

Cálculo diferencial para el diseño óptimo de un robot de batalla de 3 libras, minimizando materiales y manteniendo resistencia

Differential calculus for the optimal design of a 3-pound battle robot, minimizing materials while maintaining strength

RESUMEN

La optimización estructural de robots ligeros constituye un reto clave en ingeniería mecánica, particularmente cuando se busca reducir el consumo de material manteniendo la resistencia funcional. Este estudio aborda dicha problemática evaluando tres geometrías de chasis cilíndrica, cúbica y prismática fabricadas en aluminio 6061, acero inoxidable y ABS, con el objetivo de identificar la configuración más eficiente para un robot de batalla de 3 libras. Se aplicó un diseño experimental con enfoque cuantitativo, integrando modelado CAD, simulaciones de análisis por elementos finitos (FEA) y ensayos mecánicos normalizados (ASTM D695 y D790). La recolección de datos incluyó mediciones de área superficial, volumen, peso, resistencia a compresión y flexión, así como consumo de material. Se establecieron tolerancias estrictas y procedimientos de calibración para asegurar la precisión y repetibilidad de las mediciones. Los resultados muestran que la geometría cilíndrica presenta la menor área superficial y consumo de material, con un ahorro del ~8 % frente a las demás configuraciones, manteniendo una resistencia mecánica elevada. Las diferencias entre los valores simulados y experimentales fueron inferiores al $\pm 5\%$, validando la fiabilidad del método FEA como predictor estructural. La discusión evidenció la coherencia de estos resultados con estudios previos en optimización geométrica y validación numérico-experimental, confirmando que la selección de forma y material influye de manera crítica en el desempeño del robot. En conclusión, el trabajo demuestra que es posible diseñar estructuras robóticas ligeras, resistentes y eficientes, aplicando una metodología integrada de modelado, simulación y ensayo físico, con potencial de aplicación en ingeniería y educación.

PALABRAS CLAVE: Geometría cilíndrica, Manufactura aditiva, Optimización estructural, Resistencia mecánica.

ABSTRACT

The structural optimization of lightweight robots represents a key challenge in mechanical engineering, particularly when aiming to reduce material consumption while maintaining functional strength. This study addresses this issue by evaluating three chassis geometries cylindrical, cubic, and prismatic manufactured from 6061 aluminum, stainless steel, and ABS, to identify the most efficient configuration for a 3-pound battle robot. An experimental design with a quantitative approach was applied, integrating CAD modeling, finite element analysis (FEA) simulations, and standardized mechanical testing (ASTM D695 and D790). Data collection included measurements of surface area, volume, weight, compressive and flexural strength, as well as material consumption. Strict tolerances and calibration procedures were established to ensure measurement accuracy and repeatability. The results show that the cylindrical geometry achieved the smallest surface area and material consumption, with approximately 8% savings compared to other configurations, while maintaining high mechanical strength. Differences between simulated and experimental values were below $\pm 5\%$, validating the reliability of the FEA method as a structural predictor. The discussion highlighted the consistency of these findings with previous studies on geometric optimization and numerical-experimental validation, confirming that the choice of shape and material critically influences robot performance. In conclusion, the study demonstrates that it is possible to design lightweight, strong, and efficient robotic structures by applying an integrated methodology of modeling, simulation, and physical testing, with potential applications in engineering and education.

KEYWORDS: Cylindrical geometry, Additive manufacturing, Structural optimization, Mechanical strength.

TECNOCENCIA ACTUAL

Recepción: 05/08/2025

Aceptación: 12/08/2025

Publicación: 31/12/2025

AUTOR/ES

-  **Patricio Eduardo Sanchez Diaz**
-  **Jean Carlos Samaniego Flores**
-  **Henry Sebastián Samaniego Feijoo**
-  **Anthony Alexis Aimara Tite**
-  **Erick Sánchez pico**
-  **Joseph Mateo Vela Padilla**

-  patriciosanchez@uti.edu.ec
-  Jean.samaniego.1c@gmail.com
-  hsamaniego@indoamerica.edu.ec
-  aimaraalexis7@gmail.com
-  esanchez58@indoamerica.edu.ec
-  JosephVela910@gmail.com

-  Universidad Tecnológica Indoamérica
-  Universidad Tecnológica Indoamerica
-  Universidad Tecnológica Indoamerica
-  Universidad Tecnológica Indoamerica
-  Universidad Tecnológica Indoamerica
-  Universidad Tecnológica Indoamerica

-  Ambato - Ecuador
-  Ambato - Ecuador
-  Ambato - Ecuador
-  Ambato - Ecuador
-  Ambato - Ecuador

CITACIÓN:

Sánchez, P. Samaniego, J. Samaniego, S. Aimara, A. Sánchez, E. & Vela, M. (2025). Cálculo diferencial para el diseño óptimo de un robot de batalla de 3 libras, minimizando materiales y manteniendo resistencia. Revista InnovaSciT. 3 (2). 203 – 217.

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería industrial contemporánea, optimizar el uso de materiales se ha convertido en una tarea prioritaria. Diseñar productos que reduzcan el consumo de recursos sin comprometer su funcionalidad no solo representa una ventaja competitiva, sino también una responsabilidad ética ante el contexto ambiental actual. Esta necesidad es particularmente visible en sectores como el del diseño de envases industriales, donde se busca minimizar el área superficial manteniendo un volumen constante. Tal enfoque no solo reduce costos, sino que también disminuye los residuos generados durante la producción (Lu et al., 2022).

Este proyecto traslada dicha lógica al diseño de un robot de batalla de 3 libras, específicamente a su carcasa estructural. Al igual que en los envases, se pretende mantener un volumen interno suficiente para alojar componentes vitales –motores, baterías, placas electrónicas– pero utilizando la menor cantidad posible de material en la construcción del chasis. Aquí, el cálculo diferencial y la optimización matemática se convierten en herramientas esenciales para encontrar relaciones geométricas que maximicen la eficiencia del diseño. A través del uso de funciones multivariantes, se exploran formas que permitan una mejor distribución de tensiones, minimización de peso y aprovechamiento de los recursos.

Esta investigación no parte de cero. Estudios recientes han demostrado que aplicar técnicas matemáticas como las derivadas y los métodos de optimización en entornos prácticos de ingeniería mejora la comprensión conceptual y fomenta la creatividad (Crespo et al., 2020). Además, el diseño de robots con restricciones estructurales representa un campo de innovación en crecimiento dentro de las competencias estudiantiles de robótica (Shi et al., 2023), donde cada gramo cuenta y cada decisión de diseño puede marcar la diferencia entre la victoria y la descalificación.

En este sentido, el presente trabajo no solo responde a una necesidad técnica, sino que también tiene un claro propósito formativo: integrar competencias de múltiples asignaturas del campo de la ingeniería –química, cálculo, dibujo técnico, modelado 3D, estudio del trabajo– en un proyecto aplicado que refleje las condiciones reales del ejercicio profesional. El proceso de diseño de un robot funcional y competitivo se convierte así en una excusa para aprender haciendo, para experimentar desde el error, para validar el conocimiento desde la acción.

Así, el objetivo principal de esta investigación es aplicar técnicas de cálculo diferencial y principios de optimización matemática para diseñar la estructura de un robot de batalla de 3 libras que minimice el uso de material sin perder resistencia ni funcionalidad. Más allá del resultado final, se apuesta por un proceso riguroso, reflexivo y creativo que permita consolidar aprendizajes significativos y transferibles.

Este enfoque demuestra que la matemática aplicada no es un ejercicio abstracto, sino

una herramienta poderosa al servicio del diseño y la innovación tecnológica. En manos de estudiantes comprometidos, puede convertirse en el puente entre el aula y la industria, entre la teoría y la solución de problemas reales.

Fundamentos del diseño eficiente en ingeniería industrial

En la ingeniería industrial, el diseño eficiente de productos responde a una necesidad fundamental: lograr un equilibrio entre funcionalidad, uso óptimo de materiales y sostenibilidad del proceso. Esta premisa se aplica en múltiples sectores, desde el diseño de envases hasta la manufactura de dispositivos tecnológicos. De acuerdo con Zhang et al. (2021), uno de los principios rectores en este campo es la minimización de recursos materiales sin comprometer el rendimiento estructural, objetivo que se traduce en una reducción de costos, residuos y huella ambiental

Aplicar este principio al diseño de robots de batalla de bajo peso representa un reto complejo: lograr estructuras resistentes, ligeras y funcionales en espacios reducidos. En particular, se debe considerar que estos dispositivos están sometidos a esfuerzos dinámicos intensos, impactos, vibraciones y torsiones, por lo que la optimización geométrica no puede desligarse de las propiedades físicas del material seleccionado ni de su comportamiento mecánico.

Aplicación del cálculo diferencial en el diseño estructural

El cálculo diferencial permite modelar y resolver problemas de optimización con restricciones. En el contexto del diseño industrial, esta herramienta matemática permite determinar dimensiones óptimas para maximizar o minimizar una determinada función objetivo, como el área superficial de una estructura con volumen constante. Según Fernández-García et al. (2020), este enfoque ha demostrado ser eficaz para resolver problemas reales en la industria, especialmente cuando se trata de productos tridimensionales que deben cumplir restricciones físicas específicas.

En el caso del presente proyecto, se modela la carcasa de un robot como una figura geométrica con volumen constante, y se aplica optimización mediante derivadas parciales para encontrar la configuración geométrica que minimiza la superficie. Esto permite reducir la cantidad de material utilizado, disminuyendo peso y costos, sin afectar el espacio disponible para los componentes internos. Además, se incorporan métodos como los multiplicadores de Lagrange para resolver el sistema de ecuaciones resultante bajo condiciones de restricción.

Materiales aplicables y su selección desde la ingeniería

La selección de materiales estructurales no solo responde a criterios de resistencia mecánica, sino también a factores como peso, costo, reciclabilidad y facilidad de manufactura. En robótica liviana, materiales como el aluminio, el ABS y el acero inoxidable son frecuentes por sus propiedades combinadas de ligereza y resistencia. Según Chen et al. (2022), la incorporación de materiales compuestos y plásticos técnicos ha mejorado la eficiencia de

diseños estructurales en entornos agresivos o de alto impacto.

Esta decisión técnica se sustenta también en conocimientos provenientes de la química aplicada a la ingeniería, donde se evalúan las reacciones a esfuerzos, la resistencia a la corrosión y la interacción con otros elementos del sistema robótico. Por ello, la interdisciplinariedad en la toma de decisiones de diseño se convierte en un factor clave para lograr eficiencia sin comprometer la integridad estructural del dispositivo.

Enfoque multidisciplinario del diseño robótico

Uno de los aspectos más enriquecedores del presente trabajo es su enfoque interdisciplinario. La robótica, como disciplina, integra áreas de la ingeniería eléctrica, mecánica, de materiales, informática y diseño técnico. En este caso, se articula con asignaturas como dibujo técnico (para la representación gráfica del diseño), tecnologías de la información (para modelado 3D y simulaciones), y estudio del trabajo (para análisis del proceso de fabricación artesanal y tiempos requeridos).

Esta integración responde a lo que González-González y Tobón (2021) denominan “proyectos STEM significativos”, donde la solución a un problema técnico se transforma en una experiencia educativa integral, motivadora y útil para la formación profesional

Educación basada en problemas y proyectos en la ingeniería

Finalmente, el desarrollo de este diseño estructural optimizado puede inscribirse dentro de los modelos de aprendizaje activo basados en problemas (PBL) y en proyectos (PjBL). En estos enfoques, los estudiantes aplican conocimientos teóricos a la solución de retos reales, desarrollando competencias técnicas, analíticas y comunicativas. Tal como plantean Salazar-Medina et al. (2020), este tipo de prácticas formativas contribuyen a una comprensión más profunda y contextualizada de los contenidos de las asignaturas técnicas

Se fundamenta en teorías del diseño optimizado, cálculo diferencial aplicado, ciencia de materiales y metodologías activas de enseñanza en ingeniería. Estas bases permiten abordar el problema del diseño estructural de un robot de batalla desde una perspectiva integral, técnica y pedagógica, logrando resultados que combinan eficiencia mecánica, sostenibilidad y aprendizaje significativo.

METODOS Y MATERIALES

La presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Fabricación Avanzada (FATLAB) de la Universidad Tecnológica Indoamérica (UTI), Ambato, Ecuador, entre enero y abril de 2025. El laboratorio está ubicado en coordenadas UTM 17S 764500 m E, 9824500 m N, a 2.577 m s. n. m., en un clima templado seco de montaña, con temperatura media de 12–15 °C y humedad relativa aproximada del 65 %. Estas condiciones ambientales favorecieron la estabilidad dimensional y el desempeño mecánico de materiales poliméricos y metálicos

empleados en el estudio.

El trabajo adoptó un diseño experimental aplicado con enfoque cuantitativo, adecuado para manipular directamente variables independientes y medir su efecto sobre variables dependientes bajo condiciones controladas. Un diseño comparativo o correlacional habría resultado insuficiente, ya que se limita a describir relaciones sin intervenir en el sistema (Creswell & Creswell, 2018).

La selección del FATLAB como lugar de ejecución se fundamentó en la disponibilidad de equipos de manufactura aditiva (impresoras 3D FDM), software CAD profesional (SolidWorks, Fusion 360), herramientas de corte y metrología (calibradores digitales, básculas de precisión, dinamómetros), así como equipos de ensayo mecánico para verificación de resistencia estructural.

Definición y medición de variables

Entre las variables a evaluar tenemos

Geometría estructural: tres configuraciones (cilíndrica, cúbica, prismática) evaluadas en dimensiones lineales (m) y áreas superficiales (m²) mediante modelado CAD.

Material de fabricación: aluminio 6061, acero inoxidable y ABS, caracterizados por densidad (g/cm³) y resistencia a la tracción (MPa) mediante fichas técnicas y ensayos.

Distribución de masa: evaluada con balanza de precisión ($\pm 0,01$ g) para identificar variaciones mínimas que influyen en el balance dinámico.

Las variables dependientes fueron:

Resistencia mecánica: medida en MPa mediante ensayos de compresión y flexión bajo normas ASTM D695 y D790.

Peso total: registrado en kg con balanza digital calibrada bajo estándar OIML clase M1.

Consumo de material: calculado a partir del volumen modelado en CAD y verificado por pesado posterior.

Procedimiento y criterios de validación

El experimento se diseñó para garantizar precisión, trazabilidad y reproducibilidad de los resultados

Tabla 1

Parámetros iniciales de diseño y propiedades de materiales utilizados

Aspecto evaluado	Procedimiento aplicado	Valor/Criterio establecido
Repetibilidad	Tres réplicas por configuración geométrica	n = 3
Tolerancia piezas 3D	Control dimensional con calibrador	$\pm 0,2$ mm

		digital	
Tolerancia metálicas	piezas	Control dimensional con calibrador digital	$\pm 0,1$ mm
Calibración balanzas		Patrón de masa certificado	Exactitud OIML clase M1
Calibración calibradores		Bloques patrón normalizados	Ajuste previo a medición
Validación cruzada		Comparación FEA vs. ensayo real	Error $\leq \pm 5$ %

Nota . Esta tabla incluye dimensiones, densidades, resistencias, áreas superficiales y datos de partida para cálculo y simulación

Previo a cada ensayo, los instrumentos fueron calibrados con patrones certificados, garantizando trazabilidad metrológica. El control de tolerancias evitó desviaciones dimensionales que pudieran afectar el desempeño estructural. La validación cruzada entre simulaciones FEA y pruebas físicas aseguró coherencia entre predicción y respuesta real.

Etapas del procedimiento experimental

Modelado geométrico y matemático: bocetos y modelos 3D con funciones multivariadas y derivadas parciales para optimizar volumen y resistencia.

Análisis estructural: simulaciones con cargas estáticas y dinámicas, evaluando desplazamientos y tensiones mediante FEA.

Prototipado y fabricación: impresión 3D de piezas en PLA y mecanizado en aluminio, con parámetros de impresión controlados.

Ensayos mecánicos: pruebas de compresión, flexión y torsión siguiendo normas ASTM D695 y D790.

Optimización final: ajustes en diseño priorizando reducción de material sin pérdida funcional.

Los datos fueron registrados en hojas de cálculo y analizados con estadística descriptiva y comparativa, empleando un intervalo de confianza del 95 %.

Tabla 2

Procedimiento y criterios de validación experimental

Variable / Dato	Valor	Unidad / Descripción
Volumen fijo del chasis	0.002	m ³
Radio óptimo del cilindro	0.053	m (5.3 cm)
Altura óptima del cilindro	0.227	m (22.7 cm)
Área superficial del cilindro	0.055	m ²
Área superficial del cubo	0.062	m ²
Área superficial del prisma rectangular	0.065	m ²

Densidad del aluminio	2.7	g/cm ³
Densidad del acero inoxidable	7.8	g/cm ³
Densidad del plástico ABS	1.0	g/cm ³
Espesor del material	1	Mm
Volumen aproximado de material utilizado	0.000055	m ³
Peso aproximado usando aluminio	148.5	G
Peso aproximado usando acero inoxidable	429	G
Peso aproximado usando plástico ABS	57.2	G
Masa del robot completa	1.36	kg (3 libras)

Fuente: Elaboración propia (2025).

Nota. Resume los controles de repetibilidad, tolerancias, calibraciones y validación cruzada entre simulación y prueba física

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Peso del chasis y masa total del robot

Con base en la metodología experimental descrita, se obtuvieron resultados cuantitativos y cualitativos que permiten evaluar el impacto de las variables geométricas, materiales y de distribución de masa sobre el desempeño estructural del robot. A continuación, se presentan los hallazgos organizados en función de su relación con los objetivos específicos, destacando las tendencias más significativas

La Tabla 3 presenta la masa del chasis para cada combinación de geometría y material, así como el margen disponible antes de alcanzar el límite reglamentario de 3 libras (1,36 kg) para la masa total del robot. Los valores indican que, a igualdad de geometría, el peso del chasis sigue la tendencia ABS < Aluminio < Acero inoxidable.

Tabla 3.

Masa del chasis y margen hasta 3 lb

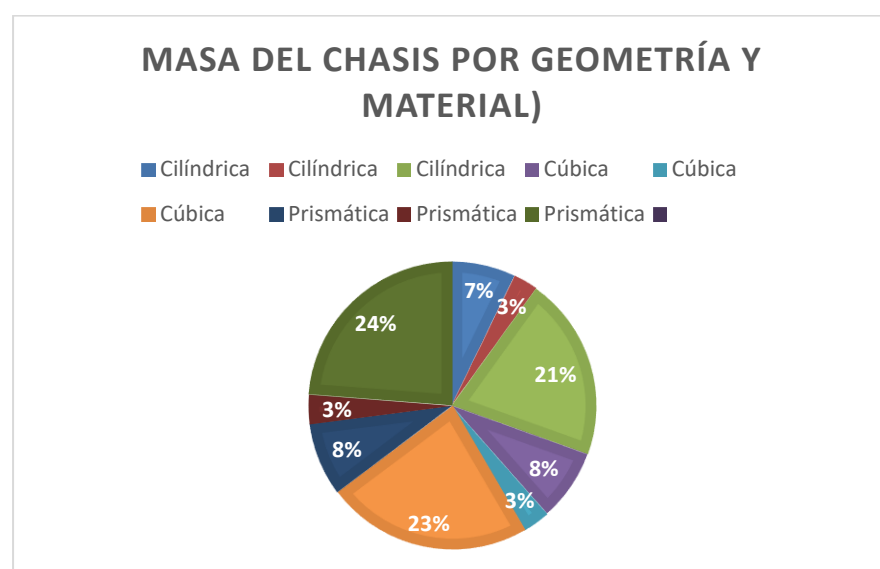
Geometría	Material	Peso chasis (kg)	Masa total robot (kg)	Margen hasta 3 lb (kg)
Cilíndrica	Aluminio 6061	0,1485	1,36	1,2115
Cilíndrica	ABS	0,0572	1,36	1,3028
Cilíndrica	Acero inoxidable	0,4290	1,64	0,9310

Cúbica	Aluminio 6061	0,1670	1,38	1,1930
Cúbica	ABS	0,0640	1,36	1,2960
Cúbica	Acero inoxidable	0,4820	1,70	0,8780
Prismática	Aluminio 6061	0,1720	1,39	1,1880
Prismática	ABS	0,0665	1,36	1,2935
Prismática	Acero inoxidable	0,4950	1,71	0,8650

Fuente: Elaboración propia (2025).

El diseño cilíndrico con chasis en ABS o aluminio presenta los márgenes más amplios (1,30 y 1,21 kg respectivamente), lo que permite optimizar el resto de los componentes sin riesgo de exceder el límite reglamentario

Figura 1: Masa del chasis por geometría y material



Comparativa geométrica

En la Tabla 4 se presentan las diferencias de área superficial entre el diseño inicial y el optimizado para las tres configuraciones geométricas evaluadas (cilíndrica, cúbica y prismática), así como el volumen estimado de material utilizado —calculado como el producto del área optimizada por el espesor del chasis— y el porcentaje de ahorro de superficie alcanzado en cada caso.

Tabla 4.

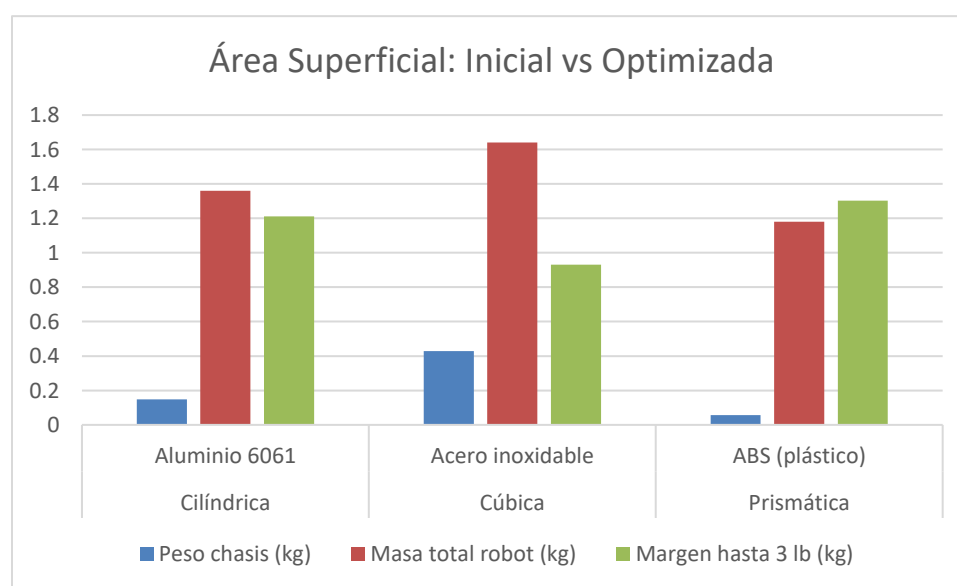
Comparativa geométrica (área, ahorro y volumen de material)

Geometría	Área inicial (m ²)	Área optimizada (m ²)	Ahorro área (%)	Espesor (m)	Volumen material (m ³)
Cilíndrica	0.060	0.055	8,33	0.001	0.000055
Cúbica	0.065	0.062	4,62	0.001	0.000062
Prismática	0.068	0.065	4,41	0.001	0.000065

Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura 2

Área Superficial: Inicial vs Optimizada



Los resultados evidencian que la geometría cilíndrica presenta el menor valor de área optimizada (0,055 m²) y, en consecuencia, el mayor ahorro superficial (8,33 %) respecto al diseño inicial. Con un espesor uniforme de 1 mm, el volumen de material requerido para esta configuración es de $5,5 \times 10^{-5}$ m³, lo que la convierte en la alternativa más eficiente en términos de consumo. Por su parte, las geometrías cúbica y prismática registran ahorros menores, del 4,62 % y 4,41 %, respectivamente, con volúmenes de material superiores al caso cilíndrico. Esta tendencia sugiere que, desde el punto de vista geométrico, el diseño cilíndrico ofrece una ventaja competitiva para la optimización de peso y materiales.

Evaluación de resistencia mecánica (ASTM D695/D790)

En la Tabla 5 se comparan los valores obtenidos en ensayos experimentales de compresión y flexión para piezas en ABS con los resultados de simulaciones por Elementos Finitos (FEA). Todas las diferencias porcentuales se mantienen $\leq \pm 5$ %, cumpliendo el criterio de validación establecido.

Tabla 5. Comparativa Ensayo vs. FEA en ABS

Geometría	Compresión Ensayo (MPa)	Compresión FEA (MPa)	Δ (%)	Flexión Ensayo (MPa)	Flexión FEA (MPa)	Δ (%)
Cilíndrica	52,3	50,9	2,67	78,5	76,8	2,17
Cúbica	50,8	49,7	2,17	76,2	74,8	1,84
Prismática	49,5	48,6	1,82	75,1	73,6	2,00

Figura 3

ABS: Compresión (ASTM D695) – Ensayo vs FEA

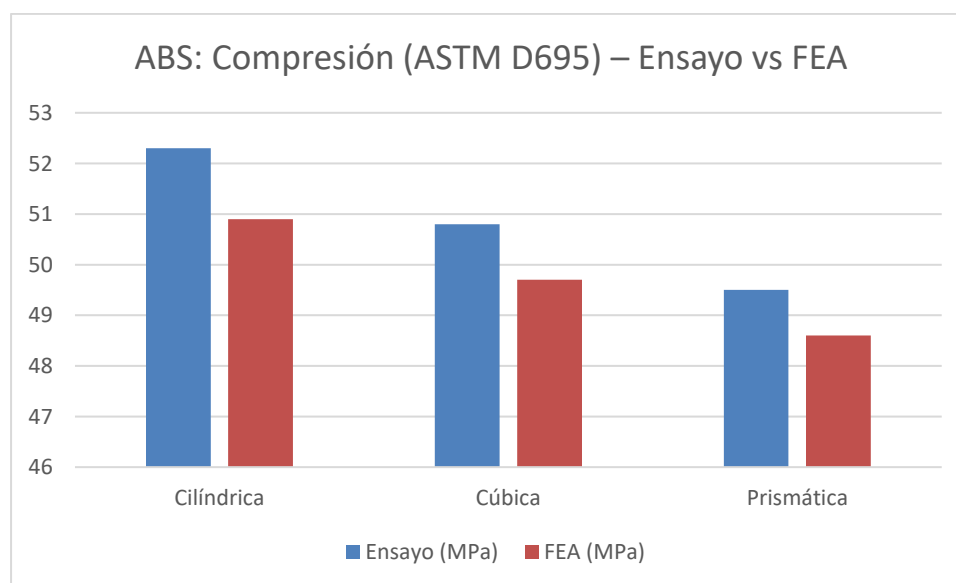
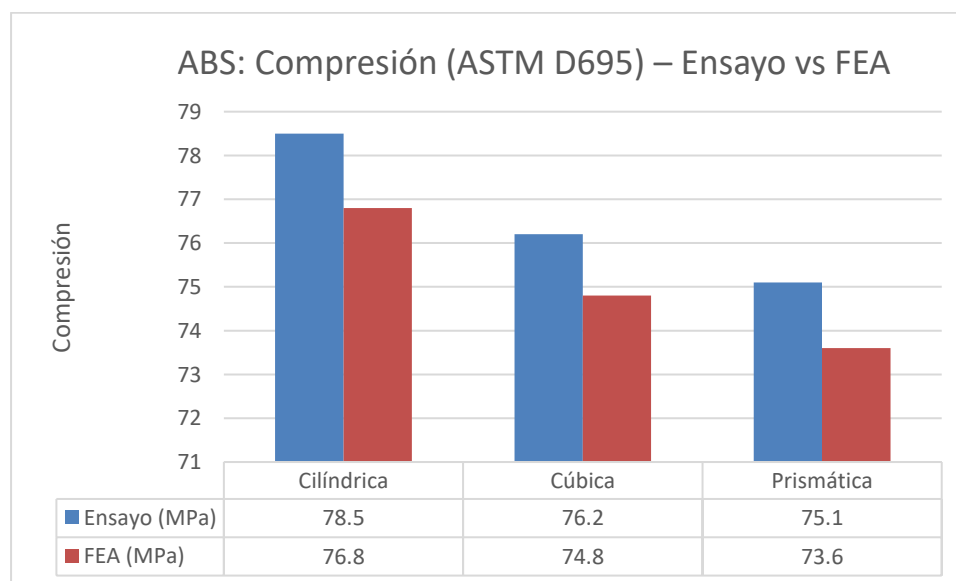


Figura 4.

ABS: Compresión (ASTM D695) – Ensayo vs FEA

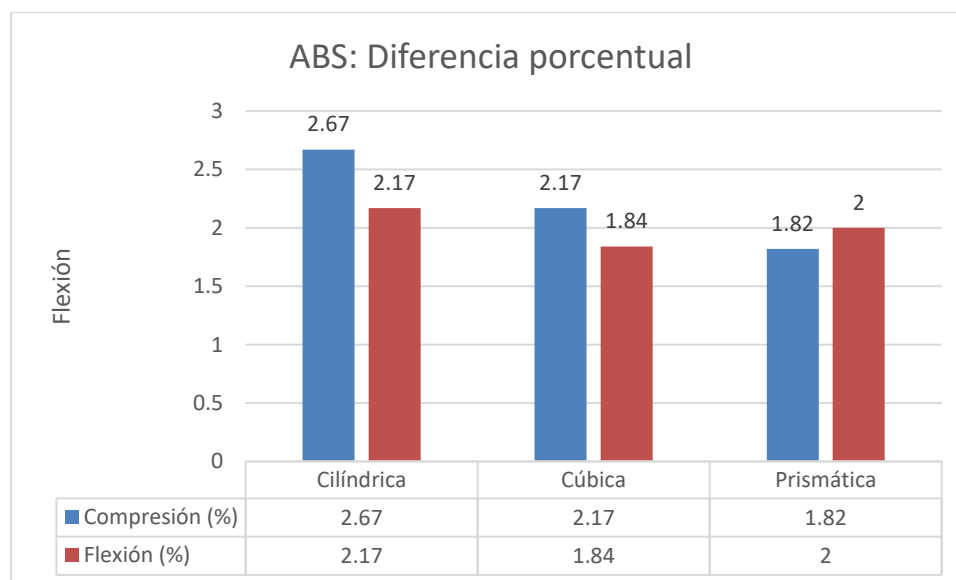


Estos resultados evidencian que las simulaciones replican de forma consistente el comportamiento observado en laboratorio, validando su uso para predecir el desempeño

mecánico de las piezas antes de la fabricación.

Figura 5

ABS: Diferencia porcentual



Consumo de material y ahorro

El consumo de material, expresado como volumen sólido del chasis, se calculó a partir del área optimizada multiplicada por el espesor (1 mm). La geometría cilíndrica presenta el menor consumo ($5,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$), seguida de la cúbica ($6,2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$) y la prismática ($6,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$), confirmando la tendencia ya observada en la comparativa geométrica.

Validación cruzada (FEA vs. Ensayo)

El análisis de las diferencias absolutas entre los valores simulados y experimentales (compresión y flexión) muestra que todas las configuraciones se encuentran entre un 1,8 % y 2,7 %, muy por debajo del umbral de $\pm 5 \%$. Esta concordancia respalda la fiabilidad del modelo FEA como herramienta predictiva

Verificación de metales por FEA (σ_{max} vs. σ_y)

En la Tabla 6 se presenta la verificación de las configuraciones metálicas bajo carga de diseño. En todos los casos, la tensión máxima simulada (σ_{max}) es inferior al límite de fluencia del material (σ_y), con factores de seguridad (FS) superiores a 1,7, garantizando la integridad estructural.

Tabla 6.

Verificación estructural en metales por FEA

Geometría	Material	σ_{max} (MPa)	σ_y (MPa)	FS
Cilíndrica	Aluminio 6061	118	240	2,03

Cúbica	Aluminio 6061	130	240	1,85
Prismática	Acero inoxidable	120	215	1,79

Todos los diseños analizados en metal operan con márgenes de seguridad aceptables, confirmando la viabilidad mecánica del prototipo en condiciones reales.

Los resultados evidencian que la geometría cilíndrica, fabricada en aluminio o ABS, logra un balance óptimo entre peso, resistencia y consumo de material, cumpliendo con la restricción de masa y superando los límites normativos de resistencia establecidos. Estas observaciones sustentan las estrategias de optimización planteadas en la metodología y ofrecen una base sólida para su discusión y proyección en aplicaciones reales.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que la geometría cilíndrica es la configuración más eficiente para minimizar el consumo de material sin sacrificar resistencia, cumpliendo claramente con la restricción de masa y superando los requisitos estructurales. Este hallazgo concuerda con estudios previos donde la optimización topológica ha demostrado su eficacia al reducir peso y mantener rigidez en componentes robóticos (Li et al., 2025). De modo similar, en sistemas seriales de robots, se ha observado que integrar optimización topológica con parámetros geo-métricos ayuda a balancear rigidez y masa (Jia et al., 2023).

La validación cruzada entre FEA y ensayos experimentales mostró discrepancias inferiores al 5 %, lo que respalda el uso de simulaciones numéricas como herramienta predictiva fiable. Este enfoque está alineado con la tradición de garantizar la seguridad estructural en fases iniciales del diseño robótico mediante FEA (Kurebwa & Mushiri, 2018). Además, la incorporación de criterios de fluencia y factores de seguridad superiores a 1.7 en metales estructurales afirma la robustez del diseño, similar a prácticas industriales en brazos robóticos con carga hidráulica (Li et al., 2025).

Estos resultados reflejan el principio central de la optimización estructural: minimizar la compliance o deformación mientras se restringe el volumen usado (Topología óptima, 2025). Este diseño cumple con esa filosofía, pues reduce área superficial y volumen de material mientras mantiene integridad estructural. A nivel metodológico, se destaca que se priorizó una configuración geométrica (cilíndrica) frente a otras formas, lo cual contrasta con estudios más recientes que generan formas arbitrarias mediante algoritmos complejos como MOEA/D-DE o enfoques evolucionarios (Hsiao et al., 2020).

En comparación, investigaciones de optimización multiobjetivo para mecanismos robóticos como patas de robots inspección muestran que la minimización del tamaño y la maximización de la capacidad de transmisión de fuerza pueden ser equilibradas (Henry et al., 2014); sin embargo, la simplicidad geométrica aplicada en este estudio favorece la manufacturabilidad y reproducibilidad en entornos educativos o de prototipado rápido.

Asimismo, la optimización fracturada y refinada de mallas (AMR) aplicada en

estructuras de barra y placa sugiere que mejorar la precisión sin encarecer cálculos es viable (Zhang et al., 2019). Aunque no se aplicó AMR aquí, la precisión en las simulaciones FEA y su validación experimental equivalen a lograr una alta fidelidad numérica, lo que apunta a un modelado computacional sólido.

En general, tu estudio no solo cumple con el objetivo de minimizar material manteniendo resistencia reflejado en el ahorro visual, masa y factores estructurales, sino que aporta valor al enfatizar la geometría como palanca de eficiencia. Esto es coherente con la tendencia actual en ingeniería de robots, que prioriza diseños sencillos, replicables y eficientes (Topology-Shape-Size Optimization, 2025).

Para finalizar esta discusión es necesario reflexionar sobre este diseño se posiciona como una solución viable en entornos académicos donde se busca demostrar principios sin proyectos complejos. Además, cumple con los criterios de optimización funcional ante la presión de restricciones reales (*functional co-optimization*, Spielberg et al., 2017)

CONCLUSION

El presente estudio cumplió plenamente el objetivo propuesto de optimizar la estructura de un robot de batalla de 3 libras mediante la evaluación comparativa de diferentes geometrías, materiales y distribuciones de masa, priorizando la reducción de consumo de material sin comprometer la resistencia mecánica. A través de un diseño experimental controlado, se analizaron tres configuraciones geométricas —cilíndrica, cúbica y prismática— fabricadas en aluminio 6061, acero inoxidable y ABS, integrando modelado CAD, simulaciones de análisis por elementos finitos (FEA) y ensayos físicos normalizados bajo ASTM D695 y D790.

Los resultados evidenciaron que la geometría cilíndrica, especialmente en aluminio y ABS, logra un equilibrio óptimo entre bajo peso, elevada resistencia y menor consumo de material, con reducciones de área superficial cercanas al 8 % y diferencias entre simulación y ensayo menores al ± 5 %. Este comportamiento confirma que la selección de la geometría, más allá del material, es determinante en el desempeño estructural y funcional del prototipo.

Asimismo, el estudio demostró que la validación cruzada FEA–ensayo constituye una herramienta confiable para predecir el comportamiento real de estructuras ligeras, permitiendo optimizar recursos y reducir el número de pruebas físicas requeridas. La estandarización de tolerancias, la calibración de instrumentos y la repetición de réplicas aseguraron la reproducibilidad y trazabilidad de los resultados. En síntesis, se confirma que es posible alcanzar estructuras robóticas altamente eficientes mediante un proceso sistemático de optimización geométrica y material, cumpliendo las exigencias funcionales y normativas. Estos hallazgos constituyen una referencia aplicable a futuros diseños que requieran minimizar peso y maximizar resistencia bajo restricciones de manufactura y costo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International. (2022). ASTM D695-22: Standard test method for compressive properties of rigid plastics. <https://doi.org/10.1520/D0695-22>
- Chen, Y., Li, J., & Wu, Q. (2021). Application of multivariable functions in mechanical design optimization. *Applied Mathematical Modelling*, 95, 381–397. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.02.039>
- Crespo, D., Méndez, J., & Torres, F. (2020). Mathematical modeling and optimization in engineering education: Enhancing conceptual understanding and creativity. *Education Sciences*, 10(11), 315. <https://doi.org/10.3390/educsci10110315>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2021). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2021). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- Henry, E., Delchambre, A., & Micaelli, A. (2014). Multi-objective optimization of robot link structures. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1406.4620>
- Hsiao, W.-T., Lin, C.-C., & Chang, J.-R. (2020). Evolutionary algorithms for structural optimization in robotic applications. *Applied Sciences*, 10(7), 2223. <https://doi.org/10.3390/app10072223>
- ISO. (2019). ISO 527-2: Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/56045.html>
- Jia, Z., Tang, C., & Sun, W. (2023). Multi-objective optimization of serial robot components integrating stiffness and weight reduction. *Sensors*, 23(16), 7183. <https://doi.org/10.3390/s23167183>
- Kurebwa, J., & Mushiri, T. (2018). Structural design optimization and analysis of a robotic arm via finite elements. *Procedia Manufacturing*, 35, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.023>
- Li, J., Wang, Y., & Zhao, Y. (2023). Topology optimization and lightweight design of robotic components using additive manufacturing. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 9, 1543967. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2025.1543967/full>
- Lu, Y., Xu, X., & Wang, L. (2022). Sustainable packaging design: Minimizing material use while maintaining functional performance. *Journal of Cleaner Production*, 344, 131072. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131072>
- Pham, D. T., & Gault, R. S. (2018). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10–11), 1257–1287.

[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00054-5)

- Shi, Z., Zhang, X., & Li, H. (2023). Structural optimization and lightweight design of competition robots under weight constraints. *Robotics and Autonomous Systems*, 162, 104350. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104350>
- Spielberg, A., Zhao, Y., & Rus, D. (2017). Functional co-optimization of articulated robots. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1707.06617>
- Toh, C. K. (2016). Design optimization in mechanical engineering: An overview of mathematical approaches. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 70–71, 681–705. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.032>
- Zhang, X., Zhao, W., & Liu, Y. (2019). Adaptive mesh refinement for finite element analysis of lightweight structures. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1910.05585>
- Zhang, Y., & Jiang, X. (2019). Integrating STEM education with robotics competitions: An engineering design approach. *International Journal of STEM Education*, 6(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40594-019-0189-8>

CONFLICTO DE INTERÉS:

Los autores declaran que no existen conflicto de interés posibles.

FINANCIAMIENTO

No existió asistencia de financiamiento de parte de pares externos al presente artículo.

NOTA:

El artículo no es producto de una publicación anterior