



ACCESO
ABIERTO

Fecha de recepción
abril-2025

Fecha de aceptación
junio-2025

Fecha de publicación
enero-2026

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

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.

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).

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:

$$A = \pi \cdot a^2$$

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

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/cm^3 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.

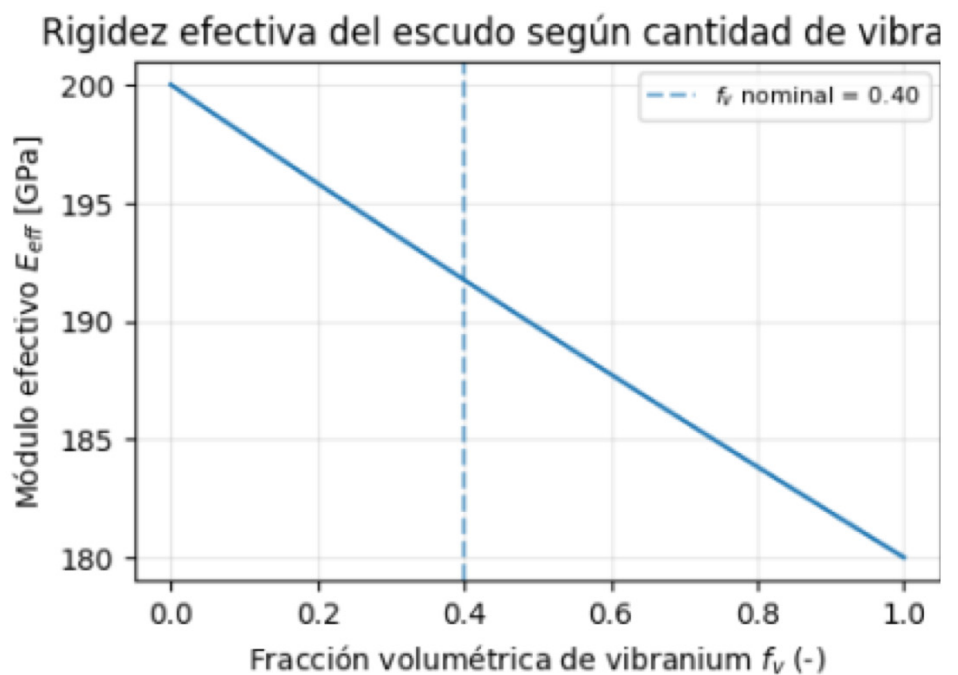


Figura 1. Módulo elástico efectivo del escudo en función de la fracción volumétrica de vibranium.

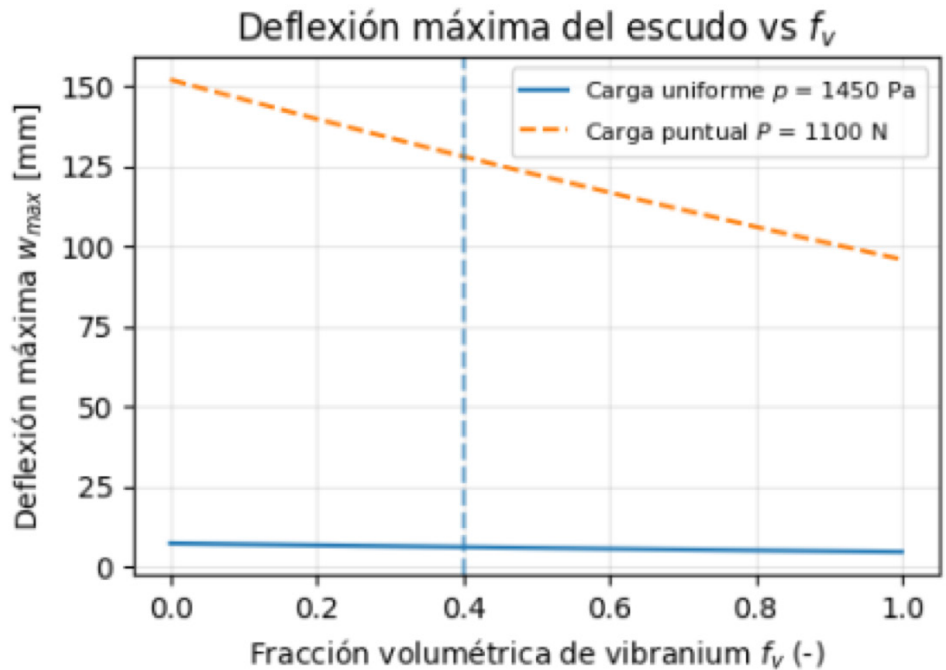


Figura 2. Módulo elástico efectivo del escudo en función de la fracción volumétrica de vibranium.

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.

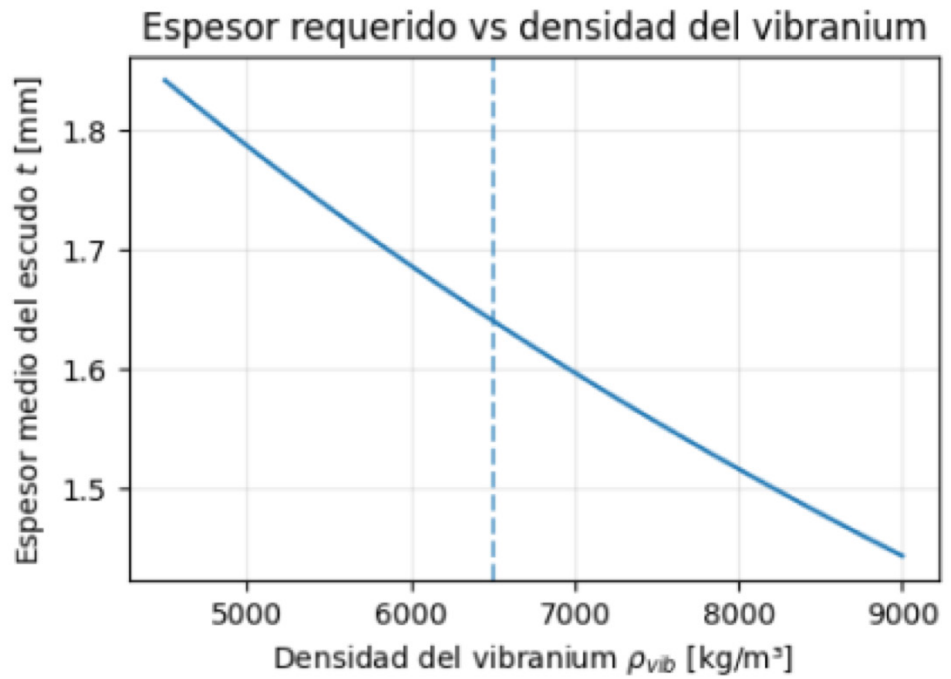


Figura 3. Espesor medio del escudo en función de la densidad del vibranium

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.

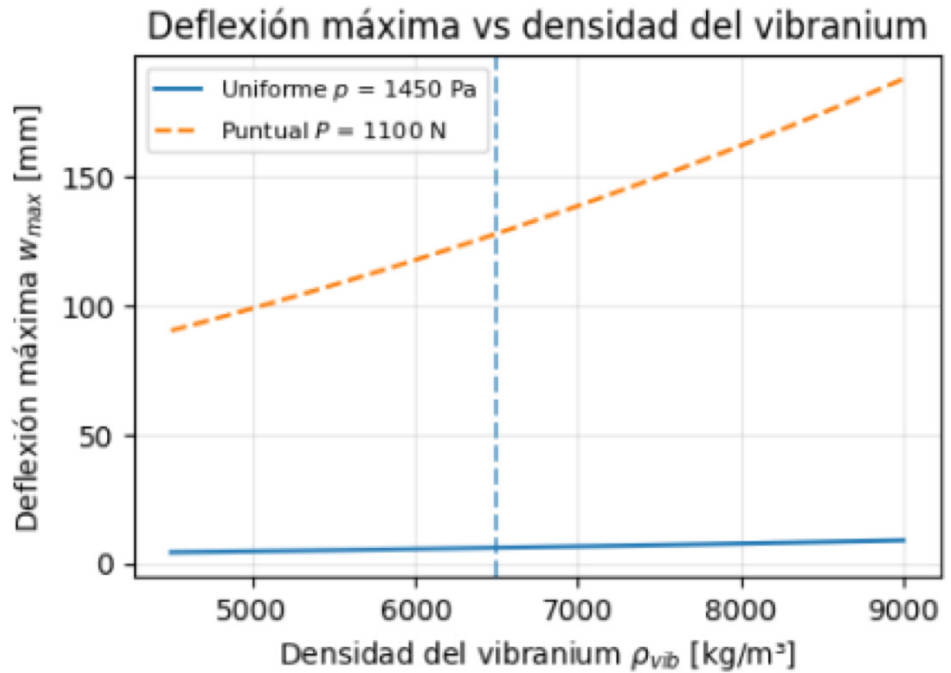
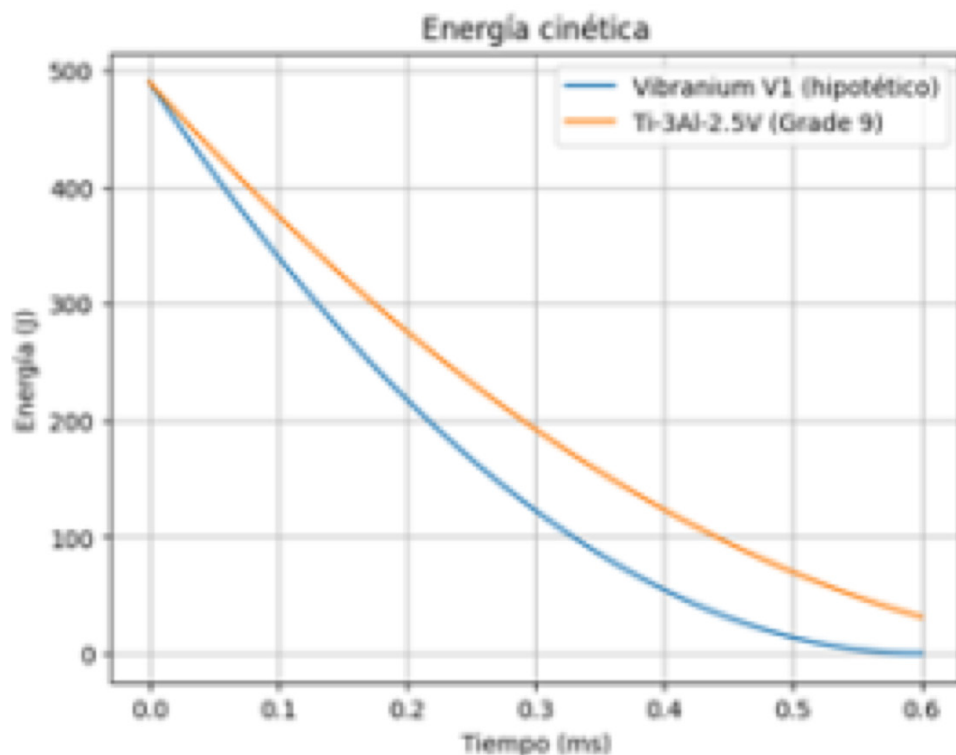


Figura 4. Deflexión máxima del escudo en función de la densidad del vibranium.

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.

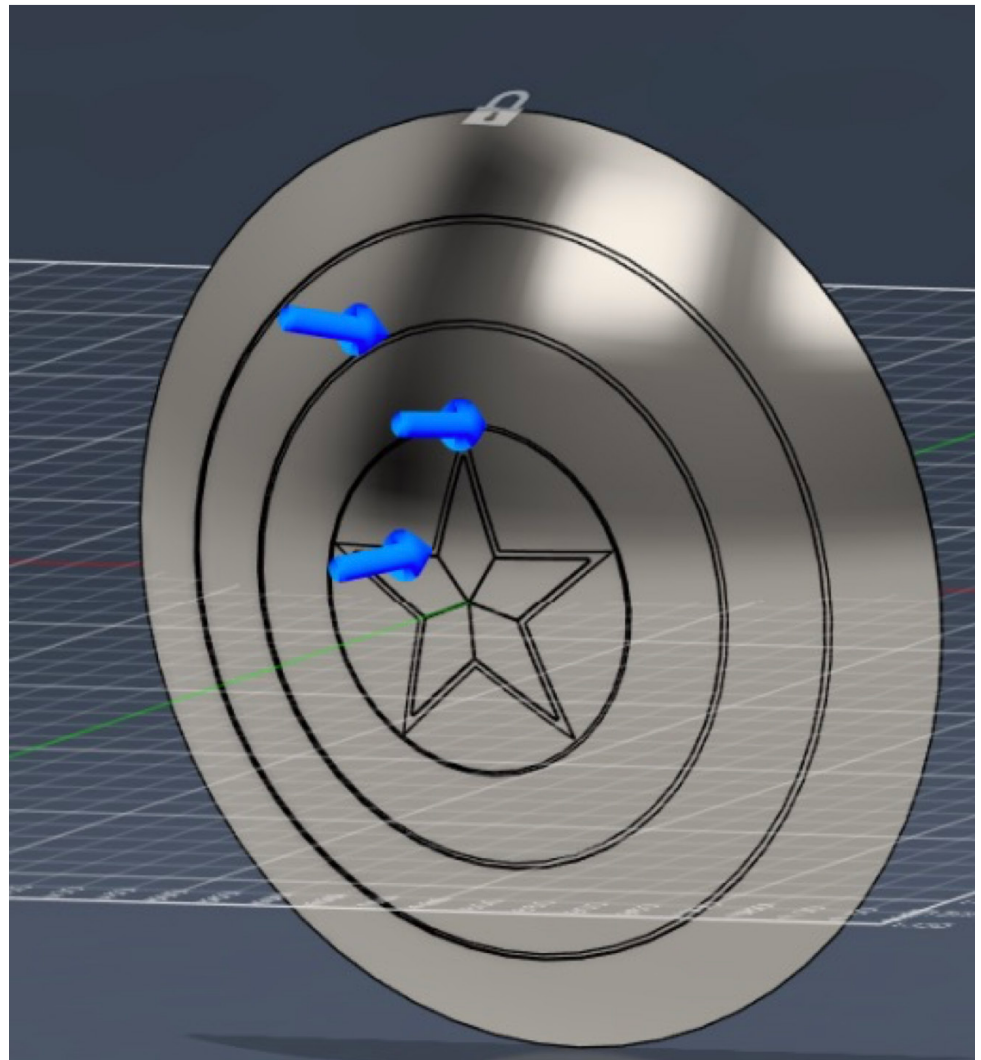


Figura 6. Modelo 3D del escudo y condiciones de carga aplicadas

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

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 encastrado. 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.

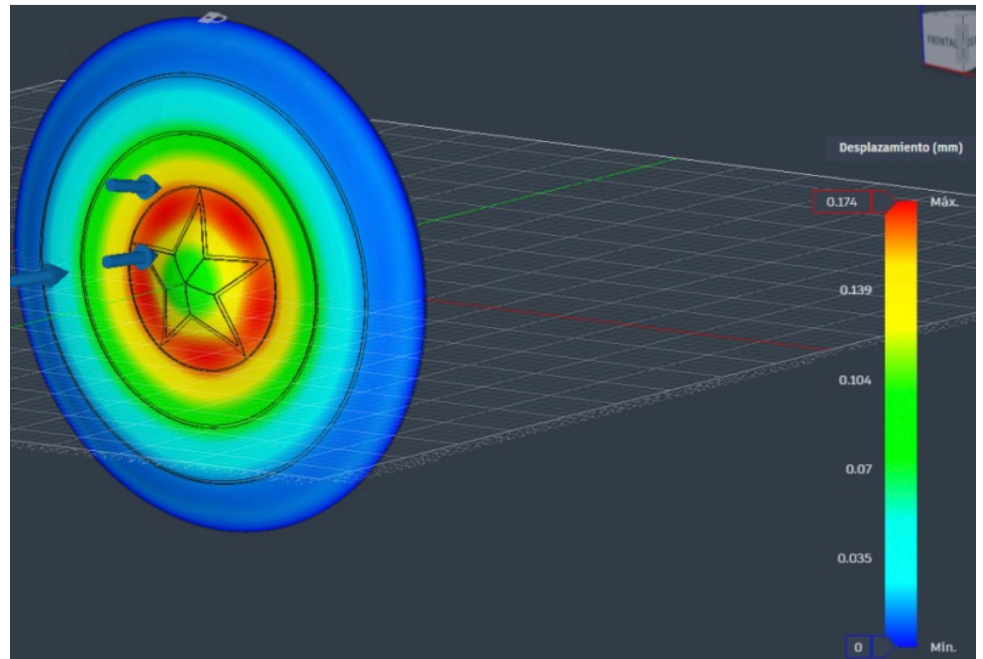


Figura 7. Distribución de tensiones equivalentes de Von Mises en el escudo acero-vibranium

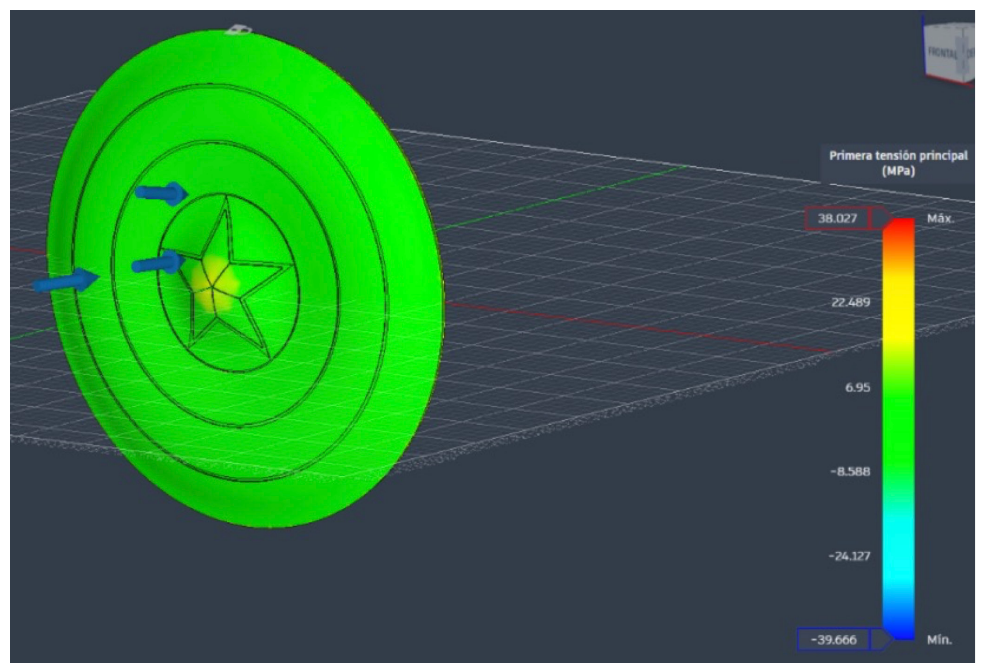


Figura 8. Campo de desplazamientos totales del escudo acero-vibranium

Figura 6. Modelo 3D del escudo y condiciones de carga aplicadas

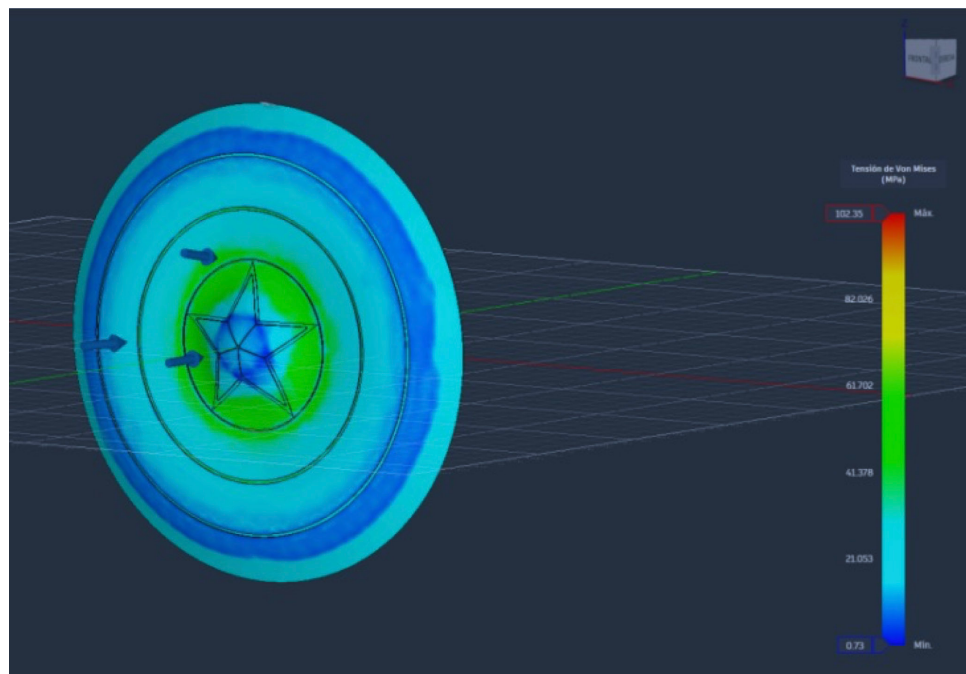


Figura 9 Distribución de tensiones de Von Mises en el escudo de Ti-6Al-4V (caso equivalente)

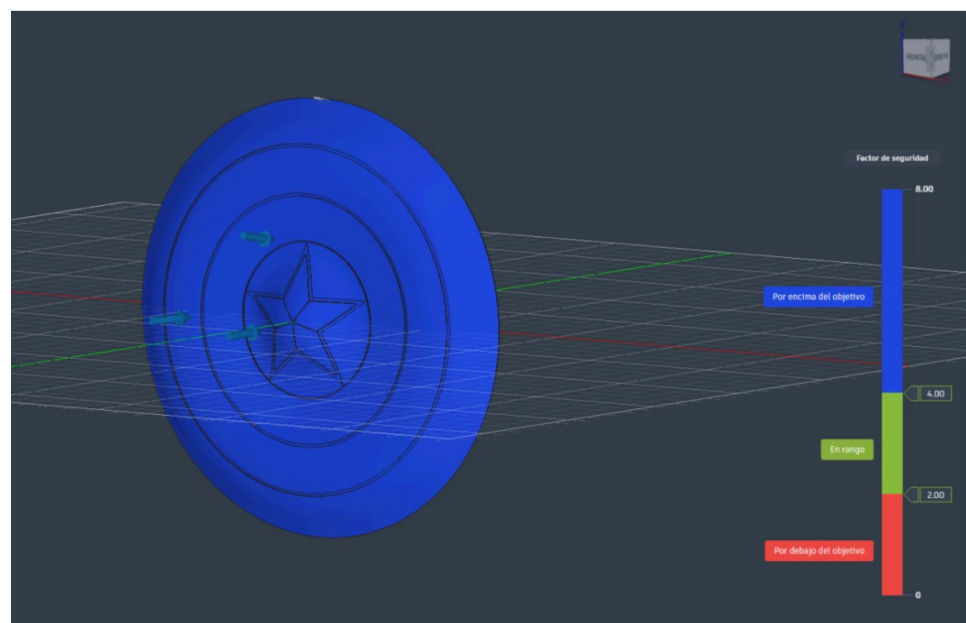


Figura 10. Factor de seguridad mínimo obtenido en la simulación FEM (una figura para cada material o una comparativa)

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 debajo

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.

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.