



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.

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).

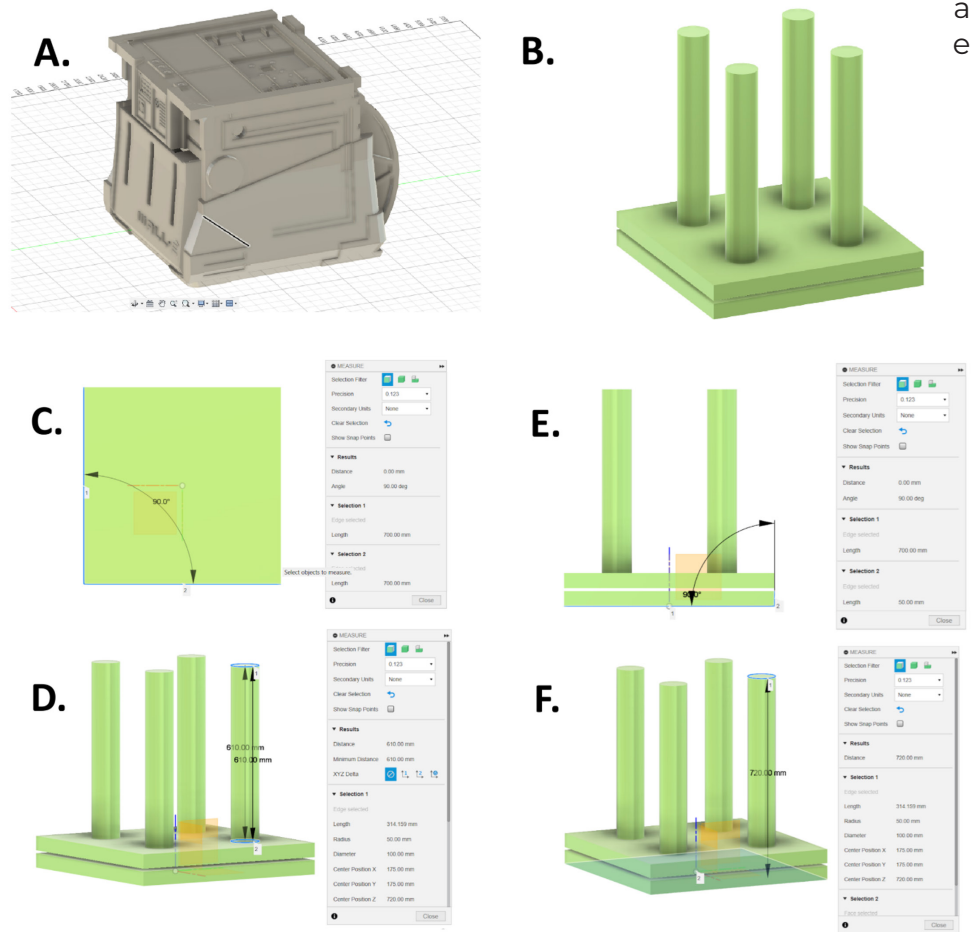


Figura 1. A. Cubo Escaneado de Wall-E. B. Sistema de Compactación. (C) Medidas de la base. (D) Altura y diámetro de los pistones. (E) Grosor de la base y la placa de compactación. (F) Altura máxima del conjunto placa compactadora y base.

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/m ³	≈ 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/m ³	≈ 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 (Milletek 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 m ³ , n.d.; Somade et al., 2020)

Estimación de la presión de compactación

Para definir la carga aplicada sobre la placa compactadora, se

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:

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

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

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 b el 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 $FS \approx 0.789$, confirmando una condición estructural no segura bajo

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 $FS \approx 0.427$ 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 $FS \approx 0.285$ y un desplazamiento máximo de 0.459 mm (Figura 2-F), confirmando una condición de falla estructural inminente independientemente del refinamiento de malla.

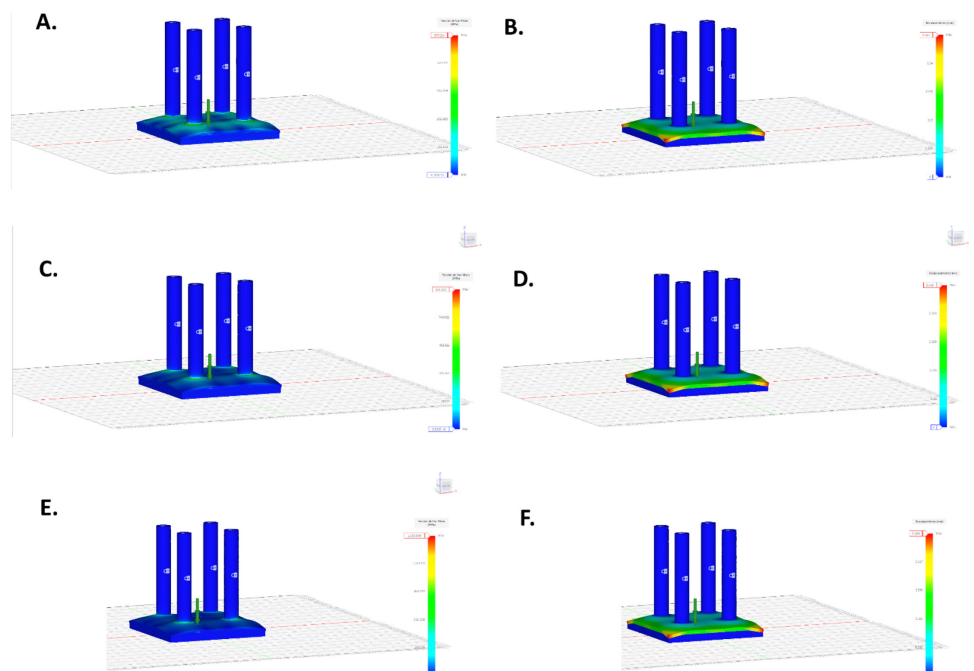


Figura 2. Resultados del análisis por elementos finitos del sistema de compactación bajo una presión uniforme de 6 MPa. (A) Distribución de la tensión equivalente de Von Mises para el acero Hardox 450 utilizando un mallado grueso. (B) Campo de desplazamiento total correspondiente al mismo caso. (C) Distribución 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 $FS \approx 2.12$ 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 $FS \approx 1.16$. 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 $FS \approx 0.79$, indicando una plastificación localizada más que una falla global del componente.

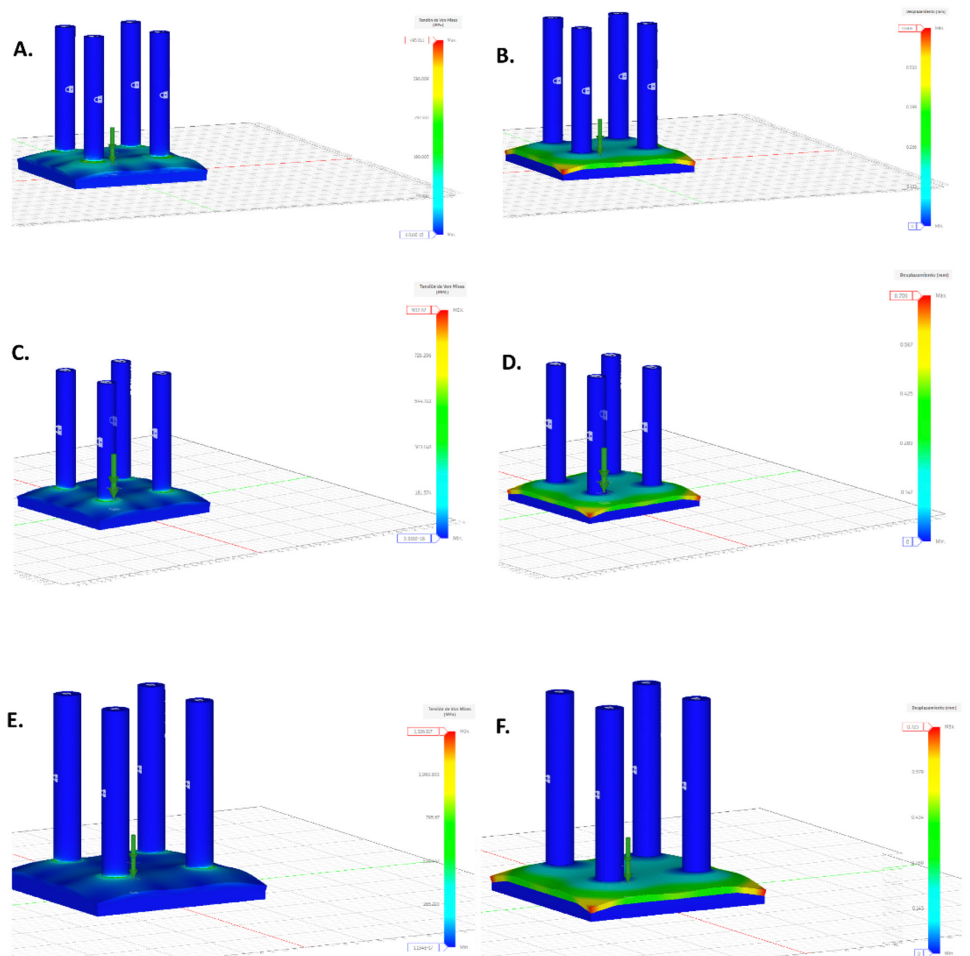


Figura 3. Resultados del análisis por elementos finitos del sistema de compactación fabricado con la aleación Ti-6Al-4V reforzada con nanoplaquetas de grafeno, sometido a una presión uniforme de 6 MPa. (A) Distribución de la tensión equivalente de Von Mises obtenida con mallado grueso, donde el esfuerzo 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 1326 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 $\sim 9\,614$ años, evidenciando que la fatiga no constituye un mecanismo limitante para este material en el sistema de compactación analizado.

Propriedad	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)	—	$\approx 9\,614$

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 geoméricamente limitadas y no comprometen la integridad global del sistema, lo que se refleja en

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_oWBP0fhGt0nVsiYMeM-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.