

Materiales Celulósicos Sustentables Aplicados al Diseño de Empaques: Correlación entre Experimentos y Simulación

Oscar R. García-Martínez, Ana Laura Martínez-Hernández, Carlos Velasco-Santos *

Tecnológico Nacional de México/Campus Querétaro, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Maestría en Ingeniería, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia: cylaura@gmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 15 de abril de 2026

Aceptado: 30 de junio de 2026

Publicado: 18 de agosto de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.718>

Resumen: El crecimiento del comercio y de las cadenas de distribución ha incrementado la demanda de empaques que puedan proteger los productos durante su almacenamiento y transporte. Al mismo tiempo, existe una presión cada vez mayor por reducir el uso de materiales derivados del petróleo y avanzar hacia soluciones más sustentables. En este escenario, los materiales celulósicos, como el cartón corrugado y la pulpa moldeada, son una alternativa por su origen renovable, su capacidad de reciclaje y su integración en esquemas de economía circular. Este artículo presenta una síntesis sobre el papel de estos materiales en el diseño de empaques sustentables y sobre la forma en que la simulación numérica puede apoyar la evaluación de su comportamiento estructural. Se describen aspectos generales de la relación entre geometría, propiedades mecánicas y desempeño del empaque, así como la utilidad de las herramientas computacionales para identificar zonas críticas, comparar alternativas de diseño y reducir la dependencia de prototipos físicos. A partir de esta revisión, se muestra como diversos estudios que integran, caracterización mecánica y simulación estructural en materiales celulósicos puede contribuir al desarrollo de empaques más eficientes, ligeros y con menor impacto ambiental, sin perder de vista su función principal que es la protección de productos dentro de la cadena logística.

Palabras clave: empaques sustentables, materiales celulósicos, simulación numérica, análisis estructural, diseño de empaques

Introducción

El diseño de empaque tiene un papel fundamental en la protección y transporte de productos dentro de la economía global. Su función principal es preparar los bienes para su almacenamiento, distribución y comercialización. Durante su ciclo logístico, el empaque está expuesto a condiciones mecánicas y ambientales, como la estiba durante el almacenamiento, el impacto durante la manipulación o vibraciones en el transporte (Institute of Packaging Professionals, 2022). Además de esta función protectora, también cumple un papel importante como medio de comunicación, ya que permite identificar la marca y transmitir información al consumidor.

Con el aumento del comercio electrónico, la demanda de soluciones de empaque ha incrementado (Tabla 1), lo cual se refleja en el crecimiento de la producción mundial de papel y cartón reportado en estadísticas recientes (Statista, 2026). Por ello, las empresas enfrentan el desafío de desarrollar diseños efectivos y competitivos en términos de costos de producción.

Desde este punto de vista, los materiales celulósicos, como el cartón corrugado y la pulpa moldeada, han adquirido relevancia dentro de la industria debido a su origen renovable, su capacidad de reciclaje y su potencial para reducir el impacto ambiental asociado con polímeros derivados del petróleo (Freville *et al.*, 2024).

Por ello, este artículo busca explicar a partir de diversos estudios, la forma en que los materiales celulósicos y su simulación numérica pueden integrarse en el diseño de empaques sustentables. De esta manera, se presenta una visión sobre la utilidad de estas herramientas en la mejora del desempeño del empaque, reduciendo el uso innecesario de material y apoyando el desarrollo de soluciones más eficientes dentro de la cadena de distribución.

El diseño de empaque se ha basado tradicionalmente en la fabricación de prototipos físicos y en la realización de pruebas experimentales destinadas a evaluar su desempeño mecánico, muchos de ellas bajo normativas y protocolos de ensayo, como los desarrollados por la International Safe Transit Association (ISTA, n.d.) y la Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI, 2026). La Figura 1 muestra un proceso típico de desarrollo de empaque.

Tabla 1-Datos: Producción mundial de papel y cartón por tipo (2011–2024)
(millones de toneladas métricas)

Año	Papel y cartón para empaques	Papel gráfico	Otros
2011	211	141	48
2012	214	137	48
2013	215	133	48
2014	226	129	48
2015	232	126	49
2016	236	123	51
2017	242	121	52
2018	242	116	51
2019	243	109	53
2020	251	94	56
2021	270	96	58
2022	269	93	57
2023	265	84	58
2024	278	85	60

Nota: Datos adaptados de Production volume of paper and paperboard worldwide from 2011 to 2024, by type (in million metric tons), de Sasu (2026), con base en datos de FAO.

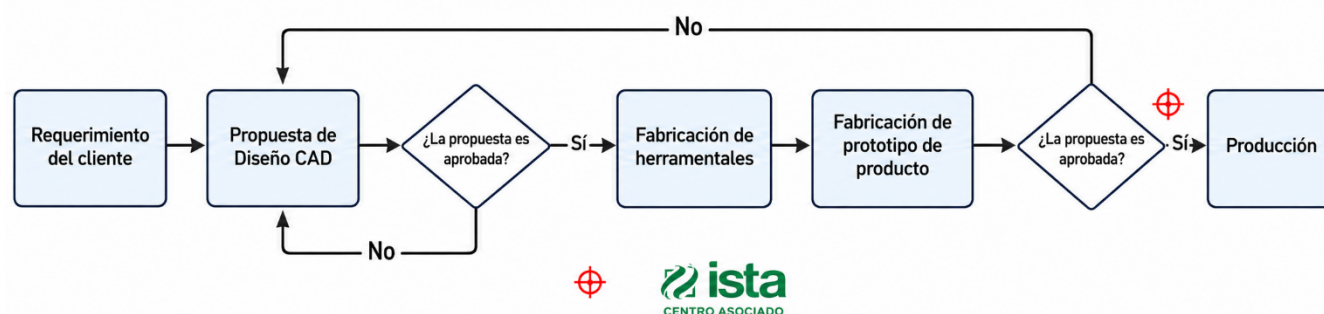


Figura 1. Proceso tradicional para el desarrollo y aprobación de empaque.

Nota. Elaboración propia con fines ilustrativos, con base en protocolos de evaluación de empaque de ISTA. https://ista.org/test_procedures.php

Algunas de las pruebas experimentales utilizadas en el diseño de empaque incluyen ensayos de compresión (BCT), impacto y vibración, orientadas a evaluar la capacidad del diseño propuesto para resistir las condiciones de transporte y almacenamiento del producto (Heposalmi *et al.*, 2022). En general, este proceso requiere múltiples iteraciones antes de obtener una solución adecuada. La Figura 2 muestra de manera conceptual el equilibrio entre la cantidad de material utilizada y los costos asociados al desarrollo de su diseño con base en el enfoque de evaluación del desempeño del empaque descrito por Olsmats y Dominic (2003).

Este concepto es importante en la ingeniería y diseño de empaques, ya que herramientas como la simulación numérica permiten identificar este punto óptimo antes de la fabricación de prototipos físicos, contribuyendo a optimizar el diseño y reducir costos sin comprometer la protección del producto.

Frente a esto, la industria ha comenzado a incorporar este tipo de herramientas para analizar el comportamiento estructural del diseño antes de su fabricación. Basadas en el método de los elementos finitos, estas técnicas permiten modelar virtualmente la respuesta mecánica de diferentes configuraciones geométricas bajo distintas condiciones de carga. De este modo, es posible evaluar múltiples alternativas de diseño, identificar zonas críticas de deformación y mejorar la geometría sin necesidad de fabricar prototipos en cada etapa del desarrollo. (Heposalmi *et al.*, 2022; Fadji *et al.*, 2018).

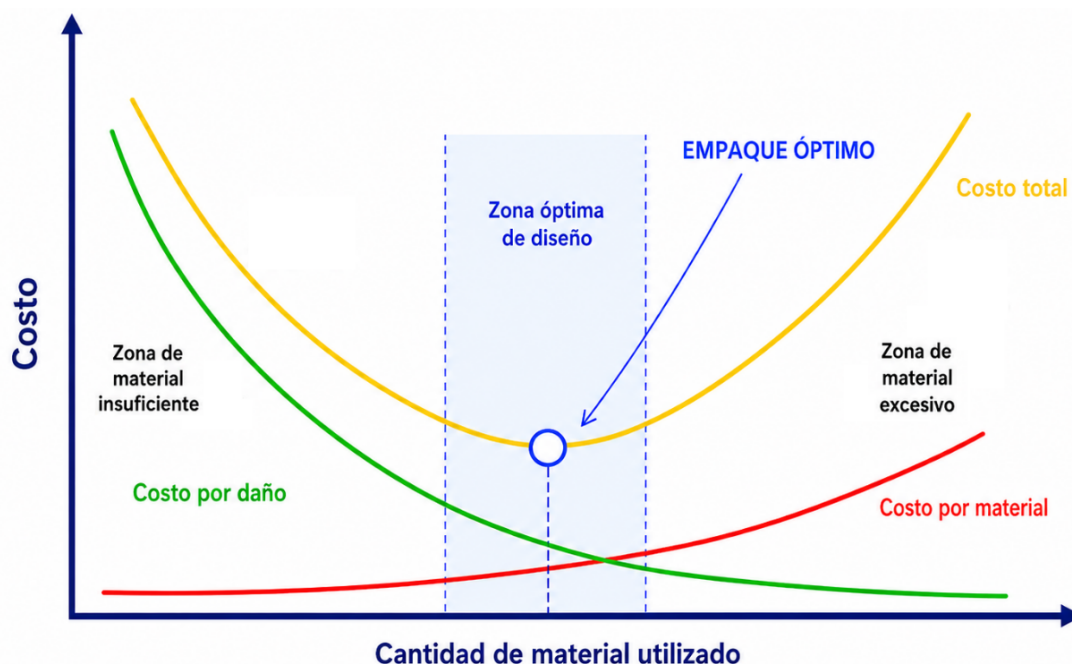


Figura 2. Costo ideal de empaque en función de la cantidad de material utilizado.

Nota: Elaboración propia con fines ilustrativos, con base en el enfoque de evaluación del desempeño del empaque descrito por Olsmats y Dominic (2003).

La simulación virtual puede reducir significativamente los tiempos y costos asociados al diseño de empaques, al mismo tiempo que proporciona una comprensión más detallada del comportamiento estructural de los materiales utilizados. Los materiales celulósicos como el cartón corrugado y la pulpa moldeada, pueden analizarse de manera eficiente a través de herramientas de simulación numérica (Park, Sim, & Jung, 2021).

En este contexto, la simulación estructural, la caracterización y el diseño adecuado de empaques representan una estrategia para el desarrollo eficiente de soluciones de empaques. Estas herramientas permiten optimizar la geometría, mejorar el desempeño mecánico y hacer un uso más adecuado de recursos sin comprometer la capacidad de protección del producto.

De esta manera, la relación entre simulación numérica estructural y sustentabilidad se encuentra en la posibilidad de diseñar empaques con una cantidad de material más ajustada a su función real de protección. Un diseño sobredimensionado puede incrementar el consumo de materia prima, el peso del empaque y los recursos asociados a su fabricación y transporte. En cambio, el análisis estructural permite identificar zonas donde el material es necesario y zonas donde puede reducirse sin comprometer el desempeño del empaque. De esta forma, la simulación no solo apoya la resistencia mecánica del diseño, sino también un uso más racional de los materiales celulósicos dentro de estrategias de reducción de material y economía circular.

Desarrollo

Materiales celulósicos utilizados en empaques

Los materiales celulósicos constituyen uno de los recursos más utilizados en la industria del empaque debido a su origen renovable, su disponibilidad y sus propiedades mecánicas. Estos materiales se obtienen principalmente a partir de fibras vegetales provenientes de la madera o de papel reciclado, las cuales están compuestas por celulosa, hemicelulosa y lignina (Nechyporchuk, 2016).

La celulosa es el componente estructural predominante en estas fibras y se caracteriza por formar cadenas moleculares largas que se organizan en microfibrillas altamente resistentes. Estas microfibrillas se agrupan en capas dentro de la pared celular, como se muestra en la Figura 3, generando una estructura jerárquica que proporciona rigidez y resistencia mecánica a los productos derivados de este biopolímero.

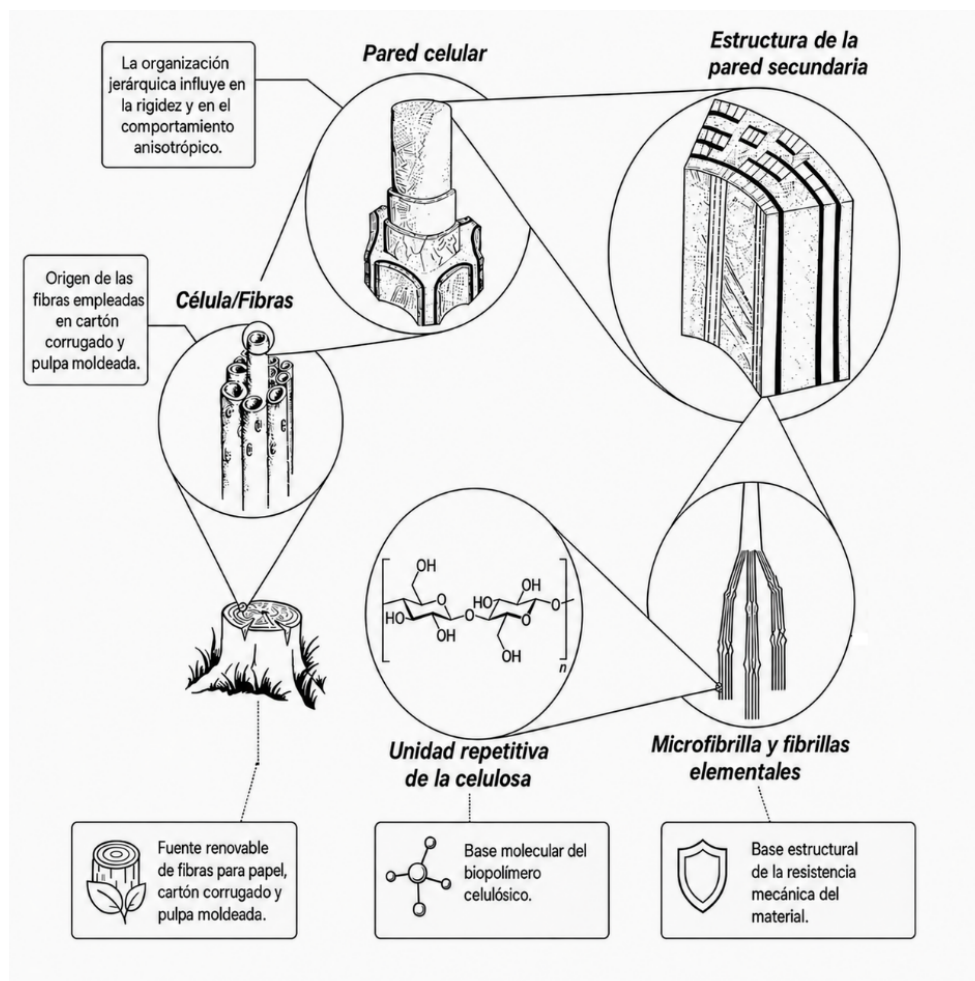


Figura 3. Estructura jerárquica de la madera, desde la fibra hasta la unidad repetitiva de celulosa.

Nota: Adaptado de Nechyporchuk (2016).

Esta estructura influye en el comportamiento mecánico de los materiales utilizados en empaques. En particular, materiales como el cartón corrugado y la pulpa moldeada presentan un comportamiento anisotrópico, lo que significa que su resistencia y rigidez dependen de la dirección en la que se aplica la carga.

Geometría del cartón corrugado

El cartón corrugado es uno de los materiales más utilizados en empaque debido a su elevada relación entre resistencia estructural y peso. Como se muestra en la Figura 4, está compuesto por una capa ondulada denominada flauta adherida entre dos capas planas conocidas como liners (Östlund & Niskanen, 2021).

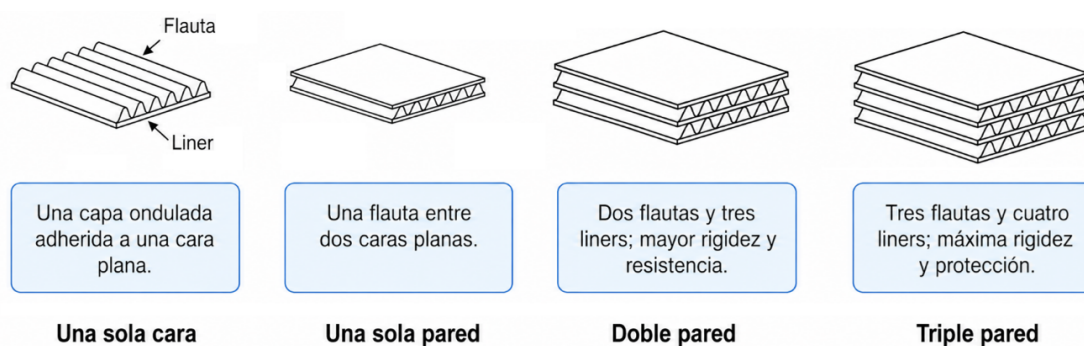


Figura 4. Tipos de cartón corrugado: una sola cara, una sola pared, doble pared y triple pared.

Nota: Adaptado de Östlund & Niskanen (2021).

La forma ondulada de la flauta permite distribuir las cargas de compresión de manera eficiente, lo que proporciona rigidez al empaque. Además, las cavidades formadas entre las capas contribuyen a mejorar la absorción de energía durante impactos, mediante mecanismos de deformación progresiva y disipación de energía (Sek & Kirkpatrick, 1997). Gracias a esta configuración, el cartón corrugado puede soportar cargas relativamente elevadas lo que lo hace adecuado para aplicaciones de transporte y almacenamiento de productos.

Modelado mecánico mediante métodos numéricos

El análisis estructural de empaques puede apoyarse en herramientas de simulación numérica para evaluar, de manera virtual, como responde un diseño cuando se somete a condiciones de estiba, impacto o manipulación.

Dentro de estas herramientas, el método de elementos finitos es una de las técnicas más utilizadas en ingeniería. Su principio consiste en dividir una geometría compleja en muchas partes pequeñas, llamadas elementos, que en conjunto permiten representar el comportamiento del empaque bajo ciertas condiciones de carga y restricción (Logan, 2022; Chandrupatla & Belegundu, 1999).

De manera simplificada, el método de elementos finitos permite representar el equilibrio mecánico de una estructura mediante la siguiente expresión matricial (Zienkiewicz, Taylor, & Govindjee, 2024; Logan, 2022):

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

En esta expresión, $[K]$ representa la matriz global de rigidez del sistema, es decir, la forma en que el modelo reúne la resistencia de los elementos que componen la estructura; $\{u\}$ corresponde al vector de desplazamientos nodales, que describe los movimientos calculados en los puntos de la malla formada por los elementos; y $\{F\}$ representa el vector de fuerzas externas aplicadas sobre el empaque. En términos prácticos, esta relación permite estimar cómo se desplaza y deforma el diseño cuando recibe una carga.

A partir de estos datos, el modelo calcula desplazamientos, deformaciones y esfuerzos en distintas zonas del diseño. Esta información resulta útil porque permite observar cómo se deformaría un empaque antes de fabricar un prototipo físico, identificar zonas críticas y realizar ajustes en la geometría o en el uso de material.

La precisión de este tipo de análisis depende en gran medida de la forma en que se representa el comportamiento de los materiales. En el caso de materiales celulósicos, es importante debido a su estructura fibrosa y anisotrópica. La anisotropía significa que el material no responde igual en todas las direcciones; por ejemplo, un cartón puede resistir de manera diferente si la carga se aplica en la dirección de fabricación del papel o en la dirección transversal (Östlund & Niskanen, 2021).

A diferencia de los materiales homogéneos, los materiales basados en fibras pueden presentar deformación no lineal, deformación plástica y colapso estructural bajo compresión. De manera sencilla, la deformación plástica se refiere a cambios permanentes en la forma de los materiales después de aplicar una carga.

Para representar estos efectos en simulación, se utilizan modelos constitutivos, que pueden entenderse como descripciones matemáticas del comportamiento de los materiales ante distintos tipos de carga. Un ejemplo es el modelo constitutivo propuesto por Xia, desarrollado para representar el comportamiento mecánico de materiales fibrosos considerando la anisotropía y la evolución de la deformación plástica bajo diferentes estados de carga (Xia, 2002).

En aplicaciones de diseño de empaque, estos modelos se calibran generalmente a partir de resultados experimentales obtenidos mediante ensayos mecánicos, como pruebas de tensión, compresión y cortante (Dassault Systèmes SIMULIA, s. f.). Como resultado, es posible analizar con mayor detalle la respuesta estructural de los empaques durante su estiba, manipulación o bajo condiciones de transporte.

Comparación entre resultados experimentales y simulación

En este apartado las curvas, modelos y ejemplos mostrados se emplean con fines explicativos y se basan en información reportada en la literatura, con el propósito de ilustrar cómo puede relacionarse una prueba física con una simulación numérica en el diseño de empaques celulósicos.

Para evaluar la utilidad de los modelos computacionales, sus resultados suelen compararse con datos experimentales obtenidos mediante ensayos mecánicos (Fadiji *et al.*, 2018, Heposalmi *et al.*, 2022). En el caso de materiales celulósicos utilizados en sistemas de empaque, estos ensayos suelen representarse mediante curvas esfuerzo–deformación, las cuales describen la respuesta de los materiales ante diferentes niveles de carga (Östlund & Niskanen, 2021; Xia, 2002).

Cuando los modelos se calibran con información experimental y se integran en una simulación de empaque, es posible obtener información detallada sobre el comportamiento estructural del empaque (Biancolini, 2005; Fadiji *et al.*, 2018). De forma análoga a una herramienta de diagnóstico, la simulación permite observar con detalle la distribución de variables como esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en la geometría, lo que permite identificar zonas críticas y posibles modos de falla.

En la industria del empaque, la literatura reporta la comparación entre resultados de simulación y pruebas experimentales empleadas en campo, como los ensayos de compresión de caja (BCT, Box Compression Test). En este tipo de pruebas se registra comúnmente una curva de fuerza–desplazamiento, la cual también puede obtenerse directamente a partir de los modelos de simulación (Figura 5).

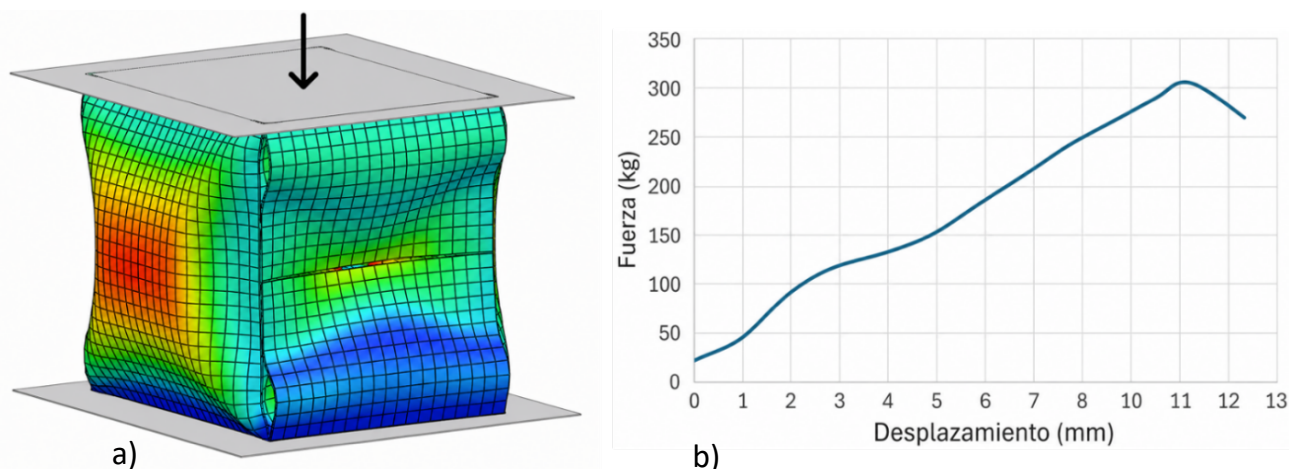


Figura 5. Representación numérica de un empaque sometido a carga de compresión, donde se muestra la distribución de desplazamientos obtenida mediante el método de los elementos finitos. La flecha indica la dirección de la carga aplicada. (b) Curva representativa fuerza–desplazamiento en un ensayo de compresión (BCT), donde se observa un incremento progresivo de la carga hasta alcanzar un valor máximo, y posteriormente una disminución asociada al colapso del empaque.

Nota. Elaboración propia con fines ilustrativos. La representación numérica mostrada en (a) y la curva fuerza-desplazamiento mostrada en (b) se presentan únicamente para ilustrar la relación general entre una simulación estructural y un ensayo de compresión de caja.

La comparación entre los resultados experimentales y los que se obtienen mediante la simulación permite validar los modelos numéricos y ajustar los parámetros de los materiales para mejorar la precisión de la predicción. De esta manera, la simulación se convierte en una solución en las etapas tempranas del diseño del empaque para comprender el comportamiento estructural y optimizarlo antes de la fabricación de prototipos físicos.

La Tabla 2 presenta una recopilación de artículos, libros y normas relacionados con la evaluación de empaques y muestra los avances en simulación y caracterización mecánica utilizados en su diseño, así como los fundamentos teóricos y estándares utilizados a lo largo del tiempo en esta industria para garantizar su desempeño en la distribución.

Tabla 2. Comparación de bibliografía relacionada con el análisis de materiales celulósicos y simulación numérica en empaques

Autor/Fuente	Aporte	Pruebas / metodología
Argyris & Kelsey (1960)	Principios energéticos y métodos matriciales para el análisis estructural, base del método de elemento finito	Principios de energía y formulación matemática (teórico)
Biancolini (2005)	Obtención de propiedades equivalentes de rigidez del cartón corrugado mediante homogenización	Modelo FEM basado en microestructura; no pruebas experimentales directas
Chandrupatla & Belegundu (1999)	Explica la formulación y aplicación del método de elemento finito en ingeniería	formulación teórica
Dassault Systèmes SIMULIA (s. f.)	Modelo constitutivo de plasticidad	Modelo numérico
Fadiji <i>et al.</i> (2018)	Modelo FEM para predecir la resistencia de empaques ventilados.	Compresión de cajas (BCT), comparación FEM vs experimental
Freville <i>et al.</i> (2024)	Revisión de tecnologías para la fabricación materiales celulósicos de empaque.	Revisión bibliográfica
Heposalmi <i>et al.</i> (2022)	Muestra el uso del FEM como herramienta de diseño de empaques	Aplicación industrial del FEM; validación práctica (no está centrado en ensayos particulares)
IoPP (2022)	Fundamentos del diseño de empaques	Basado en estándares industriales y prácticas
ISTA (n.d.)	Procedimientos de prueba de transporte y caída para empaques	Pruebas de impacto, caída, vibración (estandarizadas)
Logan (2022)	Formulación general del método de elemento finito	Formulación teórica
Nechyporchuk (2016)	Describe métodos de producción de nanocelulosa y sus propiedades	Revisión bibliográfica
Olsmats & Dominic (2003)	Método para evaluar desempeño del empaque en la cadena de suministro	Metodología de evaluación general
Östlund & Niskanen (2021)	Comportamiento mecánico del papel y materiales fibrosos	Base teórica + datos experimentales
Park <i>et al.</i> (2021)	Comportamiento a compresión plana del cartón corrugado mediante método de elementos finitos.	Comparación entre FEM y resultados experimentales
Schulgasser (1981)	Relaciona propiedades elásticas del papel (E, G, ν) en direcciones MD y CD	Modelo teórico basado en propiedades elásticas; validación con datos experimentales
Sek & Kirkpatrick (1997)	Modelo para predecir propiedades de amortiguamiento del cartón corrugado	Compresión cuasi-dinámica y pruebas de impacto
Statista (2026)	Datos de producción global de papel y cartón	Datos estadísticos

A partir de la información presentada en la Tabla 2, el análisis de empaque fabricado a partir de materiales celulósicos se basa en tres elementos principales: los fundamentos del método de elemento finito, su caracterización mecánica y la aplicación práctica en el diseño.

La formulación para resolver problemas estructurales, así como la teoría del método de elementos finitos se encuentra en los trabajos de Argyris & Kelsey (1960), Chandrupatla & Belegundu (1999) y Logan (2022). Estas son las bases, pero el comportamiento de los materiales celulósicos no se toma en cuenta directamente. Los artículos de Schulgasser (1981) y Sek & Kirkpatrick (1997) se centran en la evaluación experimental, analizando propiedades elásticas, anisotropía y mecanismos de absorción de energía lo que permitió comprender como el material se comporta bajo diferentes tipos de carga. Más tarde, Xia (2002) desarrolla un modelo constitutivo más avanzado para materiales fibrosos, considerando la deformación inelástica. Esto permite representar de manera realista el comportamiento de los materiales dentro de un modelo numérico en condiciones donde la respuesta deja de ser lineal.

Por otro lado, investigaciones como las de Biancolini (2005), Park *et al.* (2021) y Fadiji *et al.* (2018) muestran la aplicación del método de elemento finito como herramienta para evaluar estos fenómenos de forma numérica. En estos casos, el modelo se construye a partir de la simplificación del modelo geométrico y propiedades equivalentes, y en algunos casos se compara con resultados experimentales para revisar su capacidad de predicción. Artículos como el

de Heposalmi *et al.* (2022) presentan el uso del MEF (método de elemento finito) en el diseño de empaques de una manera más práctica, donde la simulación se utiliza como apoyo en el proceso de desarrollo. Por su parte, revisiones como la de Freville *et al.* (2024) y Nechyporchuk (2016) dan una visión general sobre el desarrollo de materiales celulósicos, enfocándose en composición, procesamiento y algunas aplicaciones sin centrarse directamente en su comportamiento estructural bajo carga.

Estos artículos muestran que existe un avance importante en la comprensión del comportamiento mecánico de los materiales celulósicos y en su representación mediante modelos numéricos. Sin embargo, también se observa que los enfoques suelen desarrollarse de manera separada, donde algunos estudios priorizan la experimentación y otros la simulación, lo que pone en evidencia la necesidad de integrar ambos enfoques para lograr una mejor representación del comportamiento mecánico en aplicaciones de empaque.

Conclusiones

Los materiales celulósicos, como el cartón corrugado y la pulpa moldeada, pueden considerarse una alternativa de interés para el desarrollo de empaques, especialmente por su origen renovable, su capacidad de reciclaje y su uso extendido en la distribución de productos. Sin embargo, su desempeño depende de factores como la geometría del empaque, la dirección de las cargas, las propiedades mecánicas de los materiales y las condiciones de almacenamiento y transporte.

La simulación numérica estructural basada en el método de elementos finitos ofrece una herramienta útil para analizar el comportamiento mecánico del empaque antes de fabricar prototipos físicos. Su aplicación permite identificar zonas críticas de deformación, comparar alternativas de diseño y apoyar decisiones relacionadas con el uso de material, siempre que los modelos empleados se definan con propiedades adecuadas y cuando sea posible, se contrasten con información experimental.

De esta manera, la integración entre materiales celulósicos, caracterización mecánica y simulación numérica puede fortalecer el proceso de diseño de empaques. Más que sustituir las pruebas físicas, estas herramientas permiten complementar la evaluación experimental y orientar el desarrollo de soluciones más eficientes y alineadas con las necesidades actuales de protección y uso racional de material dentro de la cadena de distribución.

Bibliografía

- Argyris, J. H., & Kelsey, S. (1960). *Energy theorems and structural analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5850-1>
- Biancolini, M. E. (2005). Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board. *Composite Structures*, 69(3), 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.07.014>
- Chandrupatla, T. R., & Belegundu, A. D. (1999). *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería* (2.ª ed.). Prentice Hall.
- Dassault Systèmes SIMULIA. (s.f.). *Paperboard plasticity model*. SIMULIA Abaqus documentation. https://help.3ds.com/2026/english/dssimulia_established/simacaematrefmap/simamat-c-paperboard.htm
- Fadiji, T., Ambaw, A., Coetzee, C. J., Berry, T. M., & Opara, U. L. (2018). Application of finite element analysis to predict the mechanical strength of ventilated corrugated paperboard packaging for handling fresh produce. *Biosystems Engineering*, 174, 260–281. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.014>
- Freville, E., Pescheux-Sergienko, J., Mujica, R., Rey, C., & Bras, J. (2024). Novel technologies for producing tridimensional cellulosic materials for packaging: A review. *Carbohydrate Polymers*, 342, 122413. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122413>
- Heposalmi, S., Matthews, S., Leminen, V., Varis, J., & Toghyani, A. (2022). FEM as a package design tool for corrugated paperboard. *Procedia CIRP*, 109, 610–616. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.302>
- Institute of Packaging Professionals. (2022). *Fundamentals of packaging technology* (6th ed.). Institute of Packaging Professionals.
- International Safe Transit Association. (s. f.). *ISTA test procedures overview*. https://ista.org/test_procedures.php
- Logan, D. L. (2022). *A first course in the finite element method, enhanced edition, SI version* (6th ed.). Cengage Learning.
- Nechyporchuk, O. (2016). Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial Crops and Products*, 93, 2–25. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.016>
- Olsmats, C., & Dominic, C. (2003). Packaging scorecard: A packaging performance evaluation method. *Packaging Technology and Science*, 16(1), 9–14. <https://doi.org/10.1002/pts.604>
- Östlund, S., & Niskanen, K. (Eds.). (2021). *Mechanics of paper products* (2nd expanded ed.). Walter de Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110619386>
- Park, J.-M., Sim, J.-M., & Jung, H.-M. (2021). Finite element simulation of the flat crush behavior of corrugated packages. *Applied Sciences*, 11(17), 7867. <https://doi.org/10.3390/app11177867>
- Sasu, D. D. (2026, 28 de enero). *Production volume of paper and paperboard worldwide from 2011 to 2024, by type (in million metric tons)*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/270317/production-volume-of-paper-by-type/>

- Schulgasser, K. (1981). On the in-plane elastic constants of paper. *Fibre Science and Technology*, 15(4), 257–270. [https://doi.org/10.1016/0015-0568\(81\)90051-8](https://doi.org/10.1016/0015-0568(81)90051-8)
- Sek, M. A., & Kirkpatrick, J. (1997). Prediction of the cushioning properties of corrugated fibreboard from static and quasi-dynamic compression data. *Packaging Technology and Science*, 10(2), 87–94. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1522\(199703/04\)10:2%3C87::AID-PTS389%3E3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1522(199703/04)10:2%3C87::AID-PTS389%3E3.0.CO;2-L)
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2026). *Standards, methods, technical information papers (TIPs), and useful methods*. TAPPI. <https://www.tappi.org/publications-standards/standards-methods/>
- Xia, Q. S. (2002). *Mechanics of inelastic deformation and delamination in paperboard* [Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology].
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Govindjee, S. (2024). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (8th ed.). Elsevier.