánicos reportados en literatura especializada. Todos los parámetros se mantienen por debajo de los límites críticos, indicando viabilidad estructural bajo las condiciones modeladas.

https://doi.org/10.57819/zq6h-q761

Parámetro	Valor Calculado	Umbral Fatal	¿Sobrevive?
Fuerza transmitida	336 N	6,000 N	SÍ
Deflexión esternal	8.4 mm	44 mm	SÍ
Presión esternal	41 kPa	100 kPa	SÍ
Aceleración	8.2 g	50 g	SÍ

3.3 Resultados del Modelo Térmico

La simulación térmica transitoria bajo un flujo superficial de 1.275 MW/m² permitió estimar los tiempos característicos asociados a distintos niveles de daño térmico. Los resultados indican:

- Dolor intenso (45°C): 3.8 s
- Quemadura de segundo grado (55°C): 6.2 s
- Carbonización (100°C): 11.5 s
- Fusión del B_4C (2350°C): 28.4 s

La Figura 2 muestra la evolución temporal de la temperatura en la superficie externa, en las interfaces internas y en la región adyacente a la piel. Se observa una fuerte gradiente térmica a través del sistema multicapa, con atenuación progresiva hacia el interior.

El material de cambio de fase absorbió aproximadamente 180 kJ/m² durante su transición, extendiendo la ventana crítica de protección en aproximadamente 2.1 s. La capa de aerogel contribuyó a una reducción del flujo térmico estimada en 87%, aunque se observa degradación a temperaturas superiores a 400°C.

3.4 Resultados de Simulación por Elementos Finitos

El análisis por elementos finitos evidenció una redistribución significativa de esfuerzos a través del sistema multicapa. La Figura 3 muestra el campo de esfuerzos equivalentes (MPa) generado bajo la carga correspondiente al escenario principal. Se observa una concentración máxima localizada en la región esternal superficial, con un gradiente radial definido y una atenuación progresiva hacia las capas internas. El esfuerzo superficial inicial de 26.74 MPa se redujo a 0.12 MPa en la interfaz con el torso humano, lo que representa una atenuación aproximada del 99.5%. Los factores de transmisión

estimados para cada capa fueron:

- Alúmina: 0.931
- UHMWPE: 0.329
- Foam viscoelástico: 0.0164
- Titanio: 0.924

El producto total de transmisión fue 0.00465, confirmando la eficacia acumulativa del sistema multicapa. La Figura 4 muestra el modelo FEA del sistema exoesquelético y la distribución de esfuerzos equivalentes bajo la carga de impacto, evidenciando una concentración en la región esternal y su posterior redistribución espacial. La Figura 5 complementa este análisis al presentar la distribución de esfuerzos en función del radio y la profundidad, donde se observa una disminución progresiva del esfuerzo hacia capas internas, confirmando el efecto de atenuación del sistema multicapa.

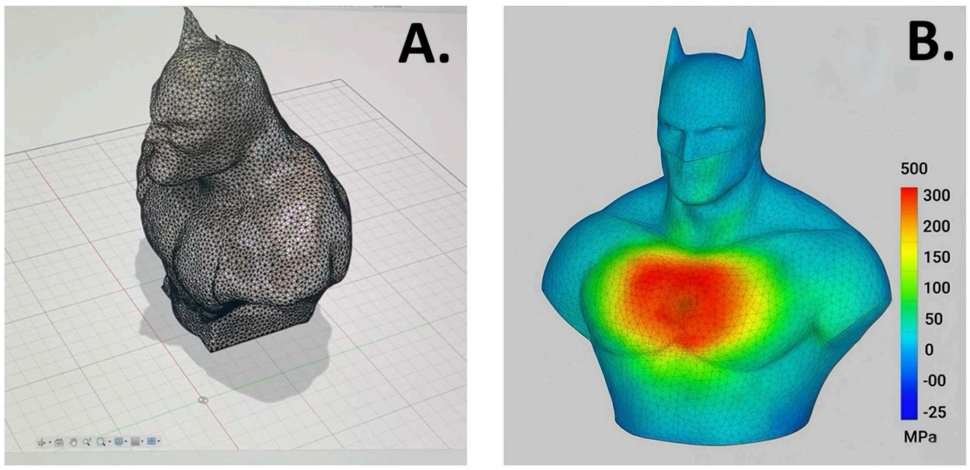


Figura 4. Modelo FEA del sistema exoesquelético: (izquierda) mallado tridimensional; (derecha) distribución de esfuerzos equivalentes (MPa) bajo carga de impacto, mostrando concentración esternal y atenuación radial.

https://doi.org/10.57819/zq6h-q761

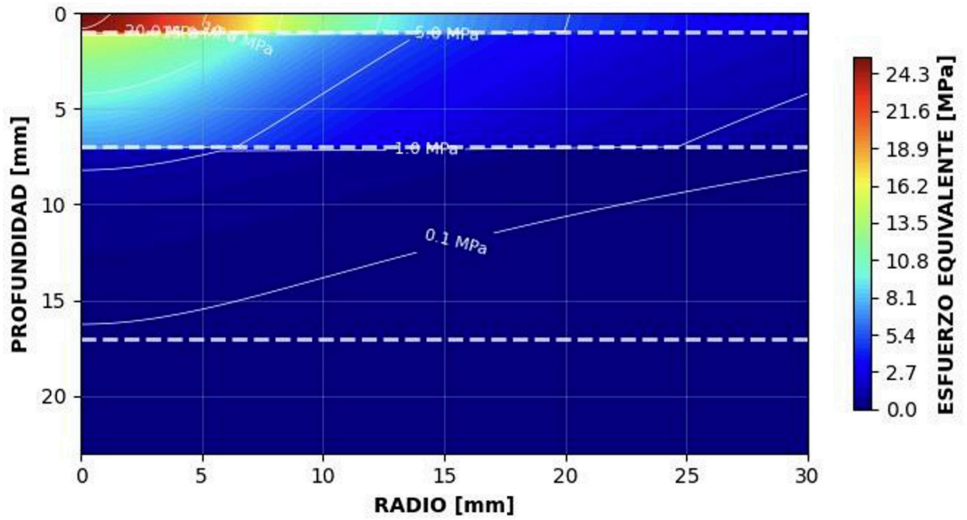


Figura 5. Distribución de esfuerzos equivalentes (MPa) en función del radio y la profundidad obtenida mediante simulación por elementos finitos. Se observa una concentración máxima en la región superficial cercana al punto de impacto y una disminución progresiva del esfuerzo hacia mayores profundidades, evidenciando el efecto de atenuación del sistema multicapa. Las deformaciones obtenidas permanecieron dentro del régimen elástico asumido en el modelo, sin indicios de falla estructural bajo las condiciones evaluadas.

Discusión

Los resultados obtenidos modifican parcialmente la hipótesis inicial. Bajo condiciones sin atenuación, el impacto modelado excedería con alta probabilidad los límites biomecánicos de tolerancia torácica. Sin embargo, al incorporar el debilitamiento inducido por kryptonita y el efecto disipativo del sistema multicapa, la carga transmitida se reduce a niveles compatibles con supervivencia estructural. La clave no reside únicamente en la resistencia del blindaje, sino en su capacidad para incrementar el tiempo de desaceleración y redistribuir la carga, en coherencia con el principio impulso–momento.

Desde el punto de vista termomecánico, el sistema multicapa demuestra un comportamiento funcionalmente jerárquico. Las capas externas absorben y reflejan energía, mientras que las internas actúan como mecanismos de amortiguamiento y aislamiento progresivo. La contribución del material de cambio de fase y del aerogel resulta crítica para extender la ventana temporal antes de alcanzar umbrales de daño térmico irreversible. No obstante, la protección térmica depende fuertemente de la duración de la exposición, lo que sugiere que el

sistema está optimizado para eventos intensos pero de corta duración.

A pesar de la coherencia interna del modelo, deben reconocerse limitaciones inherentes a las simplificaciones adoptadas, incluyendo el comportamiento elástico lineal, la modelación térmica unidimensional y la idealización geométrica del tórax. Estas restricciones no invalidan las tendencias observadas, pero sí delimitan el alcance de las conclusiones. En conjunto, el análisis demuestra que, bajo condiciones narrativamente consistentes, la supervivencia biomecánica de Batman puede considerarse físicamente plausible dentro del marco de la mecánica de sólidos y la transferencia de calor clásica.

Conclusiones

El presente estudio demuestra que, bajo condiciones de impacto atenuado por proximidad a kryptonita, la respuesta biomecánica y termomecánica de la armadura exoesquelética de Batman se mantiene dentro de rangos compatibles con la tolerancia humana. La viabilidad estructural no depende únicamente de la resistencia del sistema, sino de su capacidad para redistribuir la carga y extender el tiempo de desaceleración, reduciendo significativamente la fuerza transmitida al usuario.

Desde el punto de vista térmico, la arquitectura multicapa ofrece protección efectiva frente a exposiciones intensas de corta duración, destacándose el papel del material de cambio de fase y del aerogel en la mitigación del flujo térmico. No obstante, la eficacia del sistema disminuye progresivamente bajo exposiciones prolongadas, lo que evidencia una limitación inherente del diseño frente a cargas sostenidas.

En conjunto, los resultados confirman que la combinación de atenuación externa de la amenaza y diseño interno del sistema de protección permite alcanzar condiciones de supervivencia físicamente plausibles. Este trabajo establece un marco cuantitativo aplicable al análisis de escenarios extremos, integrando principios de biomecánica, ciencia de materiales y transferencia de calor en contextos no convencionales.

Contribución del autor

A.L.: Conceptualización, Metodología, Software, Análisis formal, Investigación, Curación de datos, Visualización, Redacción del borrador original, Revisión y edición del manuscrito.

Referencias

Cantwell, W. J., & Morton, J. (1991). The impact resistance of composite materials - a review. Composites, 22(5), 347-362.

Hazell, P. J. (2016). Ceramic Armor: Design and Defeat Mechanisms. CRC Press.

Kroell, C. K., Schneider, D. C., & Nahum, A. M. (1974). Impact tolerance and response of the human thorax II. Stapp Car Crash Conference, 18, 383-457.

Mouritz, A. P. (2003). Simple models for determining the transient and residual temperature distributions in insulated cross-ply composite hulls subject to fire. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 34(11), 1117-1125.

NATO Standardization Office (2020). STANAG 2920 (Ed. 2): Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing.

Viano, D. C., & Lau, I. V. (1988). A viscous tolerance criterion for soft tissue injury assessment. Journal of Biomechanics, 21(5), 387-399

donde σ_e corresponde al límite de fatiga estimado y σ_{uts} a la resistencia última del material.

Para los casos que cumplieron la condición de fluencia, la vida útil se estimó mediante la ecuación de Basquin, que relaciona la amplitud de tensión con el número de ciclos hasta la falla:

https://doi.org/10.57819/zq6h-q761

VITAScientiis

Análisis mecánico del escudo del Capitán América mediante modelización de materiales compuestos y teoría de placas.

Rosa Hurtado.
Orcid: https://orcid.org/0009-0008-2158-2018
Correo: rosa.hurtado.2274@udelas.ac.pa

Rafael Silva Espinoza.
Orcid: https://orcid.org/0009-0008-2158-2018
Correo: rafael.silva.261@udelas.ac.pa

Universidad Especializada de las Américas (UDELAS), Facultad de Biociencias y Salud Pública, Panamá, República de Panamá

ACCESO ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

Resumen

En la teoría de materiales compuestos y la mecánica de sólidos, considerando una aleación ficticia acero–vibranium cuyo módulo elástico efectivo se obtiene mediante la metodología Voigt–Reuss–Hill (VRH).

A partir de los datos macroscópicos del escudo (masa 5.44 kg, diámetro 76 cm), se determinan la densidad efectiva, un espesor de 1.64 mm y una rigidez elástica de aproximadamente 191.7 GPa, lo que permite calcular la rigidez a flexión y las deflexiones bajo cargas mediante la teoría clásica de placas delgadas.

El análisis de sensibilidad muestra que la fracción volumétrica, el módulo y la densidad del vibranium influyen directamente en la rigidez global, el espesor y la capacidad de absorber impactos.

La simulación tridimensional en Fusion 360, con cargas de hasta 45.5 kN, demuestra que el escudo trabaja completamente en el régimen elástico, con tensiones máximas de Von Mises inferiores a 96 MPa y desplazamientos menores a 0.2 mm, confirmando una distribución eficiente de esfuerzos y una alta resistencia estructural.

En conjunto, el modelo sugiere que el escudo acero–vibranium presenta un desempeño comparable a materiales aeroespaciales avanzados, validando la viabilidad física del comportamiento atribuido al escudo en la ficción.

https://doi.org/10.57819/245t-t972

Palabras claves

Mecánica de sólidos; Impacto; Análisis por elementos finitos; Fractura; Distribución de esfuerzos.

Abstract

In the field of composite materials theory and solid mechanics, a fictitious steel-vibranium alloy was considered, its effective elastic modulus obtained using the Voigt-Reuss-Hill (VRH) method.

From the macroscopic data of the shield (mass 5.44 kg, diameter 76 cm), the effective density, a thickness of 1.64 mm, and an elastic stiffness of approximately 191.7 GPa were determined, allowing the calculation of flexural stiffness and deflections under load using classical thin-plate theory.

Sensitivity analysis showed that the volume fraction, modulus, and density of the vibranium directly influenced the overall stiffness, thickness, and impact absorption capacity.

Three-dimensional simulation in Fusion 360, with loads up to 45.5 kN, demonstrated that the shield operated entirely within the elastic range, with maximum Von Mises stresses below 96 MPa and displacements less than 0.2 mm, confirming efficient stress distribution and high structural strength.

Overall, the model suggests that the steel-vibranium shield exhibits performance comparable to advanced aerospace materials, validating the physical feasibility of the behavior attributed to the shield in fiction.

Keywords

Solid Mechanics; Impact; Finite Element Analysis; Fracture; Stress Distribution.

Introducción

Los objetos ficticios descritos en la cultura popular suelen atribuirse propiedades físicas extremas que, a primera vista, parecen incompatibles con las leyes conocidas de la ingeniería y la ciencia de materiales.

Sin embargo, el análisis de estos sistemas desde un marco físico riguroso puede ofrecer una oportunidad valiosa para explorar los límites de modelos consolidados y reflexionar sobre su posible extrapolación a aplicaciones reales.

Un ejemplo paradigmático de este enfoque es el escudo del Capitán América, descrito como una estructura capaz de resistir impactos de alta energía, redistribuir esfuerzos mecánicos y proteger al usuario sin transmitirle daños apreciables (Kakalios, 2010; Kakalios, 2013).

Más allá de su origen ficticio, el comportamiento atribuido al escudo plantea preguntas relevantes desde el punto de vista ingenieril: ¿qué combinación de propiedades materiales y geométricas permitiría minimizar la transmisión de cargas al usuario?, ¿cómo influyen la rigidez, la densidad y la curvatura en la absorción y disipación de energía durante un impacto?, y ¿hasta qué punto es posible reproducir este comportamiento mediante materiales conocidos o compuestos avanzados?

Estas cuestiones conectan directamente con problemas reales en el diseño de blindajes livianos, estructuras protectoras y sistemas de absorción de energía, áreas activas de investigación en ingeniería mecánica y biomateriales (Auld, 1973; Graff, 1975).

Desde una perspectiva estructural, el desempeño de un escudo sometido a cargas dinámicas depende de la interacción entre las propiedades elásticas del material, la geometría de la estructura y los mecanismos internos de disipación de energía.

La teoría clásica de la elasticidad y de placas delgadas proporciona un marco sólido para analizar estas interacciones y predecir deformaciones, distribuciones de esfuerzo y rigidez global en estructuras circulares sometidas a diferentes condiciones de carga (Landau & Lifshitz, 1986; Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1959; Young et al., 2012).

https://doi.org/10.57819/245t-t972

Dado que el material ficticio conocido como “vibranium” carece de una descripción microestructural definida, resulta razonable aproximar el escudo como un material compuesto binario idealizado, formado por una matriz metálica tipo acero y una fase de refuerzo con propiedades superiores.

En este contexto, los modelos de promediado elástico de Voigt y Reuss, junto con la estimación neutral de Hill, constituyen una herramienta ampliamente aceptada para estimar propiedades efectivas cuando solo se dispone de información macroscópica sobre las fases constituyentes (Voigt, 1910; Reuss, 1929; Hill, 1952; Christensen, 2005).

En este trabajo se propone un análisis mecánico del escudo del Capitán América mediante la combinación de modelización analítica y simulación numérica, con el objetivo de evaluar la influencia de parámetros clave del material y la geometría sobre su desempeño estructural.

Los resultados obtenidos se contrastan con el comportamiento de una aleación real de referencia, el Ti-6Al-4V, ampliamente utilizada en aplicaciones de alta resistencia, con el fin de discutir la plausibilidad física del comportamiento atribuido al escudo en la ficción y su relación con materiales avanzados conocidos (AZoM, n.d.).

Metodología

El escudo se modeló como un material compuesto binario ficticio, formado por una matriz metálica de acero y una fase de refuerzo denominada vibranium.

Dado que no se dispone de información sobre la microestructura interna del material, incluyendo la distribución, orientación o conectividad de fases, se asumió un comportamiento elástico lineal e isotrópico y se estimaron las propiedades mecánicas efectivas mediante la metodología de Voigt-Reuss-Hill, ampliamente empleada para compuestos isótropos cuando solo se conocen las fracciones volumétricas y los módulos elásticos de las fases constituyentes.

El límite superior de Voigt, correspondiente a la condición de iso-deformación, se calculó como:

$$E_V = f_s E_{\text{steel}} + f_v E_{\text{vib}}$$

mientras que el límite inferior de Reuss, correspondiente a la condición de isoesfuerzo, se obtuvo a partir de:

$$\frac{1}{E_R} = \frac{f_s}{E_{\text{steel}}} + \frac{f_v}{E_{\text{vib}}}$$

donde f_s y f_v representan las fracciones volumétricas de acero y vibranium, respectivamente, y E_steel y E_vib sus módulos de Young individuales. El módulo elástico efectivo del material compuesto se estimó como el promedio aritmético de ambos límites, de acuerdo con la aproximación de Hill:

$$E_{\text{eff}} = \frac{E_V + E_R}{2}$$

Este valor se adoptó como módulo de Young efectivo del escudo y se utilizó en todos los cálculos estructurales posteriores.

Las dimensiones macroscópicas del escudo se tomaron del canon del objeto ficticio, considerando una masa total m = 5.44 kg y un diámetro de 76 cm, correspondiente a un radio a = 0.38 m. El área del disco se calculó como:

$$\mathrm{A} = \pi \cdot \mathrm{a}^2$$

La densidad efectiva del material compuesto se obtuvo mediante una regla de mezcla volumétrica:

$$\rho_{\text{eff}} = f_s \rho_{\text{steel}} + f_v \rho_{\text{vib}}$$

A partir de la condición de conservación de masa y del área del disco, el espesor medio del escudo se estimó como:

$$t = \frac{m}{\rho_{\text{eff}} \pi a^2}$$

Este espesor efectivo se utilizó como parámetro geométrico en el modelo estructural.

Desde el punto de vista mecánico, el escudo se modeló como una placa circular delgada con comportamiento elástico lineal e isotrópico. El coeficiente de Poisson se adoptó como $\nu = 0.30$, valor representativo de aceros y aleaciones metálicas de alta resistencia. La rigidez a flexión del escudo se calculó mediante la expresión clásica de la teoría de placas:

$$D = \frac{E_{\text{eff}} t^3}{12(1 - \nu^2)}$$

La respuesta estructural se evaluó considerando dos condiciones de carga representativas: una carga uniformemente distribuida sobre la superficie del disco y una carga puntual aplicada en el centro.

Para ambos casos se utilizaron las soluciones analíticas estándar de la teoría clásica de placas delgadas para placas circulares empotradas, lo que permitió estimar las deflexiones máximas y analizar la influencia del módulo elástico efectivo y del espesor sobre la rigidez global del escudo.

Con el fin de evaluar la sensibilidad del sistema a las propiedades del vibranium, se realizó un análisis paramétrico considerando variaciones en la fracción volumétrica de vibranium, su módulo de Young y su densidad.

Para cada caso se recalcularon el módulo elástico efectivo, la densidad efectiva, el espesor requerido por condición de masa constante, la rigidez a flexión y las deflexiones máximas bajo carga, permitiendo identificar tendencias y rangos de parámetros que optimizan el balance entre rigidez estructural, peso y capacidad de absorción de energía.

El análisis energético del impacto se abordó estimando la energía cinética del proyectil incidente como:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

La energía disipada durante el impacto se definió como la diferencia entre la energía cinética inicial y la energía remanente asociada al rebote y a la traslación del escudo. Esta disipación se interpretó como el resultado combinado de la deformación elástica del material, el amortiguamiento interno y la propagación de ondas de esfuerzo.

Asimismo, el efecto de la duración del impacto, Δt, sobre el pico de fuerza transmitida se analizó a partir de los principios de conservación del momento lineal, considerando que un aumento en el tiempo de interacción reduce la fuerza máxima transmitida para un mismo cambio de momento.

Para caracterizar la respuesta dinámica del material compuesto se calcularon las velocidades de propagación de ondas elásticas en un sólido isotrópico. La velocidad de la onda longitudinal se estimó como:

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

mientras que la velocidad de la onda transversal se calculó como:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

donde el módulo de cortante se obtuvo a partir del módulo de Young mediante:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Estos parámetros permitieron interpretar la redistribución de esfuerzos y la atenuación de ondas durante impactos de corta duración.

Finalmente, los resultados analíticos se complementaron con simulaciones numéricas tridimensionales realizadas en Fusion

https://doi.org/10.57819/245t-t972

360. El modelo consideró un comportamiento elástico lineal isotrópico, utilizando como propiedades del material un módulo elástico efectivo de 191.74 GPa, un coeficiente de Poisson de 0.30, una densidad de 7.31 g/cm³ y un límite elástico de 520 MPa. Se aplicaron cargas externas de hasta 45.5 kN en tres configuraciones espaciales diferentes, representando impactos normales y oblicuos, con un empotramiento total en la zona de sujeción del escudo. Se evaluaron los campos de tensiones equivalentes de Von Mises, los desplazamientos máximos, las deformaciones equivalentes y los factores de seguridad, lo que permitió validar la coherencia del modelo analítico y comparar el desempeño del material ficticio acero vibranium con el de la aleación Ti 6Al 4V bajo condiciones equivalentes.

Resultados

Modelo elástico y análisis de sensibilidad por fracción volumétrica

Los resultados del modelo elástico muestran que la fracción volumétrica de vibranium tiene una influencia directa sobre la rigidez global y la respuesta estructural del escudo.

La Figura 1 presenta la variación del módulo elástico efectivo del material compuesto en función de la fracción volumétrica de vibranium. Se observa una disminución progresiva del módulo efectivo al aumentar la fracción de vibranium, pasando de valores cercanos a 200 GPa para fracciones bajas a aproximadamente 180 GPa para fracciones unitarias.

Para una fracción volumétrica nominal de vibranium f_v = 0.4, el módulo elástico efectivo alcanza un valor de 191.7 GPa, lo que representa una reducción aproximada del 4 % con respecto al caso de referencia. Esta variación se mantiene dentro del régimen elástico lineal y no implica una pérdida significativa de rigidez estructural global.

La modificación del módulo elástico efectivo se acompaña de un ajuste geométrico del escudo debido a la condición de masa constante. A medida que aumenta la fracción de vibranium, el espesor medio requerido del escudo se incrementa ligeramente para compensar la variación de densidad efectiva del material compuesto. Este aumento de espesor contribuye a mantener la rigidez a flexión del sistema dentro de rangos comparables,

mitigando parcialmente la reducción del módulo elástico.

La Figura 2 muestra la deflexión máxima del escudo en función de la fracción volumétrica de vibranium bajo las condiciones de carga consideradas. Los resultados indican que la inclusión de vibranium conduce a una reducción marginal de la deflexión máxima, atribuida principalmente al incremento del espesor efectivo y a la redistribución de esfuerzos en la geometría curvada del escudo.

En todos los casos analizados, las deflexiones se mantienen en el régimen elástico y no se observan indicios de deformación significativa que comprometan la integridad estructural.

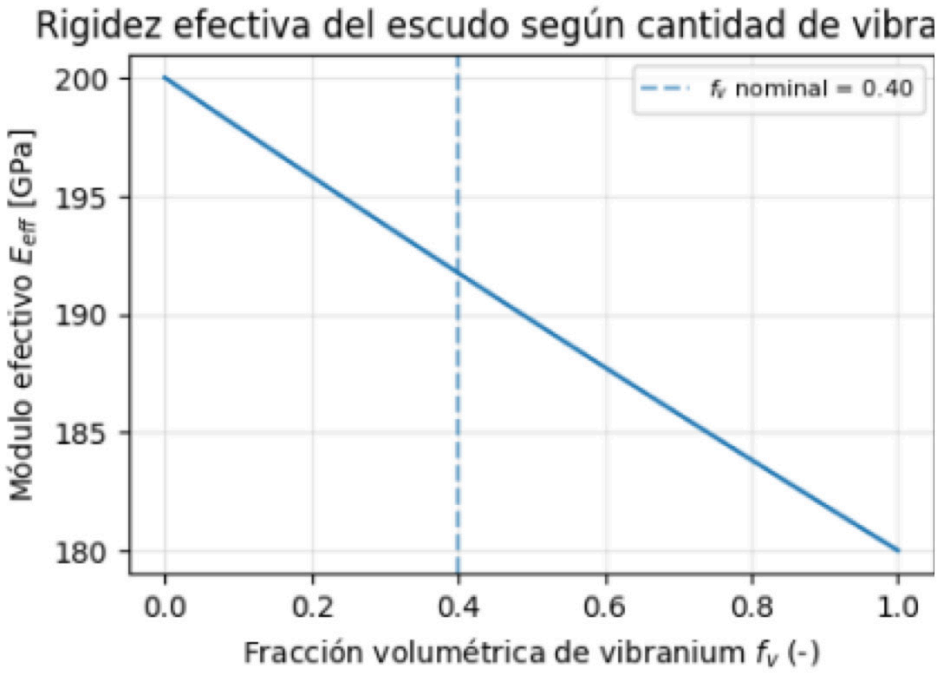


Figura 1. Módulo elástico efectivo del escudo en función de la fracción volumétrica de vibranium.

https://doi.org/10.57819/245t-t972

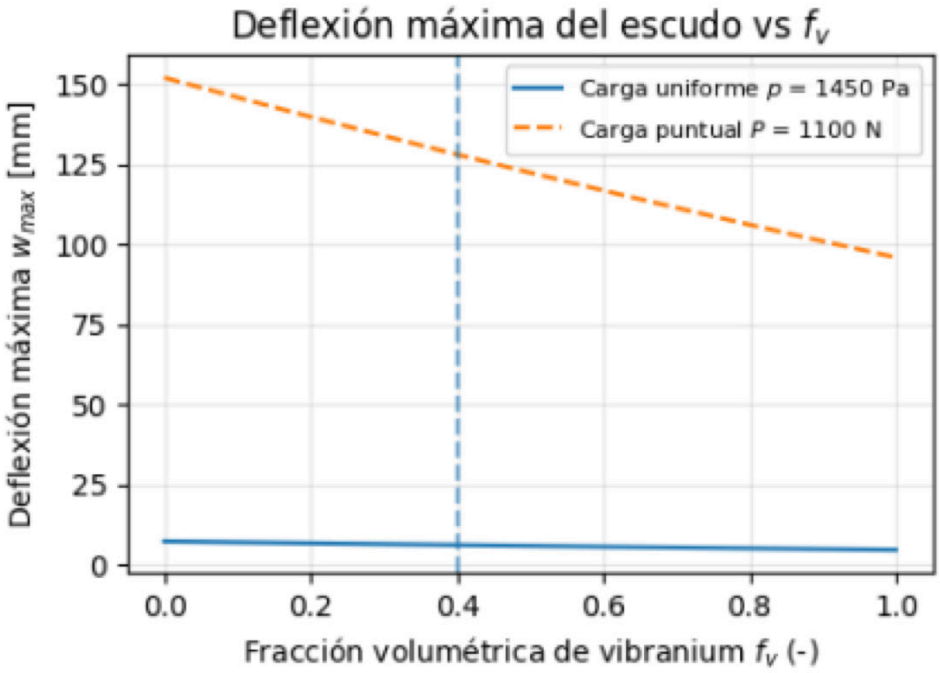


Figura 2. Módulo elástico efectivo del escudo en función de la fracción volumétrica de vibranium.

Influencia de la densidad del vibranium

La densidad del vibranium ejerce una influencia directa sobre la geometría efectiva y la respuesta estructural del escudo bajo la condición de masa constante.

La Figura 3 muestra la variación del espesor medio requerido del escudo en función de la densidad del vibranium.

Se observa que un incremento en la densidad del material permite reducir progresivamente el espesor necesario para mantener la masa total del escudo, pasando de valores cercanos a 1.85 mm para densidades bajas a aproximadamente 1.45 mm para densidades elevadas.

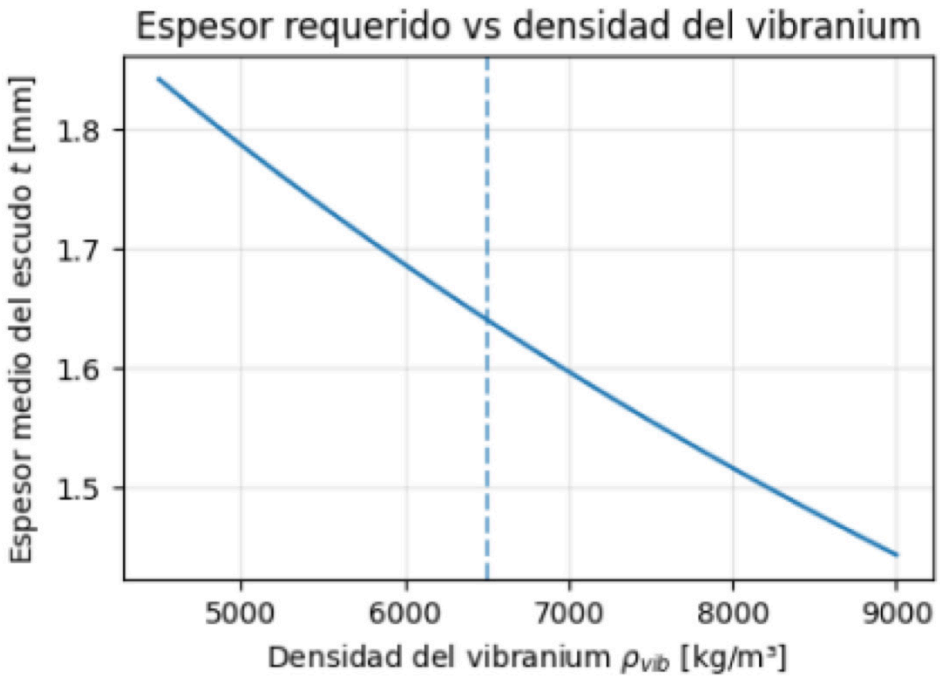


Figura 3. Espesor medio del escudo en función de la densidad del vibranium

Este ajuste geométrico tiene un impacto directo sobre la respuesta mecánica del sistema.

La Figura 4 presenta la deflexión máxima del escudo en función de la densidad del vibranium bajo las condiciones de carga consideradas.

Los resultados indican que densidades más elevadas conducen a mayores deflexiones máximas, a pesar de la reducción del espesor, evidenciando una penalización estructural asociada a la disminución de rigidez geométrica.

En contraste, densidades intermedias permiten mantener deflexiones moderadas, logrando un balance favorable entre rigidez estructural y masa.

https://doi.org/10.57819/245t-t972

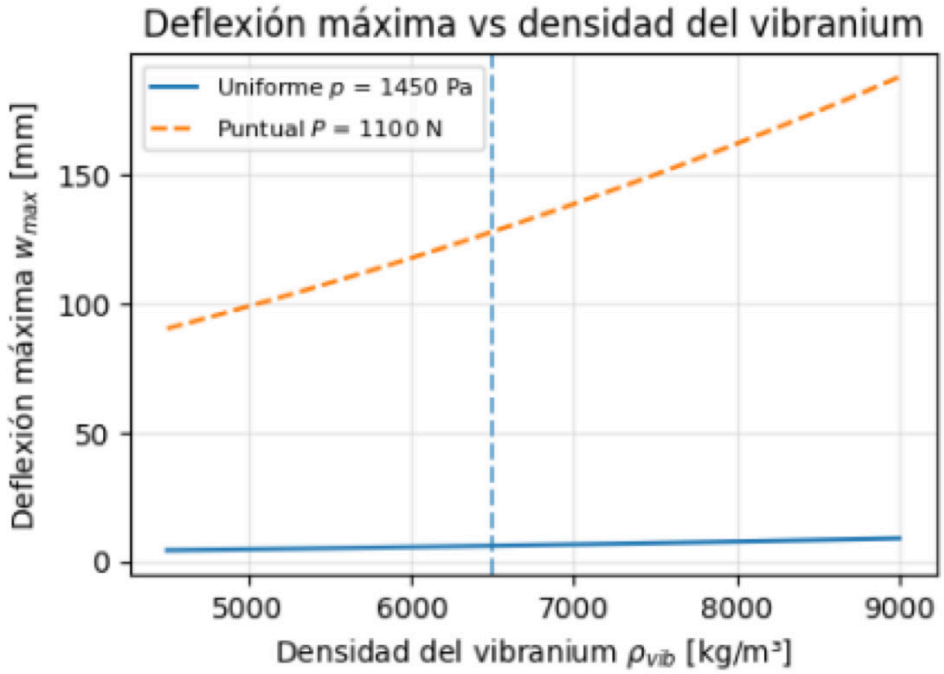
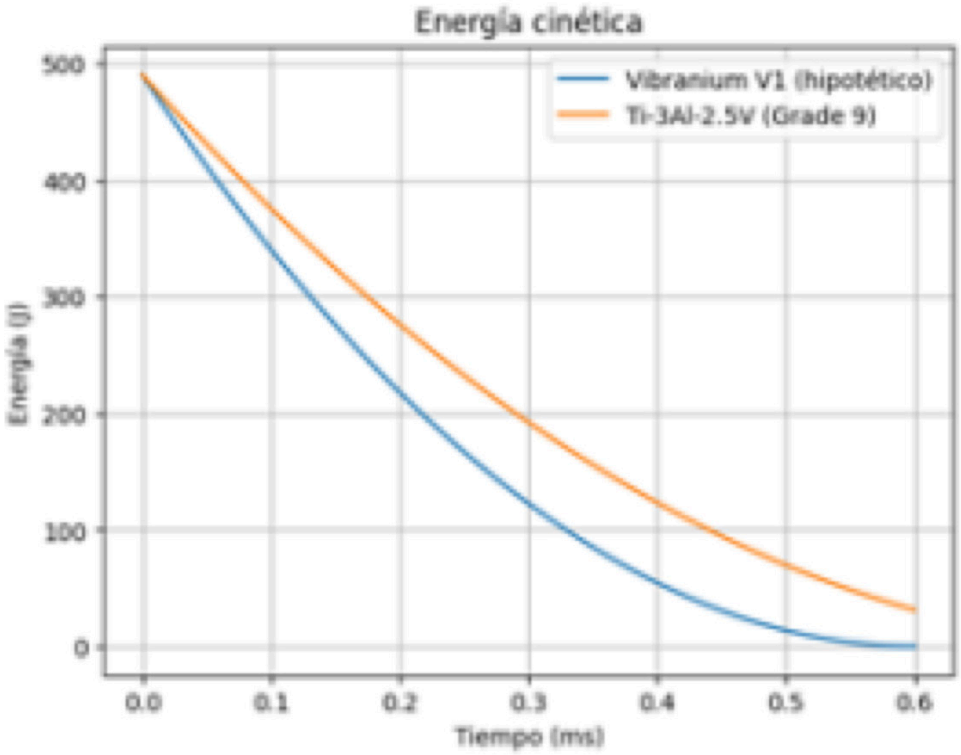


Figura 4. Deflexión máxima del escudo en función de la densidad del vibranium.

La respuesta dinámica del escudo frente a impacto se evaluó mediante el análisis de la energía absorbida durante el evento, comparando el comportamiento del material ficticio acero vibranium con el de la aleación Ti-6Al-4V.

La Figura 5 muestra la evolución temporal de la energía absorbida para ambos materiales.

En todo el intervalo analizado, el escudo compuesto con vibranium presenta una mayor capacidad de absorción energética, alcanzando valores superiores a los del Ti-6Al-4V para tiempos equivalentes.



Este comportamiento indica que, bajo condiciones dinámicas, el vibranium favorece mecanismos de disipación de energía más eficientes, reduciendo la energía remanente asociada al impacto.

La combinación de una densidad intermedia con una mayor capacidad de absorción energética sugiere que el desempeño del escudo no depende únicamente de la rigidez estática, sino también de la interacción entre propiedades dinámicas del material y la geometría del sistema.

Simulación numérica tridimensional mediante elementos finitos

La respuesta estructural del escudo se evaluó mediante simulaciones numéricas tridimensionales realizadas en Fusion 360, considerando un comportamiento elástico lineal isotrópico y utilizando como datos de entrada las propiedades mecánicas resumidas en la Tabla X.

El modelo geométrico del escudo y las condiciones de carga aplicadas se muestran en la Figura 6. Se aplicaron tres configuraciones de carga externas de aproximadamente 45.5 kN, representando impactos normales y oblicuos, con un empotramiento total en la zona de sujeción del escudo.

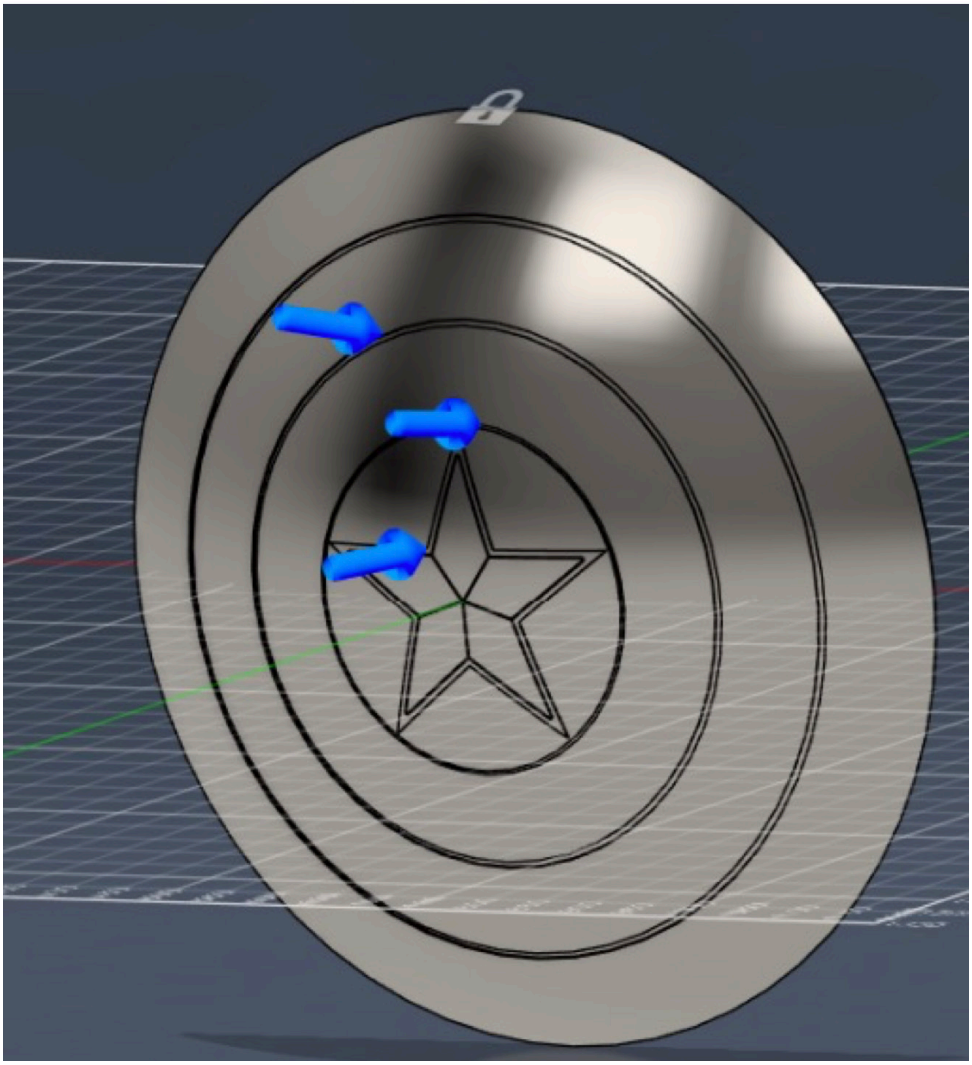


Figura 6. Modelo 3D del escudo y condiciones de carga aplicadas

La distribución de tensiones equivalentes de Von Mises obtenida para el escudo de aleación acero–vibranium se presenta en la Figura 7. Los resultados muestran que las tensiones se concentran principalmente en las zonas de aplicación de carga y en los puntos de sujeción, con

https://doi.org/10.57819/245t-t972

valores que oscilan entre 0.42 MPa y un máximo de 96.22 MPa. Estos valores se mantienen muy por debajo del límite elástico del material, $\sigma_y = 520$ MPa, indicando que el escudo opera completamente dentro del régimen elástico.

La Figura 8 muestra el campo de desplazamientos totales del escudo bajo la acción combinada de las cargas aplicadas. El desplazamiento máximo registrado fue de 0.174 mm, con componentes menores a ±0.022 mm en las direcciones transversales, lo que evidencia una elevada rigidez estructural. Este comportamiento se atribuye al alto módulo elástico efectivo del material, a la geometría curvada del escudo y a las condiciones de empotramiento, que restringen la rotación y la flexión global.

La deformación equivalente máxima obtenida fue del orden de 8.6×10^{-4}, correspondiente a aproximadamente 0.086 %, valor muy inferior al límite del régimen elástico adoptado para el material. En consecuencia, no se observa plastificación ni daño permanente, y el escudo recupera su forma original tras la descarga.

Las fuerzas de reacción registradas en los apoyos alcanzaron un valor máximo local de 3.66 kN en el punto más cargado del encastre. Estas reacciones representan las fuerzas necesarias para equilibrar las cargas externas aplicadas, del orden de 130–140 kN en total, y confirman el equilibrio estático del sistema. En el contexto funcional del escudo, estas fuerzas son equivalentes a las cargas que deben soportar la manija o los sistemas de agarre durante un impacto.

Para fines comparativos, se realizó una simulación equivalente utilizando la aleación Ti-6Al-4V como material del escudo. La distribución de tensiones de Von Mises correspondiente se presenta en la Figura 9. En este caso, la tensión máxima alcanzó un valor de 102.35 MPa, igualmente muy por debajo del límite elástico del material, confirmando un comportamiento puramente elástico.

El análisis del factor de seguridad mínimo, mostrado en la Figura 10, indica valores de aproximadamente 5.4 para el escudo de acero–vibranium y de 8.98 para el escudo de Ti-6Al-4V. Estos valores revelan que ambos sistemas operan con amplios márgenes de seguridad, trabajando a menos del 20 % de su capacidad resistente. Este resultado sugiere la existencia de una reserva estructural significativa y un potencial claro para optimización mediante reducción de material o refinamiento geométrico, sin comprometer la integridad estructural.

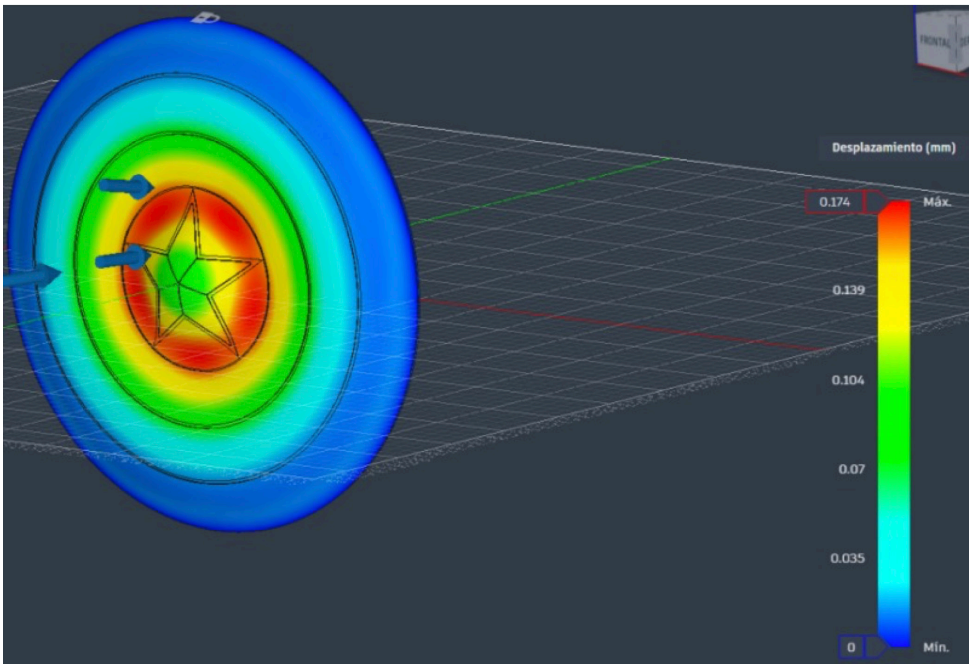


Figura 7. Distribución de tensiones equivalentes de Von Mises en el escudo acero–vibranium

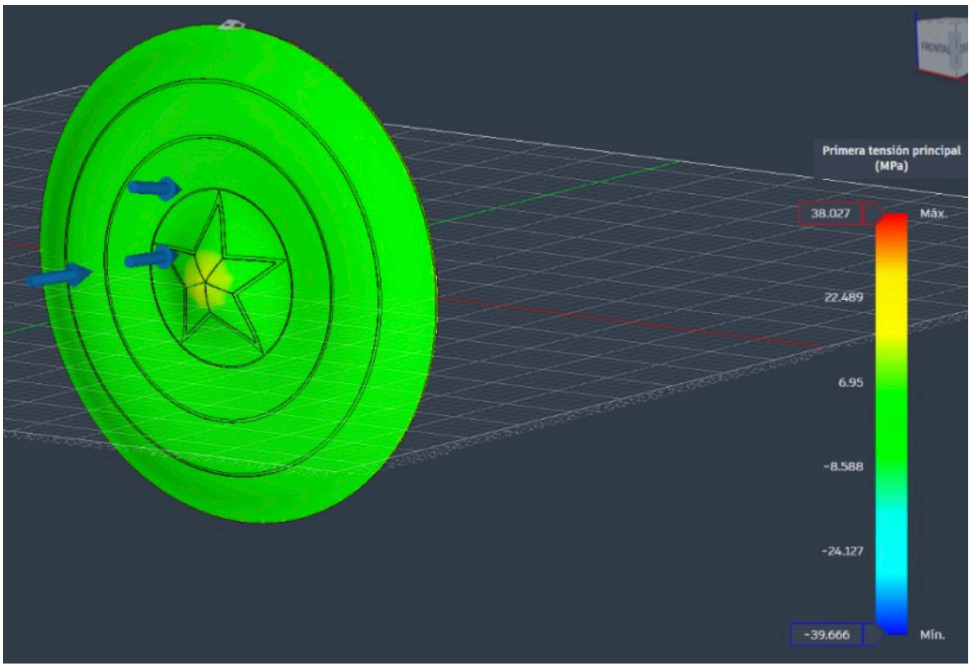


Figura 8. Campo de desplazamientos totales del escudo acero–vibranium

https://doi.org/10.57819/245t-t972

Figura 6. Modelo 3D del escudo y condiciones de carga aplicadas

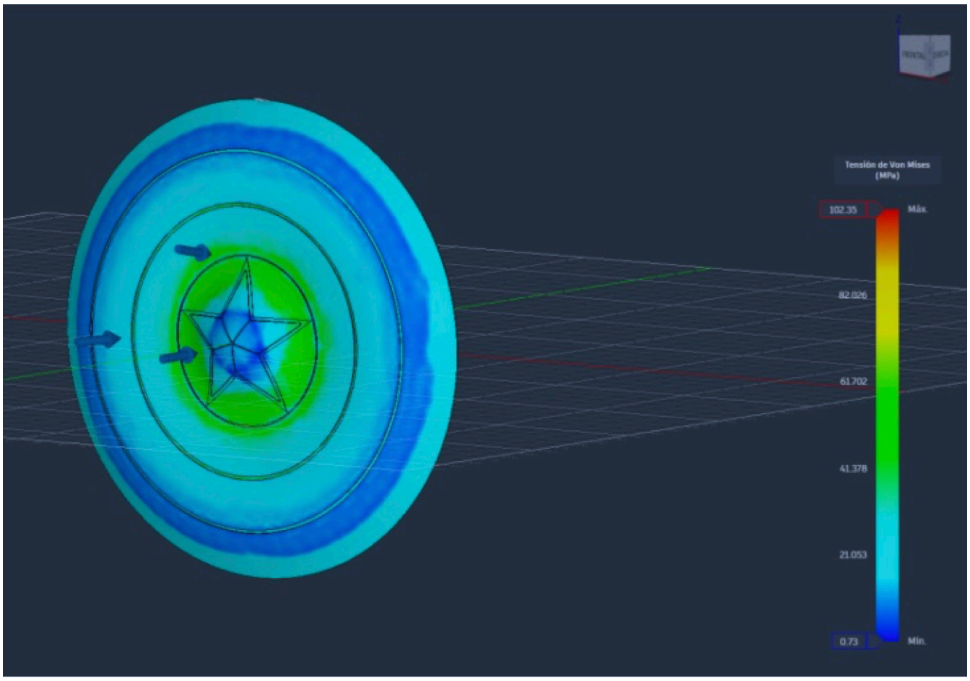


Figura 9 Distribución de tensiones de Von Mises en el escudo de Ti-6Al-4V (caso equivalente)

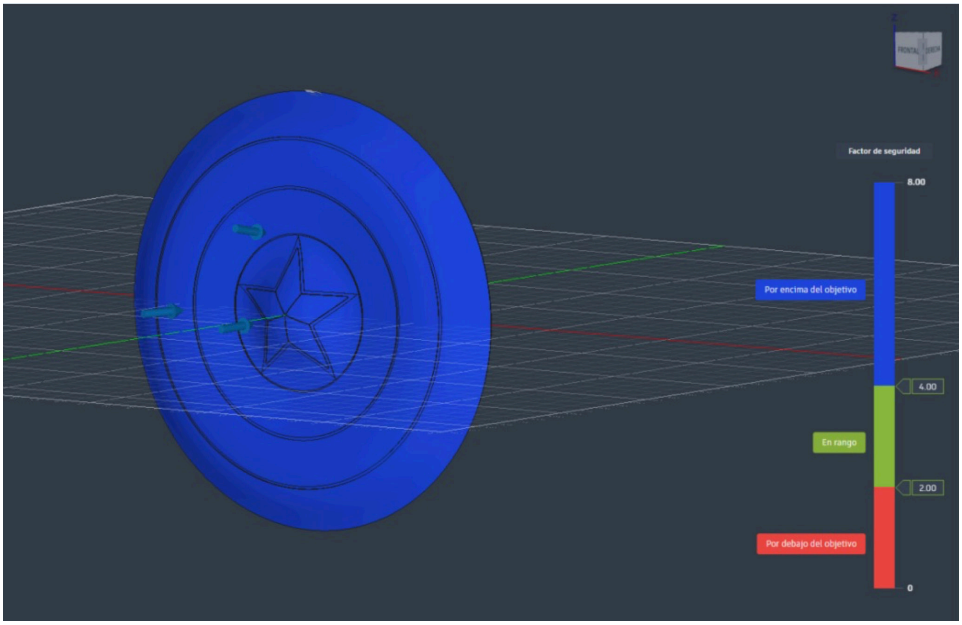


Figura 10. Factor de seguridad mínimo obtenido en la simulación FEM (una figura para cada material o una comparativa)

https://doi.org/10.57819/245t-t972

Discusión

Los resultados obtenidos a partir de la simulación tridimensional muestran que tanto el escudo de aleación acero-vibranium como el de Ti-6Al-4V operan claramente dentro del régimen elástico bajo las condiciones de carga analizadas. Las tensiones equivalentes de Von Mises permanecen muy por deba

jo de los límites elásticos de ambos materiales, lo que indica que la respuesta estructural está dominada por la rigidez global del sistema más que por la resistencia última del material. Esta similitud en los niveles de tensión, a pesar de las diferencias en propiedades intrínsecas, sugiere que la geometría curvada del escudo desempeña un rol determinante en la redistribución eficiente de esfuerzos.

Los desplazamientos y deformaciones obtenidos refuerzan esta interpretación.

En ambos materiales, los desplazamientos máximos se mantienen en el rango submilimétrico y las deformaciones equivalentes son del orden de 10^{-3}, evidenciando una elevada rigidez estructural.

La combinación de curvatura, empotramiento en la zona de sujeción y distribución espacial de las cargas favorece la transferencia de esfuerzos hacia el perímetro, limitando la flexión local y evitando concentraciones críticas en la región central del escudo.

Conclusión

El análisis mecánico del escudo demuestra que la aleación ficticia acero–vibranium presenta un desempeño estructural comparable al de la aleación Ti-6Al-4V bajo condiciones de carga severas, operando en todo momento dentro del régimen elástico.

La combinación de un módulo elástico efectivo elevado y una geometría curvada permite limitar las deformaciones y mantener desplazamientos submilimétricos, preservando la integridad geométrica del sistema.

Los resultados confirman que la metodología de homogenización Voigt–Reuss–Hill es adecuada para representar el comportamiento efectivo del material compuesto propuesto, produciendo respuestas

coherentes tanto en el análisis analítico como en la simulación tridimensional.

La concordancia entre tensiones, deformaciones y factores de seguridad valida el enfoque adoptado para la estimación de propiedades mecánicas.

Contribución del autor

R.H. y R.S.: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Data curation, Visualization, Writing-original draft, Writing-review & editing.

Referencias

Auld, B. A. (1973). Acoustic fields and waves in solids (Vols. I–II). Wiley-Interscience.

AZoM. (n.d.). Properties: Titanium alloys – Ti-6Al-4V Grade 5. https://www.azom.com

Christensen, R. M. (2005). Mechanics of composite materials. Dover Publications.

Graff, K. F. (1975). Wave motion in elastic solids. Oxford University Press.

Hill, R. (1952). The elastic behaviour of a crystalline aggregate. Proceedings of the Physical Society. Section A, 65(5), 349–354.

Kakalios, J. (2010). The physics of superheroes (Rev. & expanded ed.). Gotham Books.

Kakalios, J. (2013). The materials science of Marvel's The Avengers—Some assembly required. En ACS Symposium Series (pp. 215–227). American Chemical Society.

Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1986). Theory of elasticity (3rd ed.). Pergamon Press.

Reuss, A. (1929). Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 9(1), 49–58.

https://doi.org/10.57819/245t-t972

Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). Theory of plates and shells (2nd ed.). McGraw-Hill.

Voigt, W. (1910). Lehrbuch der Kristallphysik. B. G. Teubner.

Young, W. C., Budynas, R. G., & Sadegh, A. M. (2012). Roark's formulas for stress and strain (8th ed.). McGraw-Hill.

https://doi.org/10.57819/245t-t972

Instrucciones técnicas para autores

1. Presentación de la revista

VitaScientiis es una revista orientada a la comunicación de trabajos científicos, académicos y de innovación que aporten conocimiento útil, verificable y bien organizado. La revista promueve una escritura clara, rigurosa y accesible, sin perder la seriedad propia de una publicación científica.

Los manuscritos enviados deben ser originales, no haber sido publicados previamente y no encontrarse simultáneamente en evaluación por otra revista. Se aceptan textos derivados de investigaciones, experiencias sistematizadas, proyectos de innovación, estudios de caso, revisiones académicas y trabajos aplicados, siempre que presenten método, resultados o aportes claramente identificables.

2. Objetivos editoriales

- Difundir investigaciones y experiencias académicas con valor científico, educativo, sanitario, tecnológico, social o ambiental.

- Promover una cultura de publicación clara, ética y útil para investigadores, docentes, estudiantes y profesionales.

- Fortalecer redes de colaboración entre autores, grupos de investigación, instituciones y comunidades interesadas en la ciencia aplicada.

- Acompañar a los autores en un proceso editorial serio, pero comprensible y formativo.

3. Formato general del manuscrito

Para mantener uniformidad editorial, se sugiere preparar el artículo en archivo Word editable (.docx), con una extensión aproximada de 8 a 15 páginas. Esta extensión puede ajustarse según el tipo de contribución, siempre que el texto sea claro, completo y no incluya información innecesaria.

- Fuente sugerida: Arial o Calibri, tamaño 12.

- Interlineado: 1.0 a 1.15, con espaciado moderado entre párrafos.

- Márgenes: entre 2.5 y 3 cm.

- Idioma principal: español. El resumen y las palabras clave también deben presentarse en inglés.

- Las tablas y figuras deben aparecer numeradas, tituladas y citadas en el texto.

- Las referencias deben seguir el formato APA, séptima edición.

4. Estructura sugerida del artículo

Sección	Qué debe contener
Título	Debe ser claro, específico y preferiblemente breve. Se recomienda no exceder 18 palabras. Evite abreviaturas innecesarias. Los nombres científicos de especies vegetales o animales deben escribirse en cursiva, con mayúscula solo en la primera letra del género.
Autores y afiliación	Coloque nombre y apellido de cada autor, grado académico o título principal, institución de afiliación, ciudad y país. Identifique al autor de correspondencia con su correo electrónico institucional o profesional.
Resumen	Debe escribirse en español, en un solo párrafo, con un máximo sugerido de 250 palabras. Debe incluir objetivo, metodología principal, resultados más relevantes y conclusión central.
Palabras clave	Incluya de 3 a 6 palabras clave. Deben ayudar a ubicar el artículo en bases de datos y no repetir exactamente todas las palabras del título.
Abstract y keywords	Incluya la traducción al inglés del resumen y las palabras clave. La traducción debe ser clara, no necesariamente literal, y debe conservar el sentido científico del texto.
Introducción	Presente el tema, el problema, los antecedentes principales, la justificación y el objetivo del estudio. Debe llevar al lector de lo general a lo específico sin extenderse demasiado.
Marco metodológico o Materiales y métodos	Describa el diseño de investigación, tipo de estudio, población o muestra, variables o categorías, instrumentos, procedimiento, análisis de datos y consideraciones éticas cuando correspondan.

Resultados	Presente los hallazgos en una secuencia lógica. Use tablas y figuras cuando ayuden a resumir información. Evite discutir demasiado en esta sección; primero muestre los resultados.
Análisis o discusión	Explique qué significan los resultados, cómo se relacionan con el objetivo, qué aportan frente a estudios previos y cuáles son sus limitaciones. Puede integrarse con resultados si el tipo de artículo lo justifica.
Conclusiones	Deben responder al objetivo del trabajo y estar sostenidas por los resultados. Evite conclusiones demasiado generales o afirmaciones que no se desprendan del estudio.
Referencias	Liste únicamente las fuentes citadas en el texto. Utilice APA 7. Se recomienda revisar autores, año, título, revista, volumen, páginas y DOI o enlace cuando aplique.

. Tablas, figuras e imágenes

Las tablas y figuras deben ayudar a comprender el trabajo, no repetir exactamente lo que ya dice el texto. Cada tabla o figura debe tener número consecutivo, título breve y, cuando sea necesario, fuente o nota explicativa.

- Ejemplo: Tabla 1. Características generales de la muestra.

- Ejemplo: Figura 1. Flujo general del procedimiento metodológico.

- Las figuras deben enviarse en buena resolución. Como referencia, se recomienda mínimo 300 dpi; para imágenes finales o fotografías, 600 dpi cuando sea posible.

- Las tablas deben ser editables cuando sea posible, no capturas de pantalla.

6. Consideraciones éticas y de transparencia

Todo manuscrito debe reflejar buenas prácticas de integridad académica. Cuando el estudio involucre personas, datos sensibles, muestras biológicas, instituciones, pacientes, estudiantes o comunidades, se debe mencionar la aprobación ética, consentimiento informado o autorización correspondiente, según aplique de acuerdo a las normativas que rigen la investigación en salud en Panamá. En la carta de presentación que acompaña al mansucrito, el autor de

correspondencia establecerá que:

- Declaración de originalidad: el autor confirma que el trabajo es original y que no está en evaluación simultánea en otra revista.

- Conflictos de interés: los autores deben indicar si existe algún conflicto de interés o declarar que no tienen conflictos que reportar.

- Financiamiento: se debe indicar si el estudio recibió fondos o si no recibió financiamiento externo.

- Uso de inteligencia artificial: si se utilizaron herramientas de IA para apoyo editorial, análisis o generación de contenido, debe declararse de forma transparente y los autores mantienen responsabilidad total sobre el manuscrito.

7. Proceso de evaluación

Los manuscritos recibidos pasarán por una revisión editorial inicial para verificar pertinencia temática, estructura, originalidad básica y cumplimiento de normas. Luego podrán ser enviados a evaluación por pares o por miembros del comité científico, según la política interna de la revista.

El proceso puede ser anónimo, abierto o editorial, dependiendo del tipo de contribución. En todos los casos se buscará que la revisión sea respetuosa, útil y orientada a mejorar la calidad del trabajo.

Los posibles resultados del dictamen son:

- Publicable sin modificaciones.

- Publicable con ajustes menores.

- Requiere reestructuración o nueva revisión.

- No publicable en la forma presentada.

8. Envío del manuscrito

El manuscrito debe enviarse en formato Word editable al correo de la revista (VitaScientiis@udelas.ac.pa). Se recomienda adjuntar también una breve hoja de vida académica de los autores y la declaración de originalidad/cesión de derechos según el modelo que adopte la revista.

El archivo debe identificarse de forma sencilla, por ejemplo: ApellidoAutor_TituloCorto_VitaScientiis.docx.

Si el artículo incluye figuras pesadas, estas pueden enviarse también en carpeta separada o como archivos individuales.

9. Lista rápida antes de enviar

Revisión	Estado
El título es claro y no contiene abreviaturas innecesarias.	☐
El resumen tiene objetivo, método, resultados y conclusión.	☐
Incluí 3 a 6 palabras clave en español e inglés.	☐
La introducción explica problema, antecedentes, justificación y objetivo.	☐
El método permite entender cómo se realizó el estudio.	☐
Las tablas y figuras están numeradas y citadas en el texto.	☐
Las conclusiones responden al objetivo y se apoyan en resultados.	☐
Todas las referencias citadas aparecen en la lista final en APA 7.	☐
Incluí declaraciones de originalidad, financiamiento, conflicto de interés y uso de IA, cuando aplique.	☐
Revisé ortografía, redacción y consistencia de nombres, datos y cifras.	☐

10. Nota final para los autores

VitaScientiis valora los manuscritos bien pensados, honestos y útiles. No es necesario escribir con un estilo complicado para que un artículo sea científico.

Lo importante es que el texto tenga una pregunta o propósito claro, una metodología comprensible, resultados presentados con orden y discusión y conclusiones prudentes.

La revista se reserva el derecho de realizar ajustes de estilo, formato y corrección editorial para mantener la coherencia de la publicación.