



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.

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.

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

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

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

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

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

donde k , ρ y C_p 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/m ³)	C _p (J/kg·K)
1	Carburo de Boro (B ₄ C)	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 cuadro por cuadro de la escena crítica correspondiente

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 $d_0=1.2\text{m}$ y $n=2.8$.

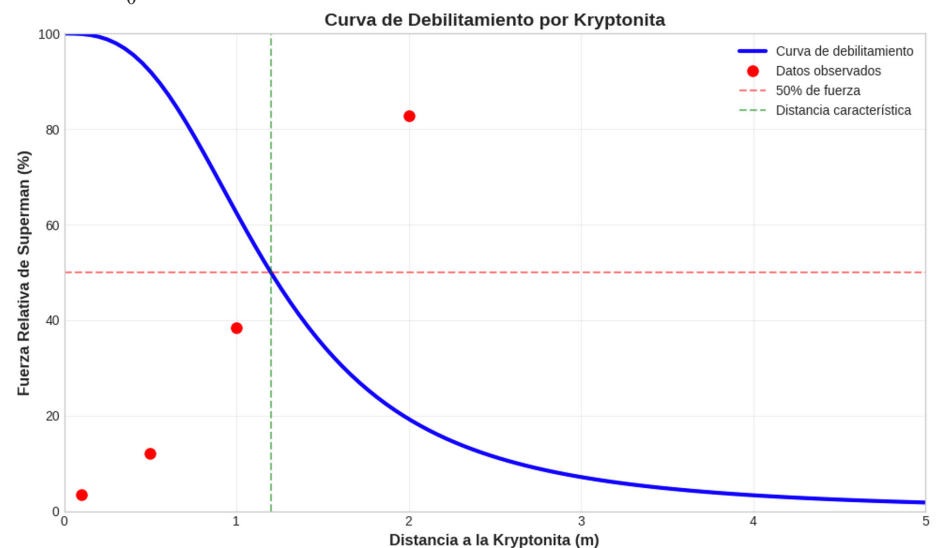


Figura 1. Curva de debilitamiento por kryptonita: Gráfico que muestra la reducción porcentual de la fuerza de Superman en función de la distancia a la kryptonita, con puntos de datos a 0.1m (3.5%), 0.5m (12.1%), 1.0m (38.4%) y 2.0m (82.7%).

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/s^2 , 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.

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 B₄C (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.

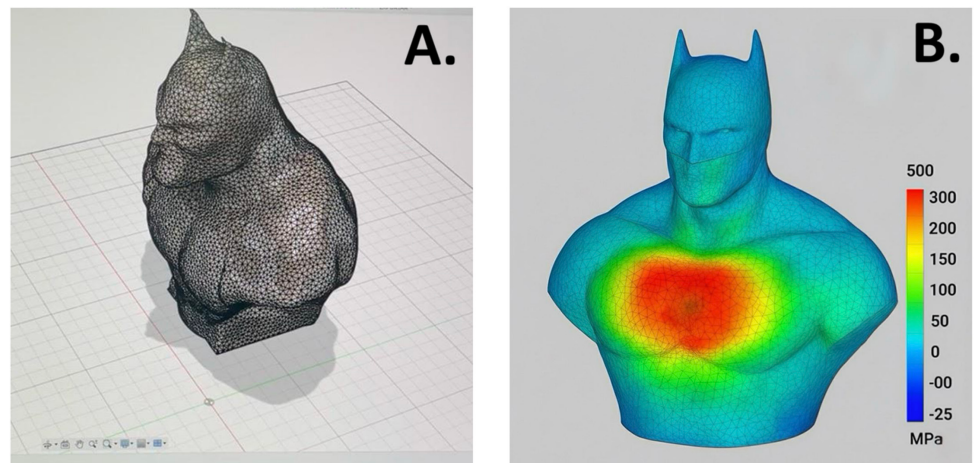


Figura 4. Modelo FEA del sistema exoesquelético: (izquierda) mallado tridimensional; (derecha) distribución de esfuerzos equivalentes (MPa) bajo carga de impacto, mostrando concentración esternal y atenuación radial.

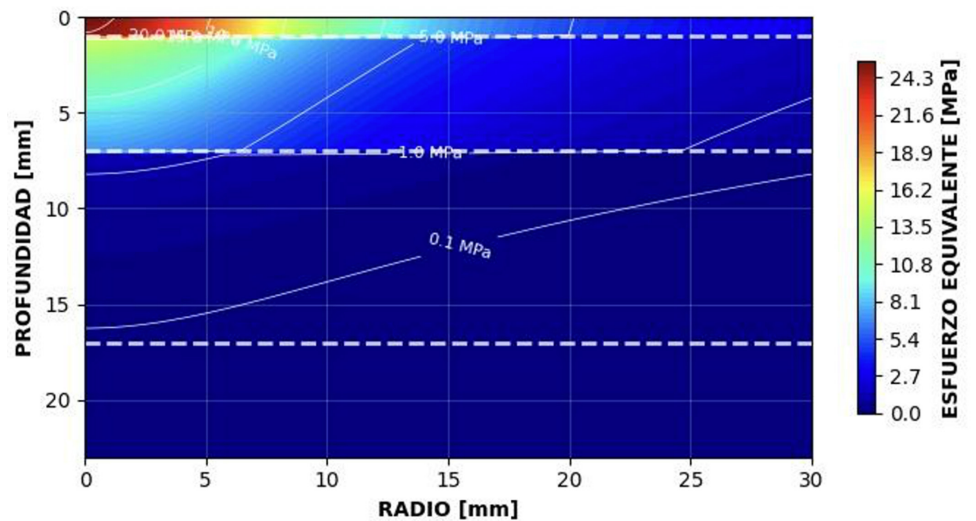


Figura 5. Distribución de esfuerzos equivalentes (MPa) en función del radio y la profundidad obtenida mediante simulación por elementos finitos. Se observa una concentración máxima en la región superficial cercana al punto de impacto y una disminución progresiva del esfuerzo hacia mayores profundidades, 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: