

INFORME PROYECTOS— 2025

**INTEGRACIÓN DE ELEMENTOS DE AMORTIGUACIÓN EN PRODUCTOS Y
SISTEMAS DE EMBALAJE SOSTENIBLES
“ELECTROPACK”**

Informe: Final de Resultados

Número de proyecto: 22500001

Expediente: IMAMCA/2025/2

Duración: Del 01/01/2025 al 31/12/2025

Coordinado en AIDIMME por: Francisco Sánchez



GENERALITAT
VALENCIANA

IVACE+i

INSTITUTO VALENCIANO
DE COMPETITIVIDAD
E INNOVACIÓN

AIDIMME
Instituto Tecnológico

Índice

ÍNDICE	1
1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS DEL PROYECTO	1
2. RESULTADOS OBTENIDOS	2
2.1. FASE 1. CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO E INTERPRETACIÓN FUNCIONAL	2
2.2. CURVAS G VS. CARGA. COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO AMORTIGUADOR	3
2.3. VINCULACIÓN DE LAS CURVAS G VS. CARGA CON EL DISEÑO DEL SISTEMA DE EMBALAJE REAL	5
2.4 FASE 2. ENSAYOS DE CAÍDA LIBRE	7
3. ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO	9
3.1. DEFINICIÓN DEL ALCANCE Y PLANIFICACIÓN TÉCNICA	9
3.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE EMBALAJE	10
3.3. FASE 3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y ACONDICIONAMIENTO	13
3.4. FASE 4. EJECUCIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES	14
3.5. FASE 5. TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	15
3.6. FASE 6. REDACCIÓN TÉCNICA Y ELABORACIÓN DEL INFORME	16
4. ALCANCE, COLABORADORES Y PÚBLICO OBJETIVO	17
5. ACCIONES DE DIFUSIÓN Y TRANSFERENCIA	18
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES	19
7. ANÁLISIS TÉCNICO COMPLEMENTARIO: ENSAYOS DE VIBRACIÓN Y CHOQUE EN BATERÍAS ELÉCTRICAS	21
7.1. JUSTIFICACIÓN Y ENCAJE EN EL PROYECTO ELECTROPACK	21
7.2. TIPOLOGÍAS DE BATERÍAS ELÉCTRICAS Y ESTADO TECNOLÓGICO	21
7.3. ANÁLISIS DE RIESGOS ASOCIADOS A ENSAYOS DINÁMICOS EN BATERÍAS	23
7.4. MARCO NORMATIVO Y REQUISITOS DE ENSAYO APLICABLES	24
7.5. REQUISITOS DE EQUIPAMIENTO E INFRAESTRUCTURAS DE LABORATORIO	24
7.6. IMPLICACIONES PARA EL DESARROLLO FUTURO DE CAPACIDADES DE ENSAYO	25
8. ANEXOS Y BIBLIOGRAFÍA	26

1. Introducción, objetivos del proyecto

El proyecto ELECTROPACK constituye la continuación directa de los proyectos ECODAMPING y GREENPACK, desarrollados previamente por AIDIMME en el ámbito del embalaje sostenible. Mientras que GREENPACK se centró principalmente en la caracterización funcional de materiales celulósicos con capacidad amortiguadora, ELECTROPACK profundiza en la integración de dichos materiales en sistemas completos de embalaje para productos sensibles a sollicitaciones mecánicas.

El objetivo general del proyecto ha sido integrar materiales sostenibles en el diseño de sistemas de embalaje para productos sensibles, validando su comportamiento frente a sollicitaciones reales de transporte y asegurando niveles de protección compatibles con los requisitos normativos y de mercado.

El proyecto se ha orientado, por tanto, a trasladar el conocimiento generado en fases previas de investigación hacia soluciones de embalaje aplicables, evaluando su comportamiento en condiciones representativas de transporte y distribución.

2. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en el proyecto ELECTROPACK confirman la viabilidad técnica del uso de materiales celulósicos, y en particular del Kenaf prensado, como elementos amortiguadores en embalajes. El análisis experimental ha permitido identificar de forma clara los parámetros más influyentes en la respuesta dinámica del sistema.

Los ensayos de impacto vertical realizados muestran que el espesor del material es el factor más determinante en la reducción de la aceleración transmitida al producto. Las configuraciones de 40 mm de espesor presentan valores de aceleración significativamente inferiores a las de 20 mm, situándose en rangos compatibles con la protección de productos frágiles y moderadamente frágiles.

Este resultado constituye la base para la selección de configuraciones de embalaje en función del peso y la fragilidad del producto.

El análisis estadístico mediante ANOVA multifactorial confirma que el espesor tiene una influencia estadísticamente significativa en la aceleración transmitida ($p < 0,05$), mientras que la densidad del material y las condiciones ambientales evaluadas no muestran efectos significativos en el rango de estudio considerado.

Las curvas de amortiguamiento obtenidas permiten establecer rangos de aplicación del sistema de embalaje en función del peso del producto y su fragilidad. En particular, las configuraciones de Kenaf P60 de 40 mm de espesor muestran un comportamiento estable frente a incrementos de carga estática, manteniendo valores de aceleración relativamente constantes.

Asimismo, la evaluación de la degradación funcional tras impactos repetidos indica que el material mantiene su capacidad amortiguadora dentro de márgenes aceptables, lo que refuerza su potencial para aplicaciones reutilizables en determinados escenarios logísticos.

2.1. Fase 1. Curvas de amortiguamiento e interpretación funcional

Las curvas de amortiguamiento obtenidas para las distintas configuraciones de Kenaf permiten analizar con mayor precisión la respuesta dinámica del material en función de la carga estática aplicada. Para las configuraciones de 20 mm de espesor se observa un incremento progresivo de la aceleración transmitida conforme aumenta la carga, lo que limita su aplicabilidad a productos ligeros y con niveles de fragilidad moderados. Por el contrario, las configuraciones de 40 mm muestran pendientes claramente inferiores en las curvas de amortiguamiento, evidenciando una mayor capacidad de disipación de energía. Este efecto es especialmente acusado en las configuraciones de

mayor densidad (P60), donde la aceleración transmitida permanece relativamente estable en un amplio rango de cargas estáticas, lo que resulta crítico para aplicaciones en productos sensibles.

Desde un punto de vista funcional, estos resultados permiten definir criterios de selección del sistema de embalaje basados en el peso del producto y su índice de fragilidad. Las configuraciones de 40 mm de espesor se posicionan como la opción más robusta para productos frágiles, mientras que las de 20 mm pueden considerarse adecuadas cuando se prioriza la reducción de material y el producto presenta mayor robustez.

El análisis estadístico realizado mediante ANOVA multifactorial confirma que el espesor del material es el único factor con influencia estadísticamente significativa sobre la aceleración transmitida ($p < 0,05$). Aunque la densidad y las condiciones ambientales no muestran efectos significativos en el rango analizado, se observa que una mayor densidad contribuye a una menor dispersión de resultados y a una mayor estabilidad frente a impactos repetidos.

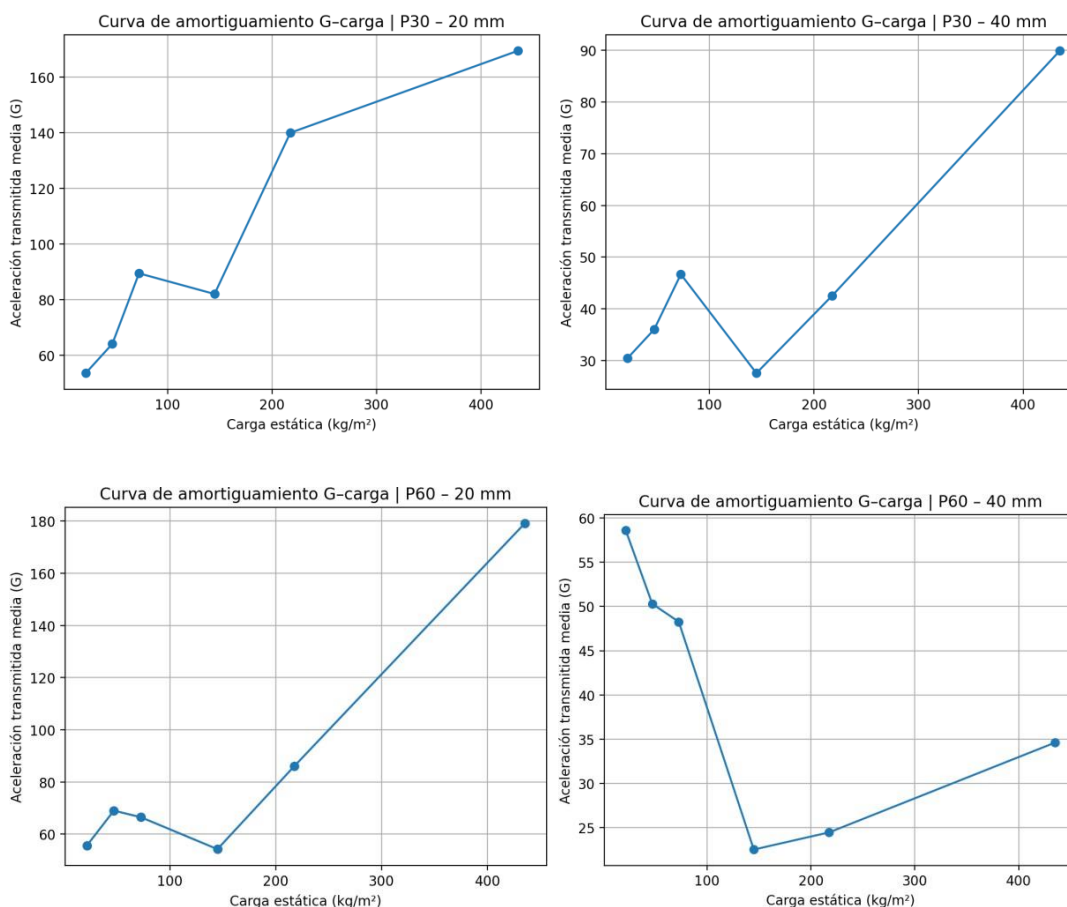
Finalmente, la evaluación del comportamiento frente a impactos sucesivos pone de manifiesto que el material no experimenta una degradación funcional abrupta. La capacidad amortiguadora se mantiene dentro de márgenes aceptables, lo que refuerza la idoneidad del sistema para escenarios logísticos reales caracterizados por múltiples eventos de choque.

Con el objetivo de reforzar el análisis de resultados, se han elaborado representaciones gráficas a partir de los registros experimentales, permitiendo una interpretación comparativa más clara.

En conjunto, las curvas de amortiguamiento obtenidas permiten definir rangos de aplicación claros para cada configuración de material, constituyendo una herramienta directa de apoyo al diseño del sistema de embalaje.

2.2. Curvas G vs. Carga. Comparativo del comportamiento amortiguador.

Las curvas G vs. carga permiten visualizar de forma directa la relación entre la carga estática aplicada y la aceleración máxima transmitida al producto. Estas representaciones constituyen una herramienta clave para la selección del sistema de embalaje en función del peso del producto y su nivel de fragilidad.



En coherencia con los resultados de la Fase 1, las curvas G vs. carga confirman que el espesor del material amortiguador es el parámetro con mayor influencia en la reducción de la aceleración transmitida.

Las curvas correspondientes a las configuraciones de 40 mm muestran un comportamiento más estable frente a incrementos de carga estática, manteniendo niveles de aceleración relativamente constantes incluso a cargas elevadas. Este comportamiento resulta especialmente adecuado para la protección de productos de fragilidad media y alta, donde la estabilidad de la respuesta es un requisito crítico.

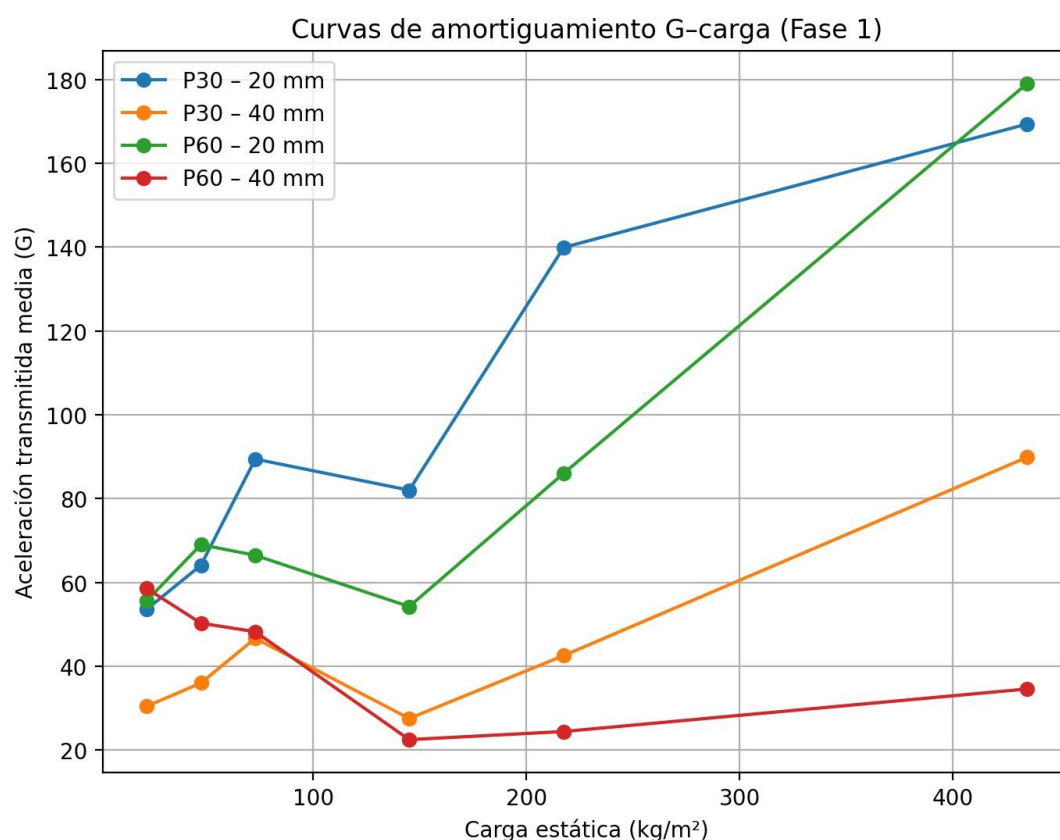
La densidad del material (P30 frente a P60) presenta una influencia secundaria en el nivel absoluto de aceleración transmitida. No obstante, las configuraciones de mayor densidad tienden a mostrar una menor dispersión de resultados y una mayor regularidad en la respuesta, lo que sugiere una mejor repetibilidad del comportamiento amortiguador, especialmente en condiciones de carga elevada.

La comparación de las curvas obtenidas bajo distintas condiciones ambientales no

evidencia modificaciones significativas en la forma ni en la tendencia general de las curvas G–carga. Esto indica que el material mantiene su funcionalidad amortiguadora en condiciones ambientales exigentes, reforzando su idoneidad para aplicaciones reales de transporte y distribución.

Las curvas de amortiguamiento obtenidas permiten establecer criterios técnicos claros para el diseño de sistemas de embalaje, facilitando la selección del espesor y la configuración del material en función del peso del producto y su nivel de fragilidad.

En el siguiente gráfico comparativo se aprecia los diferentes niveles de amortiguación de los materiales analizados.



2.3. Vinculación de las curvas G vs. carga con el diseño del sistema de embalaje real.

La interpretación de las curvas G vs. carga obtenidas en el presente proyecto adquiere pleno sentido cuando se relaciona directamente con el diseño del sistema de embalaje real desarrollado. El sistema evaluado se basa en una caja de cartón con protecciones interiores de Kenaf, configuradas en espesores de 20 y 40 mm, y diseñadas para alojar productos con geometrías y pesos representativos de aplicaciones industriales reales.

Las configuraciones de 20 mm de espesor, a la vista de las pendientes observadas en las curvas, presentan un comportamiento adecuado únicamente en rangos de carga bajos. Estas configuraciones resultan coherentes con diseños de embalaje orientados a productos ligeros, donde la optimización de material y la reducción de volumen son factores prioritarios.

Por el contrario, las configuraciones de 40 mm de espesor muestran curvas significativamente más planas, indicativas de una mayor estabilidad del comportamiento amortiguador frente a incrementos de carga. Este comportamiento justifica su integración en sistemas de embalaje destinados a productos de mayor peso o fragilidad, donde la reducción del riesgo de daño durante el transporte prevalece sobre la minimización del uso de material.

Configuración Kenaf	Espesor	Rango de carga recomendado	Aplicabilidad en embalaje electrónico
P30	20 mm	Bajo	Productos ligeros, baja fragilidad
P60	20 mm	Bajo–medio	Productos ligeros, fragilidad moderada
P30	40 mm	Medio	Productos de peso medio, fragilidad moderada
P60	40 mm	Medio–alto	Productos frágiles y/o de mayor peso

Tabla 1. Síntesis. Relación entre configuración de embalaje, rango de carga y aplicabilidad

Desde el punto de vista del diseño de la caja, estos resultados permiten establecer criterios claros de selección del espesor de las protecciones interiores en función del peso del producto, su índice de fragilidad y el perfil de distribución esperado. De este modo, las curvas obtenidas se convierten en una herramienta directa de apoyo a la toma de decisiones de diseño.

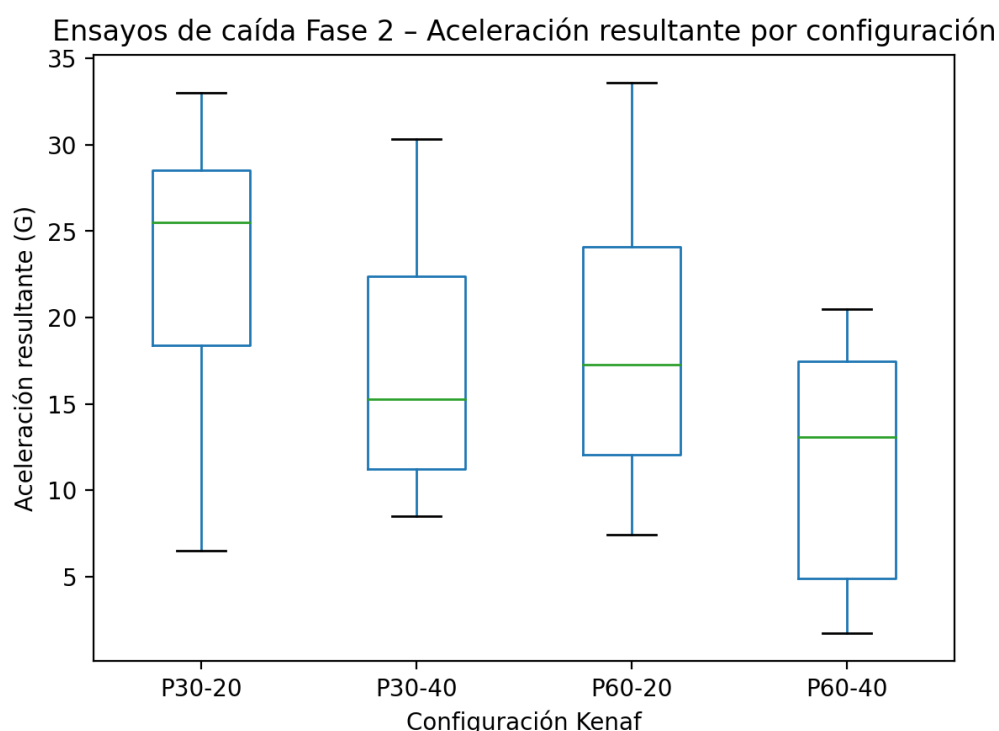
De este modo, los resultados experimentales obtenidos se traducen directamente en criterios de diseño aplicables a soluciones de embalaje industrial.

2.4 Fase 2. Ensayos de caída libre.

Durante esta fase se evaluó el comportamiento dinámico del sistema de embalaje completo, integrando las protecciones interiores de Kenaf en una caja real y sometiéndolo a ensayos de caída representativos de la distribución logística.

Los ensayos incluyeron impactos sobre cara, canto y esquina, a diferentes alturas de caída, registrándose la aceleración pico en los tres ejes y calculándose la aceleración resultante. Los resultados muestran diferencias claras entre configuraciones, tanto en el nivel medio de aceleración transmitida como en la dispersión de los valores registrados.

Las configuraciones con mayor espesor de material amortiguador presentan valores de aceleración resultante más bajos y una menor variabilidad entre impactos, mientras que las configuraciones de menor espesor muestran una mayor dispersión y picos de aceleración más elevados, especialmente en caídas de tipo esquina.



El análisis del box-plot correspondiente a los ensayos de caída de la Fase 2 muestra que las configuraciones P30-40 mm y P60-20 mm presentan valores de aceleración resultante similares, con rangos parcialmente solapados. Este resultado indica que, en un sistema de embalaje real, la interacción entre el material amortiguador y la geometría del embalaje puede modificar la influencia relativa de los parámetros del material. En este contexto, una mayor densidad puede compensar un menor espesor,

dando lugar a un comportamiento dinámico comparable, aspecto que no se manifiesta de forma tan clara en la caracterización del material aislado mediante curvas de amortiguamiento.

Los ensayos de caída libre realizados en la Fase 2 han permitido validar el comportamiento del sistema de embalaje completo en condiciones representativas de la distribución logística. Los resultados confirman que las configuraciones seleccionadas proporcionan niveles de protección adecuados, mostrando una reducción de la aceleración transmitida, una menor dispersión de la respuesta y una incidencia limitada de daño visible. En conjunto, el sistema de embalaje desarrollado puede considerarse técnicamente satisfactorio para aplicaciones reales.

3. Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

Las actividades del proyecto ELECTROPACK se han desarrollado siguiendo una secuencia técnica estructurada, orientada a garantizar la trazabilidad entre la caracterización del material y la validación del sistema de embalaje completo.

Durante el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo diversas actividades técnicas orientadas a la validación del sistema de embalaje propuesto. En una primera fase se definieron las configuraciones de material a evaluar, seleccionando paneles de Kenaf en diferentes densidades y espesores.

Posteriormente se diseñó un sistema de embalaje completo, integrando las protecciones interiores en una caja de dimensiones representativas de un producto electrónico tipo. El diseño se realizó bajo criterios de optimización del uso de material y compatibilidad con procesos industriales.

Las actividades experimentales incluyeron ensayos de caída libre conforme a la norma *ISO 2248. Packaging — Complete, filled transport packages — Vertical impact test by dropping. International Organization for Standardization*. Estas actividades permitieron simular de forma realista las condiciones de distribución y transporte a las que se enfrentan los productos sensibles a sollicitaciones mecánicas.

La adquisición y tratamiento de datos se realizó mediante sistemas instrumentados de alta precisión, permitiendo registrar la aceleración máxima transmitida en cada impacto y analizar la evolución del comportamiento del material frente a sollicitaciones repetidas.

El desarrollo del proyecto ELECTROPACK se estructuró en una secuencia ordenada de actividades técnicas, permitiendo avanzar de forma progresiva desde la definición conceptual hasta la validación experimental del sistema de embalaje propuesto. A continuación, se describen las principales etapas ejecutadas.

3.1. Definición del alcance y planificación técnica.

Durante esta fase inicial se realizó la revisión de los resultados obtenidos en los proyectos precedentes ECODAMPING y GREENPACK, con el objetivo de definir el alcance técnico del proyecto ELECTROPACK y garantizar la continuidad metodológica de la investigación.

A partir de este análisis se establecieron las configuraciones de material a evaluar, los espesores de interés y las condiciones de ensayo representativas del transporte de productos sensibles. Asimismo, se definió una planificación experimental orientada a

asegurar la robustez y repetitividad de los resultados, contemplando la evaluación de un número suficiente de muestras por configuración y condición de ensayo.

En este sentido, se planificó la realización de ensayos con múltiples probetas por configuración, así como la repetición sistemática de impactos y eventos de caída, lo que permitió disponer de un volumen de datos amplio para el posterior tratamiento estadístico. En la fase de validación del sistema de embalaje completo se evaluaron más de cincuenta ensayos de caída, cubriendo distintas orientaciones e impactos, mientras que en la fase de caracterización del material se consideraron réplicas suficientes por carga y configuración para garantizar la fiabilidad de las curvas de amortiguamiento obtenidas.

Esta planificación experimental ha permitido abordar el proyecto con un enfoque riguroso, asegurando que las conclusiones extraídas se basan en resultados repetitivos y estadísticamente representativos.

3.2. Diseño del sistema de embalaje.

El diseño del sistema de embalaje evaluado en el proyecto ELECTROPACK se ha realizado con el objetivo de garantizar unas condiciones experimentales controladas y reproducibles, permitiendo analizar de forma aislada el comportamiento del material amortiguador y su influencia en la protección del producto.

3.2.1. Embalaje exterior

El sistema de embalaje exterior se ha basado en una caja de cartón de geometría regular, dimensionada para alojar de forma ajustada las protecciones interiores y el producto ensayado. Este diseño busca representar una solución realista y habitual en la distribución de productos, al tiempo que reduce la influencia de factores externos no controlados durante los ensayos.

Dimensiones exteriores Caja: 380 x 285 x 270 mm

Dimensiones interiores Caja (L x A x H): 370 x 275 x 250 mm



Imagen 1. Embalaje exterior Caja de cartón ondulado

3.2.2 Protecciones interiores.

En el interior de la caja se han integrado elementos amortiguadores fabricados en material celulósico de Kenaf, configurados en distintos espesores y densidades. El diseño de las protecciones interiores se ha orientado a asegurar un posicionamiento estable del producto y una correcta transmisión de las sollicitaciones dinámicas al material amortiguador, evitando desplazamientos internos que pudieran introducir variabilidad adicional en los resultados.

Planchas de Kenaf de espesor 20 mm.

Espesor 20 mm		Dimensiones	Unidades/Caja
	Plancha base / superior	365 x 270 mm	2
	Plancha lateral corto	270 x 210 mm	2
	Plancha lateral largo	325 x 210 mm	2

Planchas de Kenaf de espesor 40 mm.

Espesor 40 mm		Dimensiones	Unidades/Caja
	Plancha base / superior	365 x 270 mm	2
	Plancha lateral corto	270 x 170 mm	2
	Plancha lateral largo	285 x 170 mm	2

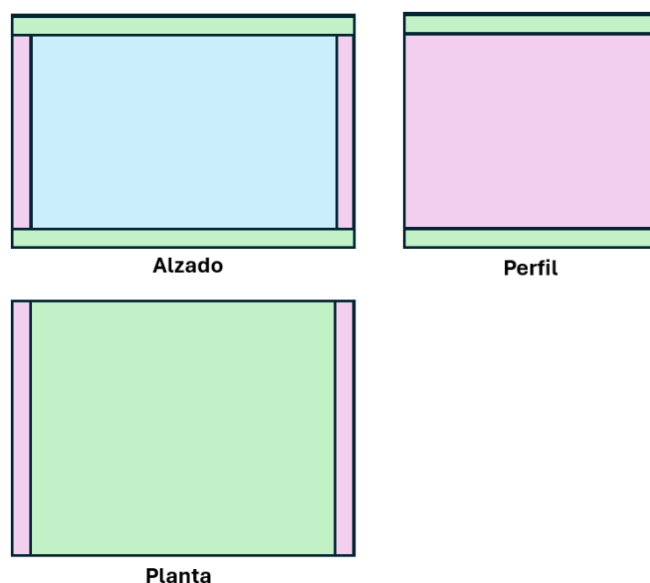


Figura 1. Croquis de la posición de las distintas planchas de kenaf

3.2.3. Definición de los productos.

Asimismo, para la realización de los ensayos se han fabricado dos productos tipo, de elevada rigidez estructural y geometría sencilla. La utilización de productos con elevada rigidez estructural y sin elementos frágiles específicos permite minimizar la influencia de la propia fragilidad del producto en la respuesta al impacto, de modo que el comportamiento observado pueda atribuirse principalmente al sistema de embalaje.



Imagen 2. Productos tipo

Protecciones Interiores:	Dimensión Producto:	Peso:
Espesor 20 mm	330 x 235 x 210 mm	11.4 kg
Espesor 40 mm	290 x 195 x 170 mm	8,2 kg

La elección de geometrías simples y simétricas facilita, además, la repetitividad de los ensayos y la comparación entre configuraciones, reduciendo la dispersión asociada a concentraciones locales de tensiones o a modos de fallo particulares del producto. Este enfoque experimental resulta clave para fijar de manera clara las condiciones de ensayo y extraer conclusiones robustas sobre la influencia del material amortiguador y del diseño del sistema de embalaje.

En conjunto, el diseño del embalaje exterior e interior, junto con la selección de productos de ensayo robustos y de geometría controlada, ha permitido establecer una base experimental sólida y coherente, orientada a la obtención de resultados comparables y técnicamente representativos.

3.3. Fase 3. Preparación de muestras y acondicionamiento.

Previamente a la ejecución de los ensayos experimentales, se llevó a cabo la preparación y acondicionamiento de las muestras a 23°C y 50% de humedad relativa, con el objetivo de garantizar la repetitividad de los resultados y minimizar la influencia de variables externas no controladas. Esta fase resulta especialmente relevante en el caso de materiales celulósicos, cuyo comportamiento mecánico puede verse afectado por las condiciones ambientales.

Las muestras de material amortiguador se fabricaron conforme a las configuraciones definidas en la fase de planificación, controlándose de manera sistemática el espesor, la densidad y las dimensiones finales de cada probeta. Asimismo, se verificó la correcta integración de las protecciones interiores en el sistema de embalaje, asegurando un posicionamiento estable y reproducible del producto de ensayo dentro de la caja.



Imagen 3. Preparación de muestras



Imagen 4. Introducción producto tipo en embalaje exterior



Imagen 5. Introducción de protecciones interiores



Imagen 6. Introducción de protecciones interiores

Esta preparación previa de las muestras y su acondicionamiento climático han sido claves para asegurar la fiabilidad de los ensayos posteriores y para reforzar la validez de las conclusiones extraídas en las fases de caracterización del material y de validación del sistema de embalaje completo.

3.4. Fase 4. Ejecución de ensayos experimentales.

La ejecución de los ensayos experimentales se llevó a cabo conforme a la planificación definida en las fases previas, aplicando procedimientos normalizados y condiciones controladas con el fin de garantizar la repetitividad y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

En la fase de caracterización del material amortiguador (Fase 1), se realizaron ensayos de impacto vertical sobre las probetas de material, aplicando distintas cargas estáticas representativas de escenarios reales de uso. Para cada configuración y nivel de carga se efectuaron múltiples impactos consecutivos, considerándose para el análisis los valores correspondientes a los impactos segundo a quinto, con el objetivo de minimizar efectos transitorios y obtener una respuesta estabilizada del material.

En la fase de validación del sistema de embalaje completo (Fase 2), se llevaron a cabo ensayos de caída libre sobre el embalaje montado, incluyendo impactos sobre cara, canto y esquina, de acuerdo con procedimientos habituales de simulación del transporte. Durante cada ensayo se registraron las aceleraciones en los tres ejes espaciales, permitiendo la obtención de la aceleración resultante asociada a cada evento de impacto.

La realización de un número elevado de ensayos por configuración y orientación permitió cubrir un amplio espectro de sollicitaciones dinámicas, asegurando que los

resultados obtenidos son representativos del comportamiento del sistema de embalaje en condiciones reales de distribución.

El conjunto de ensayos ejecutados ha proporcionado una base experimental robusta para la evaluación comparativa de las distintas configuraciones de material y diseño de embalaje, así como para la validación de las tendencias observadas en la caracterización del material aislado.

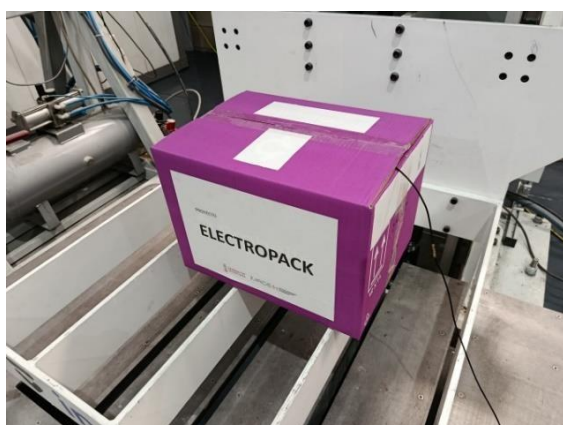


Imagen 7. Realización de ensayos de caída libre sobre el embalaje monitorizado



Imagen 8. Sistema de adquisición de datos

3.5. Fase 5. Tratamiento de datos y análisis de resultados.

Los datos obtenidos durante la ejecución de los ensayos experimentales fueron sometidos a un proceso sistemático de tratamiento y análisis, orientado a extraer conclusiones objetivas y técnicamente fundamentadas.

En el caso de la Fase 1, los registros de aceleración obtenidos en los ensayos de impacto se procesaron para la obtención de curvas de amortiguamiento, utilizando como parámetro representativo la media de los impactos segundo a quinto. Este enfoque permitió caracterizar el comportamiento dinámico del material amortiguador en condiciones estabilizadas y comparables entre configuraciones.

Para la Fase 2, los datos de aceleración registrados en los tres ejes se combinaron para calcular la aceleración resultante asociada a cada ensayo de caída. El análisis de estos resultados se llevó a cabo mediante herramientas estadísticas descriptivas que permiten evaluar tanto el valor central de la respuesta como su dispersión y la presencia de valores extremos.

Asimismo, se analizó la aparición de daño visible en el producto tras los ensayos de

caída, relacionando este indicador funcional con los niveles de aceleración transmitida y con la configuración del sistema de embalaje. Este enfoque ha permitido establecer una correlación directa entre los resultados cuantitativos de aceleración y el comportamiento real del sistema en términos de protección del producto.

3.6. Fase 6. Redacción técnica y elaboración del informe.

Finalmente, se llevó a cabo la redacción del presente informe técnico, integrando los resultados, las interpretaciones y las conclusiones del proyecto.

4. Alcance, colaboradores y público objetivo

El proyecto ELECTROPACK se enmarca en el ámbito del desarrollo de soluciones de embalaje sostenible para la protección de productos con elevada sensibilidad mecánica, durante su transporte y distribución, abordando tanto la caracterización de materiales amortiguadores como su integración en sistemas de embalaje completos. El alcance del proyecto comprende la evaluación funcional del material celulósico de Kenaf y la validación experimental de su comportamiento en condiciones representativas de uso real.

El desarrollo del proyecto ha contado con la participación del equipo técnico del centro tecnológico, integrando perfiles especializados en diseño de embalajes, ensayos de simulación de transporte y análisis de comportamiento dinámico. Esta colaboración interna ha permitido abordar el proyecto de manera multidisciplinar, combinando conocimiento en materiales, ingeniería de producto y validación experimental.

Los resultados obtenidos están orientados principalmente a empresas del sector industrial que diseñan, fabrican o distribuyen productos sensibles y que requieren soluciones de embalaje seguras y sostenibles. Asimismo, el conocimiento generado resulta de interés para fabricantes de materiales de embalaje, empresas de logística y operadores de transporte, así como para entidades dedicadas al diseño y validación de sistemas de embalaje.

De este modo, el proyecto ELECTROPACK proporciona una base técnica sólida para la transferencia de soluciones de embalaje sostenible al tejido industrial de la Comunidad Valenciana, contribuyendo a la mejora de la seguridad del producto, a la optimización del uso de materiales y a la reducción del impacto ambiental asociado al embalaje.

5. Acciones de difusión y transferencia

Los resultados obtenidos en el proyecto ELECTROPACK han sido documentados de forma sistemática, constituyendo una base de conocimiento aplicable al diseño y validación de sistemas de embalaje sostenible para productos sensibles. Esta documentación permite la reutilización de los resultados en futuros proyectos de I+D y en el desarrollo de servicios técnicos avanzados relacionados con el embalaje y la simulación de transporte.

Asimismo, el conocimiento generado en el proyecto presenta un elevado potencial de transferencia al tejido industrial, especialmente a empresas dedicadas al diseño, fabricación y distribución de productos, así como a fabricantes de materiales de embalaje y operadores logísticos. Los criterios de diseño derivados de las curvas de amortiguamiento y de la validación experimental del sistema de embalaje pueden ser aplicados directamente en entornos industriales para mejorar la protección del producto y optimizar el uso de materiales.

Como parte de las acciones de difusión, los resultados del proyecto se consideran susceptibles de ser integrados en comunicaciones técnicas, jornadas sectoriales y publicaciones especializadas, contribuyendo a la divulgación de soluciones de embalaje sostenible basadas en materiales celulósicos. Asimismo, el proyecto sienta las bases para la preparación de artículos técnicos y científicos que permitan dar visibilidad a los avances alcanzados y reforzar la transferencia de conocimiento al sector.

En conjunto, las acciones de difusión y transferencia previstas permiten maximizar el impacto del proyecto ELECTROPACK, facilitando la aplicación práctica de los resultados obtenidos y contribuyendo a la mejora de la sostenibilidad y la seguridad de los sistemas de embalaje en el ámbito industrial.

6. Resumen y conclusiones

El proyecto ELECTROPACK ha permitido avanzar de forma significativa en el desarrollo de sistemas de embalaje sostenibles para productos sensibles a sollicitaciones mecánicas, dando continuidad a los resultados obtenidos en los proyectos ECODAMPING y GREENPACK y profundizando en su aplicación a sistemas de embalaje completos.

El trabajo realizado ha seguido una secuencia coherente de investigación, comenzando por la caracterización funcional de materiales celulósicos amortiguadores mediante curvas G vs. carga (Fase 1) y culminando con la validación experimental del sistema de embalaje completo mediante ensayos de caída representativos de la distribución logística (Fase 2).

Los resultados obtenidos confirman que el espesor del material amortiguador es el parámetro más determinante en la reducción de la aceleración transmitida al producto. Las configuraciones de Kenaf de 40 mm de espesor muestran un comportamiento más estable frente a incrementos de carga, así como una menor dispersión de resultados, lo que las hace especialmente adecuadas para la protección de productos frágiles y de mayor peso.

El análisis de las curvas de amortiguamiento ha permitido establecer criterios de diseño directamente aplicables al sistema de embalaje real, facilitando la selección del espesor y la configuración del material en función del peso del producto, su fragilidad y el perfil de distribución previsto.

La validación mediante ensayos de caída ha confirmado la coherencia entre los resultados de laboratorio y el comportamiento del sistema de embalaje completo, obteniéndose resultados satisfactorios en términos de protección del producto y observándose una correlación directa entre los niveles de aceleración transmitida y la aparición de daño visible.

Configuración Kenaf	Espesor	Nivel de aceleración (Fase 1)	Daño visible (Fase 2)	Recomendación de uso
P30	20 mm	Alto / pendiente elevada	Frecuente	Productos ligeros y poco frágiles
P60	20 mm	Medio–alto	Ocasional	Productos ligeros, fragilidad moderada
P30	40 mm	Medio / estable	Bajo	Productos de peso medio, fragilidad moderada
P60	40 mm	Bajo / muy estable	Muy bajo o nulo	Productos frágiles y/o pesados

Tabla 2. Resumen integrado de los resultados obtenidos en las Fases 1 y 2, relacionando la configuración del embalaje con su comportamiento dinámico y su aplicabilidad en embalaje electrónico.

En conjunto, el proyecto ELECTROPACK consolida el uso del Kenaf como una alternativa técnica viable a materiales poliméricos convencionales, aportando conocimiento aplicado, herramientas de diseño claras y una base sólida para su transferencia al sector industrial del embalaje electrónico y para el desarrollo de futuras actuaciones de I+D en este ámbito.

El proyecto ELECTROPACK refuerza así la viabilidad técnica de soluciones de embalaje sostenible basadas en materiales celulósicos, aportando criterios de diseño claros y una base experimental sólida para su transferencia al sector industrial.

Adicionalmente, el proyecto ha permitido identificar líneas de análisis complementarias orientadas a la definición de requisitos técnicos y de seguridad para futuras capacidades de ensayo en ámbitos emergentes, desarrolladas en el apartado siguiente.

7. Análisis técnico complementario: Ensayos de vibración y choque en baterías eléctricas

7.1. Justificación y encaje en el proyecto ELECTROPACK

Como parte de las actividades complementarias del proyecto ELECTROPACK, se ha realizado un análisis técnico orientado a identificar los requisitos de equipamiento, infraestructuras y condiciones de seguridad necesarias para la realización de ensayos de vibración y choque en baterías eléctricas. Este análisis se plantea como un estudio previo, alineado con el incremento de aplicaciones basadas en almacenamiento electroquímico y con la necesidad creciente de validar componentes energéticos bajo sollicitaciones dinámicas representativas del transporte y la manipulación.

Este bloque no contempla la ejecución de ensayos experimentales con baterías dentro del alcance del proyecto, sino que se centra en establecer un marco técnico y de seguridad que permita evaluar, de forma fundamentada, las capacidades necesarias para desarrollar este tipo de ensayos en el futuro en condiciones controladas. Su inclusión complementa los objetivos principales del proyecto, ampliando el horizonte de aplicabilidad de la investigación y reforzando la orientación estratégica hacia nuevas líneas de validación avanzada en laboratorio.

7.2. Tipologías de baterías eléctricas y estado tecnológico

Las baterías eléctricas empleadas en aplicaciones industriales y de transporte presentan una elevada diversidad tecnológica. Actualmente, las baterías de ion-litio constituyen la tecnología más extendida, mientras que tecnologías emergentes, como las baterías de estado sólido o configuraciones híbridas, están ganando interés por su potencial de mejora en densidad energética y estabilidad operativa.



Figura 2. Comparativa conceptual entre baterías de ion-litio convencionales y baterías de estado sólido, destacando diferencias en arquitectura interna, materiales y principales ventajas y desafíos tecnológicos.

Estas tecnologías difieren de forma relevante en su arquitectura interna, materiales activos, interfaces electroquímicas y mecanismos de degradación, lo que condiciona su respuesta ante sollicitaciones mecánicas como vibraciones o choques. En consecuencia, la planificación de ensayos dinámicos requiere considerar de forma específica aspectos como el confinamiento interno, la sensibilidad a la deformación, la posible generación de defectos mecánicos y su interacción con el comportamiento electroquímico.

Aspecto analizado	Baterías ion-litio (LIB)	Baterías de estado sólido (SSB)	Implicaciones para ensayos dinámicos
Electrolito	Líquido	Sólido	Diferente respuesta a vibraciones y choques
Seguridad	Riesgo de fuga térmica	Mayor estabilidad intrínseca	Requisitos de contención y monitorización
Arquitectura interna	Multicapa flexible	Interfaces sólido-sólido	Sensibilidad a tensiones mecánicas
Densidad energética	Media-alta	Alta	Mayor energía almacenada por unidad
Sensibilidad mecánica	Moderada	Elevada en interfaces	Necesidad de control fino de solicitaciones
Estado tecnológico	Comercial consolidado	En desarrollo	Enfoque prospectivo de ensayo

Tabla 3. Síntesis comparativa de las características tecnológicas de baterías de ion-litio y baterías de estado sólido y su influencia en los requisitos de validación mediante ensayos de vibración y choque.

Este análisis proporciona una visión técnica general del estado tecnológico, identificando los elementos que influyen en la definición de requisitos de ensayo y en la necesidad de medidas de seguridad reforzadas.

7.3. Análisis de riesgos asociados a ensayos dinámicos en baterías

La realización de ensayos de vibración y choque en baterías eléctricas conlleva riesgos específicos asociados a su elevada densidad energética y a la naturaleza electroquímica de sus componentes. Entre los riesgos principales se incluyen la aparición de cortocircuitos internos, generación de gases, degradación acelerada por daño mecánico y, en escenarios más severos, eventos de fuga térmica.

Las solicitaciones dinámicas pueden incrementar estos riesgos por efectos como la degradación de separadores, microfisuración de electrodos, pérdida de integridad de interfaces, fallo de conexiones internas o deformación localizada. En condiciones ambientales exigentes (temperatura elevada o alta humedad), ciertos mecanismos de degradación pueden intensificarse, aumentando la probabilidad de eventos no deseados.

Por ello, cualquier desarrollo futuro de ensayos dinámicos sobre baterías debe contemplar un enfoque de seguridad basado en prevención, detección temprana y mitigación. Este análisis permite identificar escenarios de riesgo relevantes y establecer criterios generales para el diseño de instalaciones, equipamiento y protocolos operativos seguros.

7.4. Marco normativo y requisitos de ensayo aplicables

El marco normativo aplicable a baterías eléctricas incluye requisitos relacionados con transporte, seguridad de producto y validación en entornos de aplicación. Existen estándares específicos para transporte de baterías y otros orientados a la calificación de componentes en sectores con mayores exigencias (p. ej., automoción o almacenamiento estacionario), que contemplan solicitaciones mecánicas y ambientales diversas.

En términos generales, los ensayos de vibración y choque se encuadran dentro de programas de validación orientados a verificar la integridad del producto frente a esfuerzos repetitivos, impactos puntuales y condiciones ambientales que pueden producir degradación o fallo. La definición del alcance de ensayo debe considerar el tipo de batería, su formato, su estado de carga, el nivel de integración (celda, módulo o sistema) y los criterios de aceptación aplicables.

El análisis normativo realizado permite identificar los requisitos generales a considerar para planificar ensayos dinámicos y, especialmente, para dimensionar el nivel de seguridad e instrumentación requerido en un laboratorio que pretenda desarrollar estas capacidades.

7.5. Requisitos de equipamiento e infraestructuras de laboratorio

La realización de ensayos de vibración y choque en baterías eléctricas requiere disponer de equipamiento específico y de infraestructuras adaptadas a los riesgos asociados. Entre los elementos principales se incluyen sistemas de excitación dinámica (para vibración y choque controlado), sistemas de adquisición de datos y monitorización, y capacidades de acondicionamiento ambiental cuando se requiera combinar solicitaciones mecánicas y climáticas.



Imagen 9. Equipo de vibración electrodinámico.



Imagen 10. Equipo de vibración electrodinámico con sistema de adquisición multicanal.

Adicionalmente, resulta imprescindible dotar el laboratorio de medidas de seguridad específicas, tales como recintos de ensayo protegidos, sistemas de ventilación y extracción, detección temprana de gases y temperatura, y medios de contención/mitigación ante posibles eventos térmicos. También deben considerarse protocolos de actuación, segregación de zonas, procedimientos de control de acceso y condiciones de almacenamiento seguro para baterías.

Este análisis permite definir de forma preliminar las necesidades técnicas y de infraestructura que deberían abordarse para desarrollar en el futuro ensayos dinámicos sobre baterías en condiciones seguras, evitando enfoques de ensayo de alta severidad no compatibles con capacidades convencionales sin adecuación previa.

7.6. Implicaciones para el desarrollo futuro de capacidades de ensayo

El análisis técnico realizado pone de manifiesto que la validación segura de baterías eléctricas mediante ensayos de vibración y choque constituye una línea de actuación de interés estratégico, pero condicionada por la disponibilidad de infraestructuras adecuadas y por un enfoque de seguridad riguroso.

Aunque el proyecto ELECTROPACK no contempla la ejecución de ensayos de baterías, el trabajo desarrollado permite identificar con claridad los requisitos técnicos, normativos y de seguridad necesarios para su posible implementación futura. En este sentido, el proyecto sienta las bases para la definición de futuras actuaciones de I+D y para la planificación de inversiones o adecuaciones orientadas a ampliar capacidades de laboratorio, alineadas con las necesidades emergentes del sector industrial.

Este análisis técnico se incorpora como resultado complementario del proyecto ELECTROPACK, permitiendo identificar los requisitos de equipamiento, infraestructuras y condiciones de seguridad necesarios para la realización de ensayos de vibración y choque en baterías eléctricas, y estableciendo un marco de referencia para el desarrollo futuro de estas capacidades de ensayo en condiciones controladas y seguras.

8. Anexos y bibliografía

- [1] ASTM International, ASTM D1596 – Standard Test Method for Resistance to Shock of Packaging Systems, West Conshohocken, PA, USA.
- [2] ASTM International, ASTM D4169 – Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems, West Conshohocken, PA, USA.
- [3] International Organization for Standardization, ISO 2248: Packaging — Complete, filled transport packages — Vertical impact test by dropping, ISO, Geneva, Switzerland.
- [4] International Organization for Standardization, ISO 2233: Packaging — Complete, filled transport packages and unit loads — Conditioning for testing, ISO, Geneva, Switzerland.
- [5] International Safe Transit Association (ISTA), ISTA 3A – Packaged-Products for Parcel Delivery System Shipment, ISTA, Lansing, MI, USA.
- [6] G. J. Burgess, Package Cushioning Design, New York, NY, USA: Marcel Dekker, 1990.
- [7] S. P. Singh and G. J. Burgess, “Measurement and application of cushioning properties of packaging materials,” *Packaging Technology and Science*, vol. 5, no. 3, pp. 143–151, 1992.
- [8] M. A. Sek and J. Kirkpatrick, “Cushioning performance of corrugated fiberboard,” *Packaging Technology and Science*, vol. 10, pp. 229–239, 1997.
- [9] J. Navarro-Jover et al., “Shock attenuation characteristics of cushioning materials used in transport packaging,” *Journal of Applied Packaging Research*, vol. 6, no. 1, pp. 1–14, 2012.
- [10] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy and T. M. Le, “A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance,” *Composites Part A*, vol. 83, pp. 98–112, 2016.
- [11] O. Faruk et al., “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010,” *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012.
- [12] J. Müssig, Ed., *Industrial Applications of Natural Fibres*, Chichester, UK: Wiley, 2010.
- [13] L. Yan, N. Chouw and K. Jayaraman, “Flax fibre and its composites – A review,” *Composites Part B*, vol. 56, pp. 296–317, 2014.
- [14] D. Twede and S. Selke, *Cartons, Crates and Corrugated Board*, Lancaster, PA, USA: DEStech Publications, 2005.
- [15] European Commission, *A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*, Brussels, Belgium, 2018.

- [16] International Organization for Standardization, ISO 18601: Packaging and the environment — General requirements, ISO, Geneva, Switzerland.
- [17] International Organization for Standardization, ISO 18602: Packaging and the environment — Packaging optimization, ISO, Geneva, Switzerland.
- [18] J. Singh and S. P. Singh, "Damage reduction in electronic products through optimized packaging systems," *Journal of Applied Packaging Research*, vol. 2, no. 2, pp. 65–78, 2008.
- [19] M. A. Sek, *Fundamentals of Packaging Dynamics*, Technical Monograph, Michigan State University, East Lansing, MI, USA, 2000.
- [20] V. Rouillard, "Quantifying the non-linear behaviour of cushioning materials under impact loading," *Packaging Technology and Science*, vol. 27, pp. 185–198, 2014.
- [21] AIDIMME, *Proyectos ECODAMPING, GREENPACK y ELECTROPACK: Informes técnicos internos*, Valencia, Spain, 2022–2025.
- [22] Intertek Inform, *Resúmenes normativos y guías técnicas sobre ensayos de embalaje y transporte*, Intertek Group plc.
- [23] IoPP / Packaging Society, *Technical guides on cushioning and protective packaging*, Institute of Packaging Professionals.
- [24] United Nations, *UN Manual of Tests and Criteria, Section 38.3 – Lithium metal and lithium ion batteries*, United Nations, New York and Geneva.
- [25] International Electrotechnical Commission, IEC 62133-2: Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for portable sealed secondary lithium cells, IEC, Geneva, Switzerland.
- [26] International Organization for Standardization, ISO 12405-1: Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 1: High-power applications, ISO, Geneva, Switzerland.
- [27] D. Lisbona and T. Snee, "A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 89, no. 6, pp. 434–442, 2011.

AIDIMME

Instituto Tecnológico

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es
www.aidimme.es