

Artículo de Investigación

Diseño de embalajes sostenibles: evaluación experimental del kenaf como material biobasado para protección contra impactos

Design of sustainable packaging: Experimental evaluation of kenaf as a biobased material for impact protection

Francisco J. Sánchez López¹, Vicente A. Cloquell Ballester²

¹Laboratorio de Embalaje y Transporte de Mercancías, Instituto Tecnológico Metalmeccánico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines, Valencia, España, 46980;

²Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 46022;

cloquell@upv.es

*Correspondencia: fsanchez@aidimme.es

Citación: Sánchez, F. & Cloquell, V., (2026). Diseño de embalajes sostenibles: evaluación experimental del kenaf como material biobasado para protección contra impactos. *NovasinerGía*. 9(2). 38-54.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.18.03>

Recibido: 17 septiembre 2025

Aceptado: 25 noviembre 2025

Publicado: 08 julio 2026

NovasinerGía
ISSN: 2631-2654

Resumen: El presente trabajo evalúa el comportamiento amortiguador del material lignocelulósico Kenaf como alternativa sostenible en sistemas de embalaje de protección frente a impactos. Se ensayaron ocho configuraciones experimentales, combinando dos densidades (P30 y P60), dos espesores (20 mm y 40 mm) y dos condiciones de acondicionamiento ambiental (23 °C/50% de humedad relativa HR y 20 °C/90% HR), sometidas a impactos verticales desde una altura de 229 mm. Se registró la aceleración máxima transmitida (G) durante el primer impacto (tres repeticiones), y para los impactos del segundo al quinto se calcularon los valores medios. El análisis estadístico incluyó un análisis de varianza multifactorial (ANOVA), modelos de regresión lineal entre la carga estática y la aceleración transmitida, y la clasificación de la aptitud de cada configuración en función del tipo y peso del producto a embalar. Asimismo, se evaluó la degradación funcional del material mediante un análisis de fatiga basado en impactos repetidos. Los resultados mostraron que el espesor fue el único factor con influencia estadísticamente significativa en la capacidad amortiguadora. Las configuraciones de 40 mm de espesor y densidad P60 fueron las más eficaces para proteger productos frágiles o moderadamente frágiles. En cambio, la mayoría de las configuraciones con 20 mm presentaron aceleraciones superiores a 85 G y una degradación funcional significativa, lo que limita su reutilización. Este estudio aporta criterios técnicos para el diseño de embalajes sostenibles y propone una metodología replicable para la evaluación funcional de otros materiales sostenibles.

Palabras clave: Embalaje sostenible, Fragilidad del producto, Impactos, Kenaf, Materiales biobasados.

Abstract: This study evaluates the cushioning performance of lignocellulosic Kenaf as a sustainable alternative in protective packaging systems. Eight experimental configurations were tested, combining two densities (P30 and P60), two thicknesses (20 mm and 40 mm), and two environmental conditions (23 °C/50% RH and 20 °C/90% RH), subjected to vertical drop impacts from a height of 229 mm. The maximum transmitted acceleration (G) was recorded during the first impact (three repetitions), while single values were collected and averaged for the second to fifth impacts. The statistical analysis included a multifactorial ANOVA, linear regression models relating static load to transmitted acceleration, and classification of each configuration's suitability based on the type and weight of the product to be packaged. Functional degradation was also evaluated through fatigue testing under repeated impacts. Results indicated that thickness was the only factor with a statistically significant effect on cushioning performance. Configurations with 40 mm thickness and P60 density were the most effective for protecting fragile or moderately fragile products. Most configurations with a 20 mm thickness exhibited acceleration levels exceeding 85 G and significant functional degradation, limiting their reuse potential. This study provides technical criteria for the design of sustainable packaging systems and introduces a replicable methodology for the functional evaluation of natural-based cushioning materials.

Keywords: Sustainable packaging, Fragility of the product, Impacts, Kenaf, Biobased materials.



Copyright: 2026 derechos otorgados por los autores a NovasinerGía.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Introducción

El crecimiento de la actividad logística, el comercio electrónico y las crecientes exigencias de protección durante el transporte de productos han incrementado la demanda de sistemas de embalaje con propiedades amortiguadoras eficaces. Tradicionalmente, esta función ha sido cubierta por materiales derivados del petróleo, como el poliestireno expandido (EPS) y el polietileno expandido (PE) que ofrecen un buen rendimiento mecánico, pero generan un elevado impacto ambiental debido a su baja biodegradabilidad y a las dificultades asociadas a su reciclaje. El EPS, por ejemplo, no se biodegrada y su reciclaje resulta costoso, contribuyendo a la formación de microplásticos persistentes [1].

En este contexto, la investigación sobre materiales sostenibles con alto rendimiento en amortiguamiento dinámico y recuperación elástica ha cobrado relevancia. Por ejemplo, Liu et al. [2] desarrollaron un aerogel de nanofibras de celulosa y MXene (material basado en carburos y nitruros bidimensionales) con una aceleración máxima significativamente menor que el EPS y el PE. Asimismo, Romero et al. [3] demostraron que la huella de carbono del embalaje reutilizable depende principalmente del material empleado, la tasa de retorno y el diseño de la cadena de suministro.

Diversos compósitos naturales han mostrado propiedades de absorción de energía comparables a las de materiales sintéticos convencionales. Se han reportado resultados positivos en espumas de poliuretano biobasado reforzadas [4] y en espumas de látex natural con fibras vegetales [5]. Otros estudios recientes confirman que los compósitos reforzados con fibras naturales presentan propiedades de amortiguamiento destacables frente a impactos [6]. Sin embargo, existe aún escasa información sobre el desempeño del kenaf prensado como material de protección en embalajes, lo que motiva el presente estudio.

Las fibras de kenaf presentan una pared celular multicapa (una primaria y tres secundarias) que rodea un lumen central hueco, lo que confiere una elevada relación rigidez-peso y una respuesta anisótropa frente a la compresión. Cada pared está compuesta por microfibrillas de celulosa orientadas helicoidalmente, embebidas en una matriz de hemicelulosa y lignina, similar en comportamiento a un compósito natural [7]. En conjunto, la microestructura del kenaf, su alto contenido en celulosa y la presencia de un lumen interno explican su capacidad amortiguadora y su potencial como material biobasado para embalaje de protección.

El Kenaf (*Hibiscus cannabinus*) destaca por sus propiedades estructurales, bajo peso, bajo coste y elevado potencial de biodegradabilidad. Estas características lo posicionan como un candidato prometedor para aplicaciones en embalaje técnico, especialmente en forma de paneles prensados. No obstante, los estudios previos se han centrado principalmente en sus propiedades mecánicas y térmicas [8], o en su desempeño general en compósitos poliméricos [9]. Existe literatura sobre respuesta dinámica y de vibración en compuestos con kenaf (p.ej., laminados híbridos) [10], si bien se ha centrado más en aplicaciones estructurales que en curvas de amortiguamiento específicas de materiales de embalaje.

Hasta donde se sabe, no se han publicado estudios científicos que evalúen específicamente la capacidad de amortiguamiento de paneles de Kenaf en aplicaciones de embalaje, pese a la disponibilidad de métodos estandarizados para obtener curvas de amortiguamiento de

materiales (ASTM D1596-14) [11]. Esta ausencia en la literatura justifica la relevancia del presente trabajo, que pretende caracterizar y evaluar el potencial del Kenaf como material amortiguador sostenible.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento amortiguador del Kenaf mediante ensayos de impacto controlado. En particular, se busca identificar las combinaciones de parámetros que permiten a este material actuar eficazmente como elemento de protección, así como analizar la influencia de la carga estática, la humedad ambiental y la acumulación de impactos en su rendimiento. Finalmente, se evalúa la degradación funcional del material, con el propósito de valorar su idoneidad en aplicaciones de embalaje sostenible.

2. Metodología

2.1. Visión general

El presente estudio se desarrolló siguiendo un diseño experimental estructurado en seis fases: (1) Preparación de las muestras, (2) Diseño factorial 2^k donde $k=3$, (3) Equipamiento, (4) Ejecución del experimento, (5) Adquisición de datos y (6) Análisis y resultados. Estas fases se detallan en los siguientes apartados, y el esquema general de este proceso se muestra en la Figura 1.

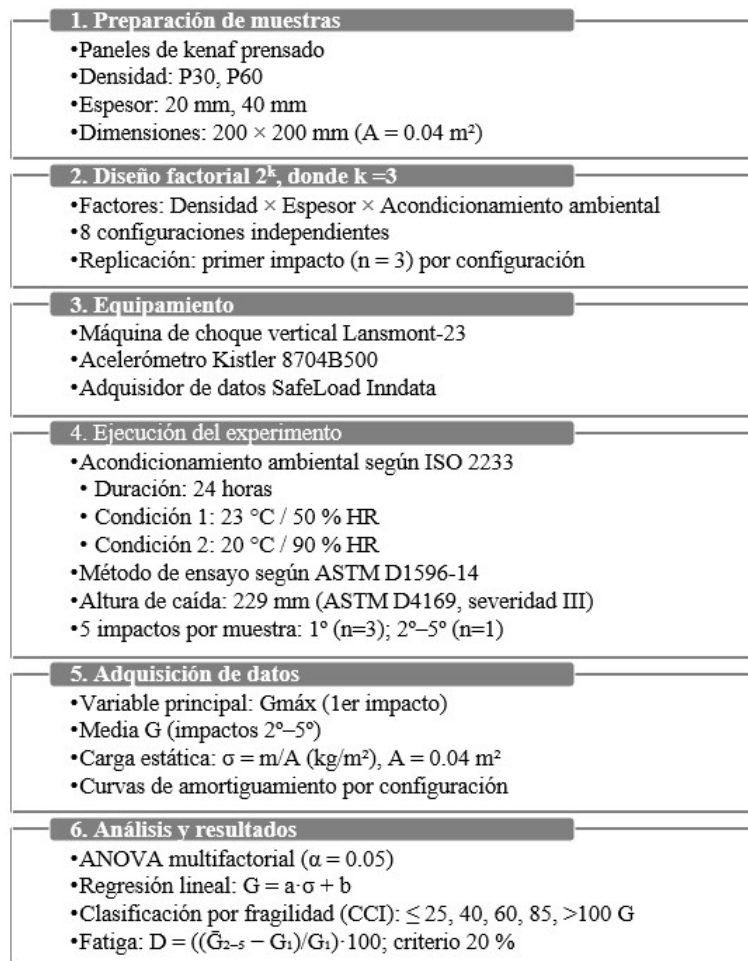


Figura 1. Esquema general de la metodología utilizada en el estudio.

2.2. Preparación de muestras y diseño factorial

El material de ensayo, suministrado por un fabricante europeo, está formado por paneles de fibra de Kenaf prensado en dos densidades nominales: 30 kg/m³ (P30) y 60 kg/m³ (P60). Los paneles se fabricaron mediante prensado térmico de fibras de Kenaf sin aditivos añadidos, lo que garantiza su carácter biobasado. Para cada una de las 2 densidades nominales, se prepararon muestras de dos espesores: 20 mm y 40 mm. Las probetas se cortaron a dimensiones de 200 × 200 mm, correspondientes a un área efectiva de impacto de 400 cm² (0,04 m²).

Las muestras fueron acondicionadas durante 24 h en cámaras climáticas siguiendo la norma ISO 2233 [12], en dos ambientes controlados: 23 °C / 50 % HR y 20 °C / 90 % HR.

El estudio se desarrolló siguiendo un diseño experimental multifactorial completo 2^k donde k=3, considerando como factores la densidad (P30 y P60), el espesor (20 mm y 40 mm) y las condiciones ambientales de acondicionamiento (23 °C / 50 % HR y 20 °C / 90 % HR). Este diseño dio lugar a un total de ocho configuraciones experimentales, probadas de forma independiente (Tabla 1).

Tabla 1. Configuraciones experimentales del diseño factorial 2^k donde k=3.

Configuración	Densidad	Espesor	Ambiente
1	P30	20 mm	23 °C / 50 % HR
2	P30	20 mm	20 °C / 90 % HR
3	P30	40 mm	23 °C / 50 % HR
4	P30	40 mm	20 °C / 90 % HR
5	P60	20 mm	23 °C / 50 % HR
6	P60	20 mm	20 °C / 90 % HR
7	P60	40 mm	23 °C / 50 % HR
8	P60	40 mm	20 °C / 90 % HR

2.3. Equipamiento y configuración de la máquina

Las pruebas se realizaron en una máquina de impacto vertical Lansmont modelo-23 [13], equipada con un plato de caída instrumentado con un acelerómetro Kistler modelo 8704B500 [14] (rango de medida ±500 g, sensibilidad nominal 10 mV/g) y un sistema de adquisición de datos SafeLoad Inndata.

La altura de caída se fijó en 229 mm, correspondiente al nivel de severidad III de la norma ASTM D4169 [15], aplicable a productos de masa comprendida entre 0 y 9,1 kg. Este parámetro se seleccionó para garantizar condiciones de ensayo representativas de escenarios logísticos reales.

La Figura 2 muestra la máquina de ensayo utilizada, con un panel de Kenaf colocado en la base de impacto.



Figura 2. Vista general del experimento.

2.4. Ejecución del procedimiento experimental

La metodología adoptada se basó en normas internacionales de referencia (ASTM D1596, ASTM D4169, ISO 2233), lo que asegura la reproducibilidad de los datos y su comparabilidad con otros estudios. Este diseño metodológico permitió obtener curvas de amortiguamiento consistentes y establecer de manera fiable la influencia de la densidad, el espesor y la humedad ambiental sobre el comportamiento dinámico del Kenaf.

Cada muestra fue sometida a una serie de cinco impactos verticales desde una altura de 229 mm:

- Primer impacto: se realizaron tres repeticiones independientes por configuración, con el fin de garantizar robustez estadística en el análisis de varianza.
- Impactos 2° a 5°: se efectuó una repetición por impacto, destinados a evaluar la pérdida de capacidad amortiguadora por fatiga.

En cada impacto se registró la aceleración máxima transmitida (G) mediante el sistema de adquisición citado en el apartado 2.3. Los valores correspondientes a los impactos 2° a 5° se promediaron y se utilizaron como indicador del comportamiento postimpacto de cada configuración.

Las curvas completas de amortiguamiento y las tablas de resultados detallados para cada configuración se incluyen en el Anexo Técnico.

2.5. Adquisición de datos: variables del estudio

Se analizaron tres variables principales.

- Comportamiento amortiguador: se consideró la aceleración máxima (G) transmitida en el primer impacto, utilizada como indicador directo de la capacidad de absorción del material frente a un choque inicial.
- Relación carga estática–aceleración: se calculó la pendiente de la regresión lineal entre la carga estática aplicada (kg/m^2) y la aceleración transmitida (G). Este parámetro permite evaluar la sensibilidad del material a diferentes masas de producto.

- **Fatiga del material:** se midió la pérdida de capacidad amortiguadora, expresada como el incremento porcentual de la aceleración media entre los impactos 2^o a 5^o y el primer impacto. Este indicador cuantifica el grado de degradación funcional tras impactos repetidos.

Estas variables se seleccionaron por su relevancia en la evaluación de la eficacia de materiales amortiguadores para embalaje, ya que permiten clasificar la idoneidad del kenaf en función de la fragilidad y la masa del producto protegido.

Este planteamiento metodológico es coherente con las propuestas realizadas previamente en estudios de diseño y selección de embalajes de amortiguamiento optimizados [16].

2.6. *Análisis de datos*

El tratamiento preliminar de los datos y la obtención de las curvas se realizó con Microsoft Excel online (versión 2025). Para la elaboración final de las figuras y gráficos se empleó Python con la librería matplotlib [17].

El análisis estadístico se realizó en Microsoft Excel con el complemento Analysis ToolPak. Se aplicó un ANOVA de tres factores (densidad, espesor y condición ambiental) sobre la aceleración máxima registrada en el primer impacto, con un nivel de significancia de 0.05, con el fin de determinar la influencia individual y combinada de cada factor en la capacidad amortiguadora.

Además, se ajustaron modelos de regresión lineal simple entre la carga estática (kg/m²) y la aceleración transmitida (G), lo que permitió evaluar la sensibilidad del material a diferentes masas de producto.

Finalmente, se clasificaron las configuraciones según los umbrales definidos por el Canadian Conservation Institute [18], que establece cinco categorías de producto: muy frágil (≤ 25 G; p. ej., instrumentos científicos delicados, óptica de precisión, equipos médicos de alta sensibilidad), frágil (25–40 G; p. ej., productos electrónicos sensibles, televisores, esculturas de yeso), moderadamente frágil (40–60 G; p. ej., ordenadores de sobremesa, pequeños electrodomésticos, obras de arte robustas), poco frágil (60–85 G; p. ej., impresoras láser, hornos microondas, equipos de audio) y robusto (> 85 –100 G; p. ej., herramientas eléctricas, maquinaria pequeña).

3. **Resultados**

3.1. *Determinación de la capacidad amortiguadora de la fibra de Kenaf*

El análisis de varianza multifactorial se aplicó a los valores de aceleración máxima (G) registrados en el primer impacto, considerando como factores independientes la densidad del material (P30, P60), el espesor (20 mm, 40 mm) y las condiciones ambientales de acondicionamiento (23 °C / 50% HR y 20 °C / 90% HR). Esta elección se fundamenta en que el primer impacto dispone de 3 repeticiones por configuración, lo que proporciona suficiente robustez estadística.

El modelo general fue:

$$G_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

donde μ es la media general, α_i , β_j y γ_k representan los efectos de los factores principales, los términos entre paréntesis las interacciones de segundo y tercer orden, y ε_{ijk} el error aleatorio.

El análisis se realizó con un nivel de significancia de 0.05. La Tabla 2 presenta los resultados del ANOVA, mostrando los valores de F y p para cada factor y sus interacciones.

Tabla 2. Resultados del ANOVA para la aceleración del primer impacto (G).

Factor	Gl	F	p
Espesor	1	20.06	<0.001
Densidad	1	0.14	0.71
Acondicionamiento	1	0.0	0.99
Espesor × Densidad	1	0.02	0.88
Espesor × Acondicionamiento	1	0.0	0.96
Densidad × Acondicionamiento	1	0.23	0.64
Espesor × Densidad × Acondicionamiento	1	0.07	0.80
Residual	40		

A continuación (ver figura 3), se presentan los boxplots de aceleración máxima (G) obtenida en el primer impacto para las diferentes configuraciones de kenaf ensayadas, que permiten visualizar la tendencia general de los datos y confirmar gráficamente la influencia del espesor. Se observa que las configuraciones de 40 mm de espesor presentan medianas más bajas y menor dispersión, evidenciando un mejor comportamiento amortiguador que las de 20 mm. El efecto de la densidad (P30 frente a P60) resulta secundario, con distribuciones en gran medida solapadas. De forma consistente con el análisis ANOVA, las condiciones ambientales comparadas no modificaron de manera sustancial la respuesta, ya que las medianas permanecieron próximas. En relación con los criterios de fragilidad, las configuraciones de 40 mm se sitúan en su mayoría por debajo del umbral de 40 G, lo que respalda su idoneidad para la protección de productos frágiles, mientras que las de 20 mm superan este límite y serían adecuadas únicamente para categorías de productos poco frágiles.

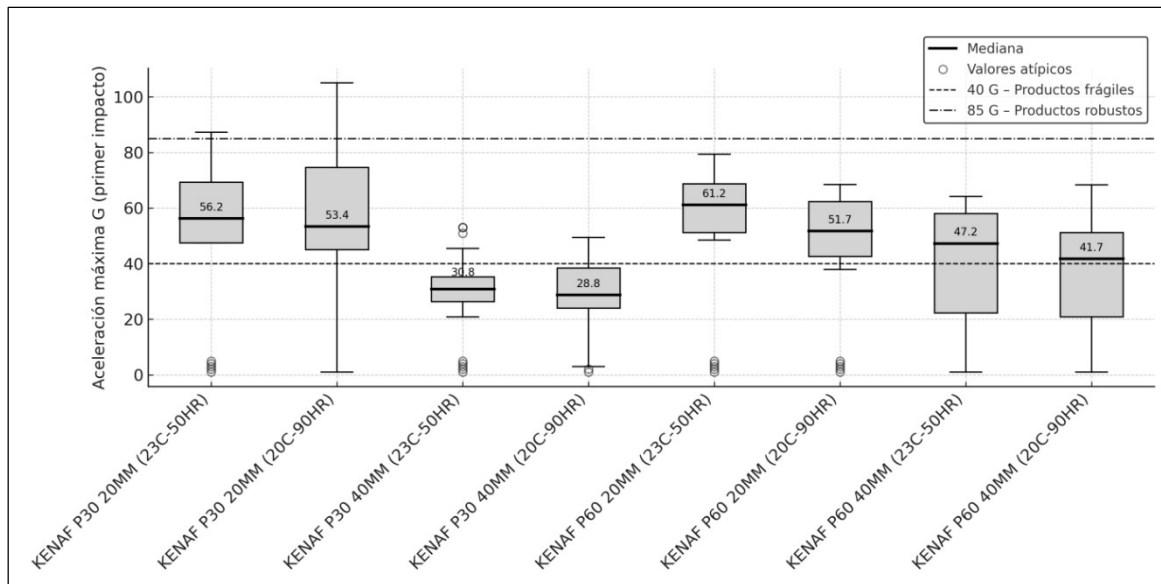


Figura 3. Boxplots de aceleración máxima (G) por configuración experimental en el primer impacto, con indicación de la mediana y valores atípicos.

3.2. Relación entre carga estática y aceleración G: regresiones por configuración

Para evaluar la sensibilidad de cada configuración frente a la carga estática aplicada, se ajustaron modelos de regresión lineal simple entre la carga estática (kg/m²) y la aceleración G registrada en el primer impacto. El análisis se realizó de forma individual por configuración, permitiendo comparar la pendiente y la bondad de ajuste de cada modelo.

La carga estática (kg/m²) se calculó a partir de la masa del producto y el área de contacto de la muestra, siguiendo la definición de la norma ASTM D1596-14. Considerando un área constante de 400 cm² (0,04 m²), la masa equivalente se obtuvo multiplicando la carga estática por dicho valor.

La carga estática aplicada sobre la superficie de la muestra se calcula como:

$$\sigma = m / A$$

donde:

- σ es la carga estática en kg/m²,
- m es la masa del producto (kg),
- A es el área efectiva de impacto (m²).

El comportamiento dinámico del material frente a carga estática se modela mediante una regresión lineal simple:

$$G = a \cdot \sigma + b$$

donde:

- G es la aceleración transmitida (en Gs),
- σ es la carga estática (kg/m²),
- a es la pendiente (sensibilidad a la carga),
- b es la ordenada en el origen (valor basal de G sin carga).

La Tabla 3 resume los parámetros obtenidos y la Figura 4 representa las rectas ajustadas.

Tabla 3. Parámetros de regresión lineal (pendiente a, intercepto b, R²) para la relación carga estática-G.

Densidad	Espesor (mm)	Ambiente	Pendiente a	Intercepto b	R ²
P30	20	23C-50HR	0.23	42.10	0.88
P30	20	20C-90HR	0.26	45.62	0.79
P30	40	23C-50HR	0.08	26.68	0.63
P30	40	20C-90HR	0.11	22.99	0.75
P60	20	23C-50HR	0.23	45.05	0.82
P60	20	20C-90HR	0.27	32.76	0.81
P60	40	23C-50HR	-0.07	49.81	0.43
P60	40	20C-90HR	-0.06	46.46	0.41

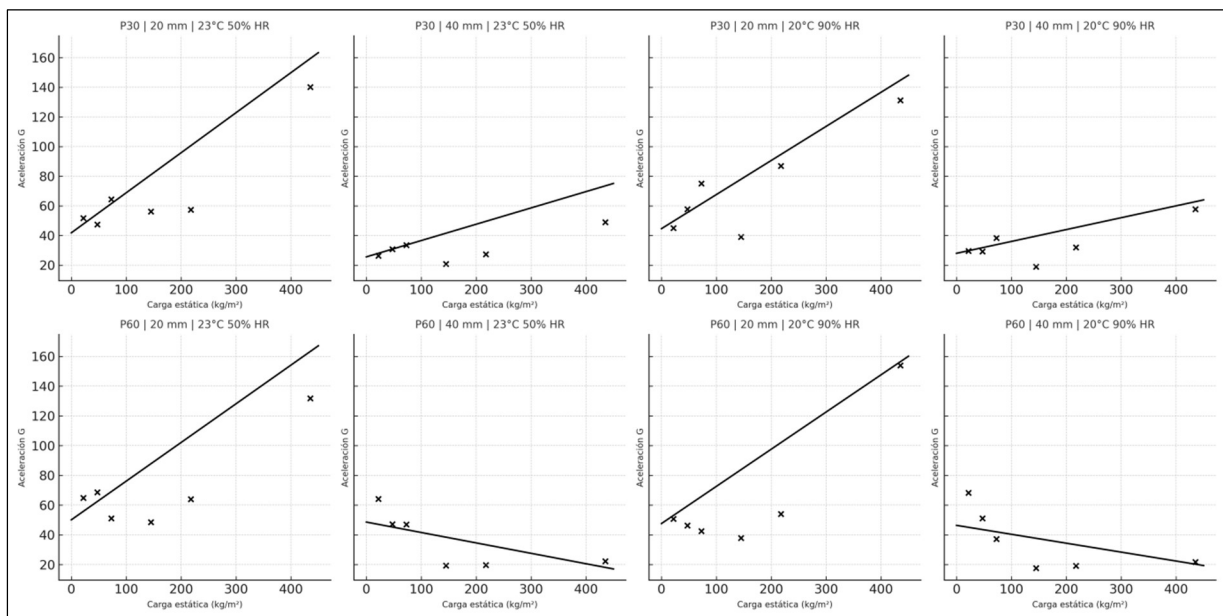


Figura 4. Rectas de regresión lineal carga estática-aceleración máxima (G) para cada configuración.

En las configuraciones de 20 mm, las pendientes fueron entre 0,23 y 0,27, con coeficientes de determinación R² elevados, entre 0,79 y 0,88, lo que indica que la aceleración transmitida aumenta de manera proporcional al peso aplicado, como cabría esperar. En las configuraciones de 40 mm con densidad P30, las pendientes siguen siendo positivas, pero más bajas (0,08 y 0,11), reflejando una menor sensibilidad a la carga, en línea con su mayor espesor.

En cambio, las configuraciones P60-40 mm mostraron pendientes negativas (-0,06 y -0,07) y valores de R² bajos (< 0,45).

Al analizar sus curvas de amortiguamiento completas (Anexo Técnico), se confirma que las configuraciones P60-40 mm son las más eficientes, transmitiendo aceleraciones bajas y estables incluso a cargas altas.

3.3. Evaluación funcional: curvas de amortiguamiento

La Figura 5 muestra las curvas de amortiguamiento de las 8 configuraciones evaluadas, junto con los umbrales técnicos de fragilidad definidos por el *Canadian Conservation Institute* [18].

Con el fin de trasladar los resultados de laboratorio a escenarios de aplicación real, las cargas estáticas evaluadas (kg/m^2) se pueden convertir en pesos de producto equivalentes (kg), considerando el área de apoyo de la muestra (400 cm^2). Esta conversión permite expresar las curvas de amortiguamiento en función del peso del producto y definir el rango de aplicación práctica de cada configuración. Los valores detallados de equivalencia se presentan en la Tabla A9 del Anexo Técnico.

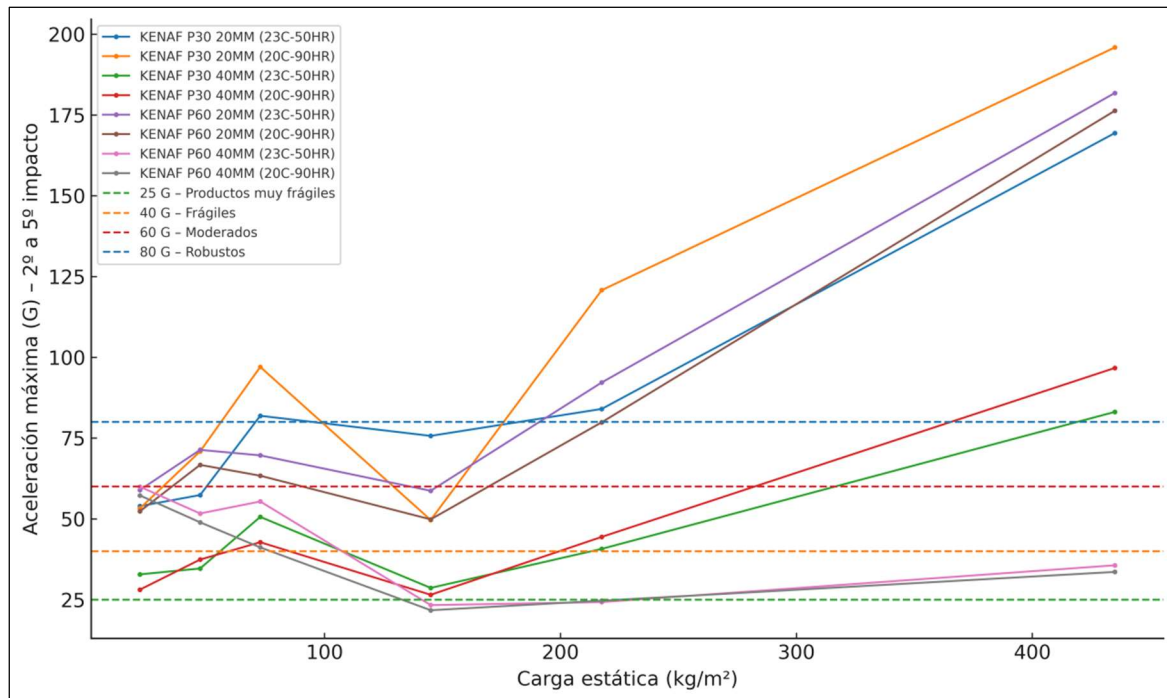


Figura 5. Curvas de aceleración máxima (G) frente al peso del producto para cada configuración experimental, con indicación de umbrales de fragilidad.

Las curvas completas obtenidas en cada configuración pueden consultarse en el Anexo Técnico.

3.4. Clasificación funcional del Kenaf según fragilidad y peso del producto.

A partir de los resultados obtenidos en el presente experimento y basándose en los umbrales de fragilidad definidos [18], se ha realizado una clasificación funcional que considera cinco niveles: muy frágil ($\leq 25 \text{ G}$), frágil ($25\text{--}40 \text{ G}$), moderadamente frágil ($40\text{--}60 \text{ G}$), poco frágil ($60\text{--}85 \text{ G}$) y robusto ($> 85\text{--}100 \text{ G}$).

Como se aprecia en la tabla 4, las configuraciones con 40 mm de espesor y densidad P60 son las únicas que protegen eficazmente productos muy frágiles, frágiles y moderadamente frágiles incluso a pesos elevados. Las configuraciones de 20 mm, especialmente con densidad P30, no son recomendables para productos frágiles o muy frágiles en ningún rango de peso, y solo resultan aceptables para artículos poco frágiles o robustos de bajo peso. Algunas configuraciones intermedias muestran un comportamiento funcional selectivo, con eficacia restringida a ciertos rangos de peso y niveles de fragilidad.

Tabla 4. Clasificación funcional de las configuraciones según umbrales de fragilidad (en base a la media de G del primer impacto).

Densidad	Espesor (mm)	Ambiente	Media G (1° impacto)	Productos protegidos según su categoría
P30	20	20C-90HR	85.91	Robusto (>85 G)
P30	20	23C-50HR	78.71	Poco frágil (60–85 G)
P30	40	20C-90HR	40.44	Moderadamente frágil (40–60 G)
P30	40	23C-50HR	38.92	Frágil (25–40 G)
P60	20	20C-90HR	74.26	Poco frágil (60–85 G)
P60	20	23C-50HR	80.62	Poco frágil (60–85 G)
P60	40	20C-90HR	36.35	Frágil (25–40 G)
P60	40	23C-50HR	38.85	Frágil (25–40 G)

3.5. Evaluación de la fatiga: degradación funcional tras impactos repetidos.

Para cuantificar la pérdida de capacidad amortiguadora se define la degradación funcional relativa como:

$$D = ((G_{2-5} - G_1) / G_1) \cdot 100$$

donde:

- D es la degradación funcional (%),
- G_1 es la aceleración del primer impacto,
- G_{2-5} es la media de los impactos del segundo al quinto.

Se calculó la degradación funcional relativa como el incremento porcentual de la aceleración media en los impactos 2°–5° respecto al primer impacto.

Se estableció un umbral del 20 % de incremento relativo como criterio de fallo funcional. Este criterio encuentra respaldo en la literatura técnica. Guo et al. [19] mostraron que las curvas de amortiguamiento dinámico en materiales alveolares y corrugados presentan un rango de rendimiento óptimo tras el cual la aceleración transmitida aumenta de forma notable, marcando el inicio de la degradación funcional. De manera complementaria, García-Romeu-Martínez et al. [20] observaron que, en configuraciones de cartón corrugado optimizadas, el aumento de aceleración tras múltiples impactos se mantenía cercano al 20%. En este contexto, la elección del 20% como criterio de fallo funcional se considera un valor metodológico razonado y representativo, en línea con precedentes experimentales de materiales de embalaje.

La Tabla 5 resume los valores obtenidos para cada configuración, y la Figura 6 muestra estos resultados con la línea discontinua correspondiente al umbral crítico establecido del 20%. Las configuraciones que superan este valor deberían considerarse de un solo uso, ya que el riesgo de daño al producto protegido aumenta considerablemente. Por el contrario, degradaciones inferiores al 10–15% podrían permitir cierto grado de reutilización controlada, siempre que se verifique su integridad antes de un nuevo ciclo de uso.

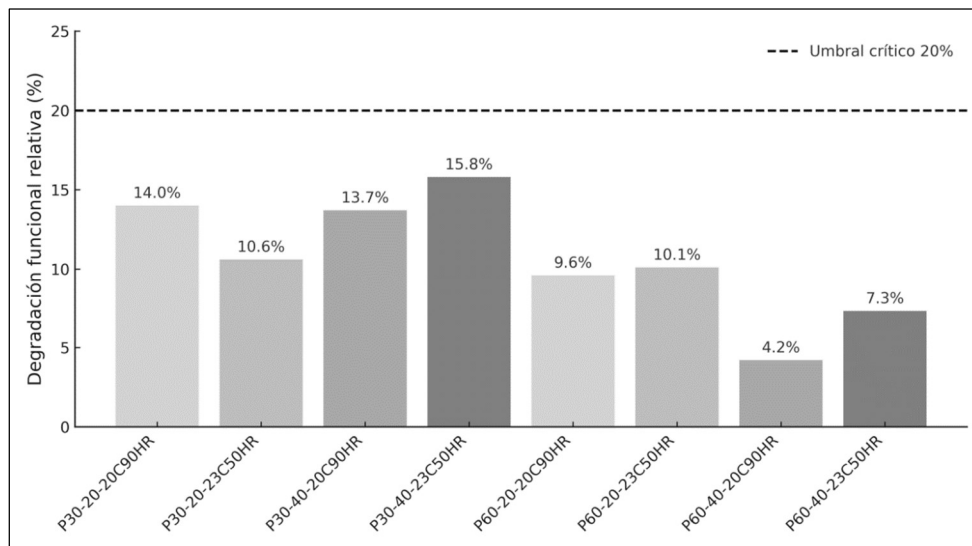


Figura 6. Degradación funcional relativa (%) tras impactos repetidos por configuración experimental, con línea discontinua en el umbral crítico del 20 %.

Tabla 5. Degradación funcional relativa (%) por configuración experimental.

Densidad	Esesor (mm)	Ambiente	Degradación (%)
P30	20	20C-90HR	13.97
P30	20	23C-50HR	10.59
P30	40	20C-90HR	13.72
P30	40	23C-50HR	15.85
P60	20	20C-90HR	9.62
P60	20	23C-50HR	10.11
P60	40	20C-90HR	4.23
P60	40	23C-50HR	7.32

Los resultados indican que ninguna configuración supera el 20 %, lo que confirma que, en condiciones controladas de laboratorio, el Kenaf mantiene una capacidad amortiguadora aceptable tras impactos repetidos. Sin embargo, se observan diferencias notables entre configuraciones:

- Las configuraciones de 40 mm y densidad P60 son las más robustas, con degradaciones muy bajas (4–7 %), lo que refuerza su idoneidad para aplicaciones reutilizables.
- Las configuraciones de 20 mm y P60 muestran degradaciones moderadas (≈10 %), lo que indica un buen desempeño, aunque con menor margen que P60–40 mm.
- Las configuraciones de 20 mm y P30 presentan degradaciones entre 10 y 14 %, aún dentro de los límites de reutilización, pero con mayor susceptibilidad al desgaste funcional en escenarios logísticos exigentes.
- Las configuraciones de 40 mm y P30 alcanzaron los valores más altos de degradación (14–16 %), todavía aceptables, aunque con menor seguridad frente a reutilización en entornos severos.

En conjunto, los resultados permiten establecer una clara jerarquía, las configuraciones P60–40 mm ofrecen la mayor fiabilidad para reutilización, seguidas por P60–20 mm, mientras que las configuraciones con P30, presentan un menor margen de seguridad.

4. Discusión

El análisis de varianza multifactorial confirmó que el espesor es el único factor con influencia estadísticamente significativa en la capacidad amortiguadora del Kenaf, en concordancia con lo señalado en estudios previos sobre compósitos naturales amortiguadores [4-6]. Este resultado concuerda con la evidencia experimental: las configuraciones de 40 mm reducen de forma clara la aceleración transmitida frente a las de 20 mm, lo que demuestra que el espesor aporta un mayor recorrido de deformación y, por tanto, una absorción más eficaz de la energía de impacto.

Los resultados obtenidos (Fig. 5) pueden interpretarse a partir de la estructura interna del kenaf, que condiciona su respuesta frente a la compresión. Tal como señalan Akil et al. [7], el tallo está compuesto por una corteza fibrosa (bast), rica en celulosa cristalina y microfibrillas orientadas, y un núcleo leñoso (core), más amorfo y con mayor contenido de lignina. Esta dualidad estructural genera una respuesta anisótropa, donde la corteza aporta rigidez y capacidad de recuperación elástica, mientras que el núcleo, menos denso y con lumen más amplio, disipa energía mediante deformación controlada. La combinación de ambas fases y la presencia de cavidades internas explican las curvas de amortiguamiento progresivas y estables observadas en el rango de cargas estáticas de 21,75 a 217 kg/m², así como la alta eficiencia en la absorción de energía registrada en las configuraciones de 40 mm de espesor y densidad P60.

Con el objetivo de contextualizar los resultados experimentales del Kenaf, se compararon las curvas de amortiguamiento obtenidas con los datos publicados para espumas sintéticas convencionales de polietileno expandido (PE) y poliestireno expandido (EPS). Las referencias seleccionadas corresponden a materiales empleados habitualmente en embalajes de protección, ensayados bajo metodologías ASTM D1596 y caídas equivalentes de 24 a 30 pulgadas [21–23].

Según el fabricante JSP, el PE presenta un rango eficaz de carga estática de 176–1580 kg/m² para una fragilidad de 60 G y espesores de 25–50 mm [21]. Dentro de este intervalo, el material muestra una reducción significativa de la aceleración transmitida tras múltiples impactos, manteniendo su integridad estructural. Por su parte, el boletín técnico de la EPS Industry Alliance indica que el EPS de densidad 20 kg/m³ alcanza su rango óptimo en 350–2100 kg/m² con deformaciones útiles del 50–60 % de su espesor [22]. Estudios más recientes en EPS de mayor densidad (\approx 55 kg/m³) confirman reducciones del 20–30% en la aceleración de impacto para caídas de 0.6 m, lo que evidencia su buena capacidad amortiguadora [23].

En el presente trabajo, el Kenaf fue evaluado en un rango de carga estática de 21.75–435 kg/m² (0.031–0.619 psi), que se sitúa parcialmente dentro del intervalo operativo del PE y en el umbral inferior del EPS. Dentro de ese rango, el material de Kenaf mostró valores de aceleración máxima comparables a los del PE de baja densidad y claramente inferiores a los

del EPS. Ello sugiere que el comportamiento del Kenaf se aproxima al PE en términos de amortiguamiento dinámico, pese a su estructura fibrosa compacta y densidad superior.

Estas observaciones confirman que el Kenaf puede ofrecer una capacidad de absorción de impactos equivalente al del PE en condiciones de baja carga estática, manteniendo además una mayor rigidez estructural y una respuesta más progresiva frente a la compresión. En comparación con el EPS, el Kenaf muestra una ventaja evidente en el régimen de cargas bajas ($<435 \text{ kg/m}^2$), donde las espumas de poliestireno tienden a comportarse de forma más rígida y transmitir picos de aceleración más elevados.

En lo referente a la densidad del kenaf y a las condiciones ambientales de humedad, no mostraron efectos significativos, lo que coincide con observaciones de otros autores en materiales lignocelulósicos bajo condiciones controladas [4]. Esta ausencia de influencia directa refuerza la idea de que, al menos en los rangos estudiados, la geometría del material (espesor) es más determinante que la densidad nominal o la humedad relativa en su comportamiento dinámico. Este hallazgo es relevante porque sugiere que, para aplicaciones prácticas, puede priorizarse el diseño de espesor sobre el control estricto de densidad o acondicionamiento ambiental.

El modelo de regresión lineal entre carga estática y aceleración transmitida mostró que las configuraciones de 20 mm presentan pendientes más pronunciadas, lo que refleja una mayor sensibilidad frente al incremento de masa del producto. En contraste, las de 40 mm exhibieron pendientes más bajas y valores de R^2 aceptables, indicando un comportamiento más estable y robusto bajo distintas cargas. En particular, la configuración P60–40 mm mantuvo prácticamente constante la aceleración en el rango analizado. Este comportamiento no debe interpretarse como una mejora real con el incremento de peso, sino como un artefacto estadístico asociado a la respuesta casi plana en G. En este rango de cargas ($21.75\text{--}435 \text{ kg/m}^2$), la capacidad de amortiguación del kenaf es tan elevada que los valores de G apenas crecen, generando un efecto de meseta en las curvas. De haberse ensayado con cargas estáticas superiores, probablemente se habría observado un incremento más acusado de G, reflejando el límite de absorción del material. Lo relevante es que estas configuraciones exhiben la máxima capacidad amortiguadora dentro del rango experimental.

Las curvas de amortiguamiento obtenidas al correlacionar aceleración G y peso del producto ofrecen una visión funcional del rendimiento del Kenaf como material protector. La representación frente al peso del producto, junto con los umbrales de fragilidad establecidos, permitió traducir los resultados experimentales en criterios prácticos de aplicación.

El análisis evidencia que las configuraciones con espesor de 40 mm y densidad P60 son las únicas capaces de proteger de forma eficaz productos clasificados como muy frágiles ($\leq 25 \text{ G}$), frágiles (25–40 G) o moderadamente frágiles (40–60 G), incluso a masas elevadas. En contraste, las configuraciones de 20 mm, especialmente con densidad P30, transmitieron aceleraciones superiores a 85 G en gran parte del rango de cargas, lo que limita su uso a productos poco frágiles o robustos de baja masa.

La evaluación de la fatiga aporta una visión complementaria. Todas las configuraciones presentaron degradaciones inferiores al 20 % [19-20], lo que significa que, en condiciones controladas, el Kenaf mantiene una capacidad amortiguadora aceptable tras impactos repetidos. No obstante, se observan diferencias: las configuraciones P60–40 mm destacan con degradaciones muy bajas ($< 8\%$), lo que refuerza su idoneidad para aplicaciones reutilizables. En cambio, las configuraciones de 20 mm y P30 alcanzaron valores cercanos al 15 %, todavía dentro del rango aceptable, aunque con menor margen de seguridad frente a escenarios de transporte más severos.

Cabe destacar que el kenaf ofrece una ventaja diferencial en términos ambientales, ya que se trata de una fibra natural renovable y biodegradable, lo que supone un menor impacto frente a materiales sintéticos convencionales. Esta combinación de desempeño técnico aceptable y beneficio ambiental refuerza su potencial como alternativa en embalajes de protección dinámica.

5. Conclusiones

El análisis experimental confirmó que el espesor es el factor más determinante en la capacidad amortiguadora del Kenaf, mientras que la densidad solo mostró un efecto secundario y la humedad relativa no tuvo influencia significativa en las condiciones evaluadas. Las configuraciones de 40 mm fueron las más eficaces, capaces de proteger productos muy frágiles ($\leq 25\text{ G}$), frágiles (25–40 G) y moderadamente frágiles (40–60 G), y con el rango de pesos evaluado entre 0.87 y 17.4 kg.

El análisis de fatiga confirmó que ninguna de las configuraciones superó el 20% de degradación funcional, lo que demuestra que el kenaf mantiene una capacidad amortiguadora aceptable tras impactos repetidos en condiciones controladas de laboratorio. Estos resultados respaldan el potencial del kenaf como material reutilizable en embalajes de protección dinámica, siempre que se seleccione adecuadamente la configuración en función de las exigencias logísticas.

Desde el punto de vista práctico, los resultados permiten establecer criterios técnicos claros para seleccionar configuraciones de Kenaf según el peso y la fragilidad del producto, aportando una herramienta útil para ingenieros y diseñadores de embalajes.

Como líneas de trabajo futuras, se propone ampliar los ensayos a diferentes alturas de caída, realizar comparaciones directas con materiales sintéticos convencionales (EPS, PE), evaluar el comportamiento en condiciones reales de transporte y explorar soluciones híbridas que combinen Kenaf con materiales reciclables.

En conjunto, este estudio consolida el potencial del Kenaf como material amortiguador emergente, aportando una base experimental sólida para su implementación en embalajes sostenibles y eficientes.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, F.S. y V.C.; metodología, F.S. y V.C.; validación, F.S. y V.C.; análisis formal, F.S.; investigación, F.S.; recursos, F.S.; curación de datos, F.S.; redacción—

preparación del borrador original, F.S.; redacción—revisión y edición, F.S.; visualización, F.S.; supervisión, V.C.; administración del proyecto, V.C. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Embalaje y Transporte de AIDIMME por su apoyo en la realización de los ensayos experimentales de amortiguamiento, así como a la Doctora María Inmaculada Sánchez López, por su colaboración en las tareas de revisión del manuscrito.

Conflicto de Interés

Los autores no reportan conflictos de interés relacionados con esta investigación.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

En la preparación de este artículo se utilizó la herramienta ChatGPT (OpenAI) como apoyo en tareas de redacción y edición de estilo. Todo el contenido científico, los resultados experimentales y las conclusiones fueron elaborados por los autores, quienes revisaron y aprobaron íntegramente el manuscrito final.

Fuente de financiamiento

Esta investigación no recibió financiación específica. El trabajo se desarrolló en el marco de un doctorado industrial, con el apoyo parcial de la empresa AIDIMME, que financia parte del programa doctoral y facilita el uso de sus instalaciones, así como una dedicación parcial del autor.

Referencias

- [1] Beyond Plastics, *The Problems with Expanded Polystyrene (EPS)*, fact sheet, may. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.beyondplastics.org/fact-sheets/polystyrene>.
- [2] R. Liu, Z. Zhao, X. Wang, Y. Zhang, and Y. Chen, "Well-cushioned and highly-elastic aerogel for multifunctional intelligent transportation packaging," *Chemical Engineering Journal*, vol. 493, art. 152660, ago. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.152660.
- [3] I. González Romero, H. Buldeo Rai, A. Ortiz Bas, y J. C. Prado Prado, "Can reusable packaging revolutionise e-commerce? Unveiling the environmental impact through a comparative carbon footprint analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 476, art. 143738, oct. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143738.
- [4] N. V. David y A. Mohd, "Moisture absorption properties and shock cushioning characteristics of bio-based polyurethane foam composites," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. SI 5, no. 2, pp. 157–168, 2018. Disponible en: <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/39386/>
- [5] R. Saengwong-ngam et al., "Cushion performance of eco-friendly natural rubber latex foam composite with bamboo leaf fiber for impact protection of guava", *Postharvest Biology and Technology*, vol. 208, p. 112663, feb. 2024, doi: 10.1016/j.postharvbio.2023.112663.
- [6] E. Şimşir, Y. Akçin Ergün, y İ. Yavuz, "Investigation of Damping Properties of Natural Fiber-Reinforced Composites at Various Impact Energy Levels," *Polymers*, vol. 16, no. 24, art. 3553, dic. 2024, doi: 10.3390/polym16243553.

- [7] H. M. Akil, M. F. Omar, A. A. M. Mazuki, S. Safiee, Z. A. M. Ishak, y A. Abu Bakar, "Kenaf fiber reinforced composites: A review," *Materials & Design*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4107–4121, sep. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.04.008.
- [8] A. H. Jamadi, N. Razali, M. Petrù, M. M. Taha, N. Muhammad, y R. A. Ilyas, "Effect Of Chemically Treated Kenaf Fibre On Mechanical And Thermal Properties of PLA Composites Prepared Through Fused Deposition Modeling (FDM)," *Polymers*, vol. 13, no. 19, p.3299, sep. 2021, doi: 10.3390/polym13193299.
- [9] N. Saba, M. T. Paridah, y M. Jawaid, "Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 76, pp. 87–96, feb. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043.
- [10] E. Kasi, S. Ramasamy, R. Kirubakaran, R. Munusamy, E. E. Sudalaimani, y A. Karuppasamy, "Tensile, Dynamic Mechanical, and Vibration Behavior of Layering Sequence Design Effect of Glass Intertwined Natural Kenaf Woven Polymeric Laminates," *Journal of Natural Fibers*, vol. 21, no. 1, feb. 2024, doi: 10.1080/15440478.2024.2316791.
- [11] ASTM International, *ASTM D1596-14(2021): Standard Test Method for Dynamic Shock Cushioning Characteristics of Packaging Material*, ASTM International, 2021, doi: 10.1520/D1596-14R21. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d1596-14.html>.
- [12] International Organization for Standardization, *ISO 2233:2000, Packaging — Complete, filled transport packages and unit loads — Conditioning for testing*. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/03/24/32409.html>.
- [13] Lansmont Corporation, *Model 15D & 23D Shock Test Systems*. [En línea]. Disponible en: <https://www.lansmont.com/products/shock-testers/model-15-23>
- [14] Kistler Group, *General purpose K-Shear accelerometers, 25 ... 5000 g, top connector / 8704B*. [En línea]. Disponible en: <https://www.kistler.com/ES/es/p/accelerometro-de-proposito-general-k-shear-8704b500/00000000018007037>.
- [15] ASTM International, *ASTM D4169-23: Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems*. ASTM International, 2023, doi: 10.1520/D4169-23. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d4169-23.html>.
- [16] J. Navarro, "Metodologías para el diseño y selección de embalajes de amortiguamiento optimizados, en función de su comportamiento funcional, económico y medioambiental," tesis doctoral, Departamento de Proyectos de Ingeniería, UPV, Valencia, España, 2015.
- [17] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D graphics environment," *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007, doi: 10.1109/mcse.2007.55.
- [18] P. Marcon, *Features of Effective Packaging and Transport for Artwork – Technical Bulletin 34*, Canadian Conservation Institute, Ottawa, ON, Canada. [En línea]. Disponible en: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/effective-packaging-transport-artwork.html>
- [19] Y. Guo y J. Zhang, "Shock absorbing characteristics and vibration transmissibility of honeycomb paperboard," *Shock and Vibration*, vol. 11, n. 5-6, pp. 521–531, nov. 2003, doi: 10.1155/2004/936804.
- [20] M. A. Garcia-Romeu-Martinez, M. A. Sek, y V. A. Cloquell-Ballester, "Effect of initial pre-compression of corrugated paperboard cushions on shock attenuation characteristics in repetitive impacts," *Packaging Technology and Science*, vol. 22, no. 6, pp. 323–334, mar. 2009, doi: 10.1002/pts.856.
- [21] ARPLANK Sales, *Designing for Optimal Cushioning Performance with arPro® EPP and arPak® EPE: Technical Design Guide*, 2020. [En línea].
- [22] EPS Industry Alliance, *Cushion Curve Properties of Expanded Polystyrene Packaging*, Technical Bulletin, Crofton (MD, USA), 2016: EPS Industry Alliance, 2018.
- [23] X. An, B. Huang, y D. Shi, "Cushioning properties and application of expanded polystyrene for a dynamic nonlinear system," *Engineering Reports*, vol. 5, no. 9, abr. 2023, doi: 10.1002/eng2.12648.