

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

PROYECTO:

***CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CORRUGADOS A TRAVÉS DE PRUEBAS
DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO DE
SIMULACIÓN Y PRONÓSTICO***

REALIZADO POR:

MARLON ANDRÉS OLIVARES AGUILAR

COORDINADOR DE PRÁCTICA:

SEBASTIÁN MATA ORTEGA

I SEMESTRE 2024



Carrera evaluada y acreditada por:

Agencia de Acreditación de Programas de Ingeniería y de Arquitectura

Datos del estudiante

Nombre completo: Marlon Andrés Olivares Aguilar

Número de cédula: 305130653

Número de carné: 2018167972

Edad: 25 años

Números de teléfono: 8958-68-57/2552-89-27/ +1 (540) 605-0419

*Correos electrónicos: [moaguilar02@estudiantec.cr/](mailto:moaguilar02@estudiantec.cr)
moaguilar02@gmail.com*

*Dirección exacta de domicilio: 150m norte de Roles Ronupe, El Carmen,
Cartago*

Datos de la Empresa

Nombre: Instituto Politécnico de Virginia

Actividad Principal: Educación e investigación

Dirección: Blacksburg, Virginia 24061, EE. UU.

Contacto: Dr. Eduardo Molina (molina@vt.edu)

Teléfono: +1 (540) 231-8215

Carta de aceptación de la Empresa:



Department of Sustainable Biomaterials
Brooks Center, Mail Code 0503
Blacksburg, Virginia 24061
540-231-8215 Fax: 540-231-8868
Email: molina@vt.edu
sbio@vt.edu

9 de noviembre de 2023

Escuela de Ingeniería Electromecánica
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Estimado Coordinador de Práctica Profesional,

Por este medio confirmo la aceptación de Marlon Andrés Olivares Aguilar (Cédula: 305130653; Carné: 2018167972) al Departamento de Sustainable Biomaterials de Virginia Tech para trabajar como pasante durante el período de enero a mayo 2024 en Blacksburg, Virginia. Marlon Andrés va a trabajar en un proyecto de investigación titulado: "Caracterización de materiales corrugados a través de pruebas de compresión y flexión, para el desarrollo de un modelo de simulación y pronóstico". Los datos obtenidos durante el del proyecto, servirán como base para el desarrollo de modelos que permitan la optimización de los diseños de empaques a base de materiales corrugados. Este proyecto ya ha sido discutido con el estudiante y aprobado para ser ejecutado en la universidad.

Los resultados del proyecto se publicarán en un artículo científico, por lo que no se requiere confidencialidad. La presencia de Marlon Andrés en Blacksburg, Virginia requiere la aprobación de visas y trámites migratorios fuera de control de la Universidad y responsabilidad del estudiante.

Saludos Cordiales,

Eduardo Molina, PhD.

Packaging Systems and Design
Department of Sustainable Biomaterials
Virginia Tech
+(540) 231-8215
molina@vt.edu

Dedicatoria

A mis padres, quienes me dieron la oportunidad de estudiar y me inculcaron los valores de los cuales me siento más orgulloso; así como por siempre apoyarme e impulsarme a lograr mis metas.

A mi hermana, quien siempre ha sido un apoyo incondicional y un impulso para seguir adelante.

A mi abuela China, por ser mi segunda mamá; por tanto amor, cariño, enseñanzas y por siempre creer que lograría grandes cosas.

A familiares, quienes siempre han creído en mi potencial, me han apoyado y me han enseñado lo que es ser grandes seres humanos.

A mis amigos, Jeroen, Fabián, Jarod, Yos, Gabriel, Gabo, Ale, Jos, Vale, Carlos, Ricardo, Aquim y más; gran compañía momentos buenos y malos, sin quienes esto no hubiese sido posible.

A TECSpace, por brindarme la oportunidad de acercarme al sector espacial y darme muchas de las mejores experiencias que viví durante mi tiempo en el TEC.

A mis profesores, quienes me han dado las herramientas, enseñanzas y apoyo necesario para estar donde estoy.

A los grupos del TEC como Áncora y BeisTEC, por todas experiencias inolvidables y la oportunidad de conocer a grandes personas.

Agradecimiento

A mis padres, mi hermana, familiares y amigos por siempre creer en mí, respaldarme y apoyarme en los momentos más difíciles.

Al Tecnológico de Costa Rica y al COVAO, grandes instituciones que me formaron y me han llevado hasta donde estoy el día de hoy.

Al Dr. Molina por darme la gran oportunidad de participar en este gran proyecto, aprender acerca del mundo del Packaging y vivir esta gran experiencia. Además, por los consejos, la ayuda y por creer en mi trabajo.

A los profesores Christopher Vega, Noel Ureña y Luis Felipe Córdoba, quienes me apoyaron durante el desarrollo del proyecto y me estimularon para que este se pudiese llevar a cabo.

A Isaac, Ana Lucía, Fran, Abid y Angie, quienes siempre estuvieron dispuestos a ayudar y fueron cruciales para este proceso.

Resumen

En una economía cada vez más globalizada, es de vital importancia que las empresas puedan asegurarse de que sus productos lleguen en óptimas condiciones hasta sus clientes. Esto ha generado el desarrollo de distintos sistemas de transporte, los cuales se distinguen por el medio de transporte, material del empaque, capacidad, entre otros. Los materiales corrugados son de los más utilizados para la generación de empaques, ya que cuentan con una buena relación entre peso y capacidad de soportar cargas. Estos materiales son evaluados a través de distintas pruebas como compresión y flexión, para determinar que serán capaces de cumplir la función para la cual fueron diseñados. En este proyecto, se compararon los resultados de las pruebas ECT y flexión a cuatro puntos aplicadas a corrugados con flauta tipo B y C contra los obtenidos por medio de un software de simulación. Además, a través de los resultados obtenidos en pruebas BCT, fue posible desarrollar un modelo estadístico que permitiese pronosticar el comportamiento de cajas en voladizo y entender el efecto de las distintas variables.

Palabras clave: corrugado, ECT, BCT, voladizo, empaques, transporte, almacenado

Abstract

In the current globalized economy, it's crucial that the products can get to their destination properly. So different transportation systems have been developed. These systems may vary in aspects like capacity, packaging material, or means of transport. One of the most used packaging materials is corrugated due to its good compression strength and low weight. Different mechanical tests are used to ensure that the corrugated materials can resist what they were designed for. In this project, ECT and four-point bending tests were applied to B and C flute cardboards to compare their results to a simulation made in Finite Element Analysis software. Also, BCT tests were done in order to develop a statistical model for the prognostication of the overhang effect in boxes and how different variables affect the box compression strength.

Key words: corrugated, ECT, BCT, overhang, packaging, transportation.

Índice general

1	Introducción.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Antecedentes.....	2
1.3	Reseña de la Empresa.....	3
1.4	Planteamiento del problema.....	4
1.4.1	Objetivo General:.....	4
1.4.2	Objetivos Específicos:.....	4
1.5	Justificación.....	5
1.6	Viabilidad.....	6
1.7	Alcance.....	8
1.8	Limitaciones.....	8
1.9	Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto.....	10
2	Marco teórico.....	10
2.1	Mecánica y propiedades de los materiales.....	10
2.2	Sistemas de empaquetado y transporte.....	13
2.3	Estadística.....	17
3	Metodología.....	18
3.1	Prueba de compresión.....	19
3.2	Pruebas de flexión.....	21

3.3	Modelo estadístico.....	25
3.4	Simulación COMSOL	34
4	Resultados.....	37
4.1	Pruebas de compresión	37
4.2	Prueba de flexión a 4 puntos	39
4.3	Modelo estadístico.....	42
4.4	Simulación COMSOL	48
5	Discusión	50
6	Conclusiones.....	52
7	Recomendaciones	53
8	Bibliografía.....	54
9	Anexos.....	57
9.1	Resultados de las pruebas de compresión.....	57
9.2	Resultados de las pruebas de flexión.....	58
9.3	Ecuaciones de los modelos estadísticos.....	58
9.3.1	Ecuación del primer modelo estadístico.....	58
9.3.2	Ecuación del segundo modelo	61

Índice de Figuras

Figura 1. Cronograma de trabajo.....	10
Figura 2. Gráfica típica de un proceso isotérmico de absorción y liberación de humedad de materiales a base de papel y pulpa celulosa, donde B es la gráfica de absorción y A la de liberación de humedad. Fuente: (TAPPI, 2013b).....	11
Figura 3. Corrugado de pared doble. Fuente: (Fibre Box Association, 2018)	13
Figura 4. Dirección del maquinado (a) y dirección transversal (b). Fuente: (Frank, 2013). 14	
Figura 5. Distintos tipos de flauta. Fuente: (Fibre Box Association, 2018).....	15
Figura 6. Unión del fabricante, vista desde el interior de la caja. Fuente: (Fibre Box Association, 2018).....	15
Figura 7. Unidad de carga. Fuente: (Fibre Box Association, 2018).....	16
Figura 8. Caja de cartón en voladizo u "overhang". Fuente: elaboración propia	16
Figura 9. Dimensiones para las probetas de corrugado de flauta B. Fuente; Edgewise compressive strength of corrugated fiberboard (short column test) (TAPPI, 2017).	19
Figura 10. Cámara de acondicionamiento Parameter. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 11. Equipo MTS Criterion C42-503 utilizado para las pruebas de compresión. Fuente: elaboración propia	20
Figura 12. Bloque guía de metal. Fuente: elaboración propia.....	21
Figura 13. Configuración para la prueba de flexión de cuatro puntos, donde: F= fuerza aplicada, a= brazo de palanca, l= espacio libre, δ = deflexión. Fuente: (ABB, 2017)	22

Figura 14. Muestras para pruebas de flexión a cuatro puntos en configuración MD (superior) y CD (inferior). Fuente: elaboración propia	23
Figura 15. Etapa uno de la prueba de flexión a 4 puntos. Fuente: elaboración propia.....	24
Figura 16. Panel de control del equipo L&W 4-p Bending Stiffness Tester. Fuente: elaboración propia	24
Figura 17. Tercera etapa de la prueba de flexión a cuatro puntos. Fuente: elaboración propia.	25
Figura 18. Cámara de ambiente controlado Conviron CMP5000. Fuente: elaboración propia	29
Figura 19. Lansmont Squeezer. Fuente: elaboración propia	30
Figura 20. Guías utilizadas para ajustar la configuración de voladizo requerida. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 21. Sólido realizado en el software SolidWorks para su posterior importación en COMSOL.	34
Figura 22. Canto desde el cual se generará el desplazamiento prescrito. Fuente: elaboración propia en el software COMSOL.....	35
Figura 23. Análisis de simetría de la malla a estudiar, donde más cercano a uno, mejor es su calidad. Fuente: elaboración propia en el software COMSOL.....	36
Figura 24. Muestra sometida a la prueba ECT con resultado no válido. Fuente: elaboración propia	37

Figura 25. Muestra sometida a la prueba ECT tras un resultado válido. Fuente: elaboración propia.....	38
Figura 26. Representación del efecto de las variables en el modelo estadístico. Fuente: elaboración propia en el software JMP.	47
Figura 27. Mapa de calor de esfuerzos de von Mises en corrugado de flauta B. Fuente: elaboración propia.	48
Figura 28. Mapa de calor de esfuerzos de von Mises en corrugado de flauta C. Fuente: elaboración propia.	48

Tabla de Abreviaturas y símbolos

BCT: Resistencia a la compresión de la caja (Box Compression Strength)

CD: Dirección transversal a las flautas del corrugado (Cross Direction)

ECT: Resistencia a la compresión del canto (Edge Compression Strength)

MD: Dirección de la máquina (Machine direction)

S^b: Resistencia a la flexión

R²: Coeficiente de determinación

FBA: Asociación de Cajas a base de Fibra (Fiber Box Association)

CoV: Coeficiente de variación

s: Desviación estándar

\bar{x} : promedio

1 Introducción

1.1 Introducción

El empaquetado de los diferentes productos forma una parte crucial en la economía actual, ya que alrededor del 80% de los artículos son transportados en forma de unidades, las cuales son un conjunto de unidades de venta apilados, que pueden estar hechos de diferentes materiales; pero que predomina en un 72% el uso de cajas de material corrugado (Kim et al., 2023).

Debido a la alta presencia de las cajas de material corrugado en la industria, y su función de transporte y protección de los diferentes productos que pueden llegar a contener, diferentes laboratorios y organizaciones se han dedicado a estudiar el comportamiento que tiene esta forma de empaquetado y su capacidad de soportar carga de compresión. Ahora, dentro de los resultados obtenidos, se encuentran modelos empíricos que indican que esta capacidad se ve afectada por variables como el tamaño de la caja, su forma, tamaño de la flauta (estructura interna), porciones de la caja que sobresalgan de la tarima, humedad del ambiente, densidad del material, entre otras (Baker, Horvath, & White, 2016).

A pesar de los resultados obtenidos a lo largo de los años, el Comité Técnico de la Asociación de Cajas de Fibra de Estados Unidos (FBA por sus siglas en inglés) ha decretado que es necesaria una mayor investigación para entender el comportamiento de este material. Por esta razón, diferentes laboratorios están trabajando a partir de resultados de investigaciones pasadas, como la ecuación de Mckee, añadiendo más variables y factores que permitan predecir la capacidad de carga de compresión de las cajas de una manera más

precisa; hasta generar simulaciones más fiables a través de medios como modelos matemáticos universales o el análisis de elementos finitos.

1.2 Antecedentes

El empaquetado tiene un papel esencial en el ciclo de vida un producto, ya que se encarga de llevarlo en estado óptimo hasta las manos del cliente. Por ejemplo, estudios han demostrado que en la industria alimenticia entre un 20% a 25% de las pérdidas y desperdicio de comida se dan debido a problemas con los empaques que ocurren durante su transporte (Wohner, 2019), los cuales pueden generarse por un mal diseño, un desconocimiento de su resistencia y, por ende, una disposición inadecuada en la elaboración de unidades de carga. En esta industria, uno de los principales materiales de los cuales se fabrican los empaques, es el cartón corrugado. Este material es uno de los favoritos de la industria, debido a que cuenta con una buena capacidad de soportar cargas a pesar de ser liviano, asimismo, requiere poco espacio para su almacenamiento y tiene facilidad de ser reciclado, disminuyendo el impacto al medio ambiente (Mrowczynski, Gajewski, Pospiech, & Garbowski, 2024). Sin embargo, su resistencia puede ser afectada por diversos factores como el espesor de las capas y la cantidad de estas, así como las diferentes variables ambientales y la forma en que el paquete se apoye sobre el suelo, repisas, otros empaques, tarima, entre otros (Fadiji et al, 2018)

Debido a estos escenarios, la FBA propone distintos factores de ajuste aplicables a la resistencia a la compresión calculada en el diseño del empaque; donde uno de los factores con mayor incertidumbre es el voladizo u “overhang” (Fibre Box Association, 2018). Esto ha generado distintas investigaciones con variaciones como un mismo tipo de caja con

diferentes configuraciones de voladizo que han resultado en coeficientes aplicables al BCT del empaque, hasta modelos estadísticos que describen el comportamiento de las cajas debido a la variación de factores como el tamaño del empaque, ECT y variación en el voladizo (Kim, et al., 2023).

Finalmente, a pesar de las diferentes investigaciones realizadas, organizaciones como la FBA y la Fundación Internacional de Empaques Corrugados consideran que es necesario un estudio aún más profundo, dando como resultado la investigación realizada por (Kim, et al., 2023) que a su vez genera el proyecto presentado en este documento, el cual es considerado por el equipo de investigación como la etapa dos de dicho proyecto.

1.3 Reseña de la Empresa

La Universidad Politécnica de Virginia (Virginia Tech) es una institución encargada tanto de la formación de profesionales en diferentes áreas, caracterizada por ser una comunidad inclusiva de conocimiento, descubrimiento y creatividad enfocada a la mejora de la calidad de vida de la humanidad. Por esta razón, lleva a cabo el desarrollo de diversas investigaciones en los distintos laboratorios con los que cuentan, entre estos, el Centro de Diseño de Unidades de Carga y Empaquetado.

Este centro tiene el propósito de ser un eje de innovación donde investigadores, estudiantes y profesionales de la industria puedan trabajar juntos para alcanzar distintos objetivos en común. Para lograrlo, el centro ofrece distintos servicios de capacitación, investigación y ensayos. Dentro de esta última categoría, se encuentran: pruebas enfocadas en tarimas para almacenamiento de paquetes y sus sistemas de sujeción, diseño y prototipado de empaques, pruebas para determinar la distribución el acomodo más eficiente de los

paquetes a través de sus dimensiones y capacidad de carga y, finalmente, la prueba y certificación de materiales.

1.4 Planteamiento del problema

Una caracterización adecuada de los materiales corrugados en sus diferentes escenarios, permitirá generar diseños eficientes tanto, de los empaques de las unidades de venta (paquetes individuales), como de la configuración para las unidades de carga que permitan proteger el producto (Kim et al, 2023). Esta información es vital para reducir las pérdidas debido a los procesos de transporte y manejo, reducir desperdicios y evitar la necesidad de volver a producir las unidades perdidas; esto, simultáneamente, representa un ahorro energético importante.

1.4.1 Objetivo General:

- Desarrollar la caracterización de un material corrugado a través de pruebas de compresión y flexión para la determinación de su comportamiento durante los procesos de almacenado y transporte de productos.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Comparar la capacidad de soporte de cargas de compresión de diferentes calidades de material corrugado a través de la prueba Edge Crush Resistance Testing y bajo los estándares ISO 3037, ISO 13821, TAPPI T811, TAPPI T839; para la comprensión del efecto y la calidad sobre dicha capacidad.

Indicador: Gráfico de carga de compresión soportada contra calidad del material.

- Comparar la capacidad de soporte de cargas de flexión de diferentes calidades de material corrugado a través de la prueba Bending Stiffness Testing y bajo los

estándares ISO 5628 y TAPPI T836; para la comprensión del efecto la calidad sobre dicha capacidad.

Indicador: Gráfico de carga de flexión soportada contra calidad del material.

- Elaborar un modelo estadístico que permita la predicción de los resultados obtenidos en las pruebas de compresión (BCT) realizadas a cajas completas.

Indicador: Desarrollo de modelo estadístico.

- Comparar los resultados obtenidos mediante simulaciones de elemento finito en el software COMSOL Multiphysics contra los obtenidos en las pruebas mecánicas realizadas en el laboratorio, para la evaluación del programa como herramienta de estudio alternativa.

Indicador: análisis comparativo de los resultados prácticos contra los obtenidos por medio del análisis de elemento finito.

1.5 Justificación

En un mundo donde el comercio internacional, exportaciones e importaciones son cada vez más comunes y necesarias, el empaquetado de productos se vuelve un tema cada vez más importante. Esto, debido a que los sistemas de empaquetados tienen la responsabilidad de asegurar una correcta protección al producto, así como la de facilitar su transporte y distribución (Ait-Oubahou, Hanani, & Jamilah, 2019)

Con el propósito de asegurar que un empaque es capaz de soportar las diferentes adversidades a las que se puede enfrentar durante su vida útil, tales como vibraciones, caídas, impactos, humedad, temperaturas extremas o cargas de compresión y flexión, diferentes laboratorios se encargan de realizar pruebas a los diseños de sistemas de empaquetado y sus

materiales; esto, con el propósito de asegurar que los productos empacados no llegarán a sufrir daños y se conviertan en pérdidas para las empresas (Murphy, 2018). Estas pruebas son realizadas bajo estándares como ISO 3037, ISO 13821, TAPPI T811, TAPPI T839, ISO 5628 y TAPPI T836.

Diferentes estudios aseguran que alrededor de un 80% de los productos en Estados Unidos son transportados en forma de Unidades de Carga (McCrea, 2020) de los cuales, el 72% utiliza materiales corrugados para sus empaques. Esta situación ha generado que en distintos grupos se desarrollen investigaciones con el propósito de entender el comportamiento de los materiales corrugados bajo las diferentes condiciones de carga. A pesar de los resultados obtenidos, la Asociación de Cajas de Fibra (FBA, por sus siglas en inglés) ha determinado que es necesario realizar más estudios para comprender el comportamiento de las cajas de cartón cuando estas sobresalen de las tarimas y, así, las empresas sean capaces de desarrollar un diseño eficiente de sus empaques de cartón (Kim et al., 2023).

Por lo tanto, este proyecto pretende generar información y la base de un modelo que permita una comprensión integral sobre qué son los materiales corrugados para construir a futuro un modelo matemático y simulaciones de elementos finitos que contemplen la mayoría de las variables que puedan afectar la capacidad de carga de este material; dando paso a diseños de paquetes más eficientes y resistentes.

1.6 Viabilidad

Para la caracterización de los materiales, es necesario realizar diferentes pruebas a muestras o probetas manufacturadas bajo las especificaciones de distintas normas. El Centro

para Sistemas de Empaquetado y Diseño de Unidades de Carga de la Universidad Politécnica de Virginia (Virginia Tech), cuenta con el Laboratorio para Pruebas de Materiales Corrugados, el cual está capacitado para realizar las diferentes evaluaciones capaces de comprobar, bajo un ambiente controlado, el desempeño de los materiales y diseños realizados para los empaques y unidades de carga. Asimismo, este centro cuenta con uno de los cuatro laboratorios a nivel mundial (el único en el continente americano) capacitado para realizar las certificaciones de materiales corrugados para quienes deseen ser proveedores de la empresa IKEA.

Además, dentro de las diferentes pruebas que se pueden realizar en el Laboratorio para Pruebas de Materiales Corrugados, se encuentran pruebas de resistencia a la compresión del canto, pruebas de resistencia a la compresión de las caras y resistencia a la flexión, las cuales serán fundamentales para la obtención de datos para este proyecto. Asimismo, en caso de explorar otras variables, el laboratorio también cuenta con pruebas para medir el espesor de los materiales, determinar su coeficiente de fricción o su capacidad de absorción de agua.

Finalmente, es importante aclarar que el grupo encargado de la investigación principal se encuentra respaldado por la Fundación Internacional de Empaquetado a base de materiales Corrugados (International Corrugated Packaging Foundation) y la Asociación de Cajas a base de Fibra (Fibre Box Association, FBA), organizaciones que, inclusive, han financiado investigaciones anteriores del mismo grupo de trabajo, como la realizada para la publicación “Predicting the effect of pallet overhang on the box compression strength” (Kim et al, 2023).

1.7 Alcance

La caracterización completa de un material corrugado es una tarea extensa y compleja. Este trabajo se enfocará en realizar pruebas mecánicas preliminares, sin embargo, debido a la limitante del tiempo (establecido por el calendario académico del TEC) no es posible abarcar todas las pruebas esperadas en este proyecto.

El desarrollo de un modelo estadístico será la base del desarrollo de un modelo matemático de mayor complejidad, el cual será capaz de considerar las diferentes variables que puedan afectar el desempeño de los empaques a base de materiales corrugados. Este modelo matemático tendrá el objetivo de predecir el comportamiento de los materiales corrugados, con el propósito de optimizar el diseño de empaques, asegurando la protección de los productos empacados a través una resistencia adecuada; pero con la menor cantidad de material posible. Es importante aclarar que, debido a su alta complejidad y el tiempo de desarrollo que requiere, el modelo matemático queda fuera del alcance del proyecto presentado.

Finalmente, el desarrollo de las simulaciones en COMSOL tuvieron el objetivo de analizar este método como alternativa a las pruebas IKEA realizadas en los laboratorios de la Universidad Politécnica de Virginia.

1.8 Limitaciones

El tiempo disponible para el desarrollo del proyecto es una de las principales limitantes, ya que las 14 semanas que dispone el TEC no son suficientes para obtener un modelo matemático complejo que describa por completo el comportamiento de las distintas

calidades de los materiales corrugados; por lo cual se establece el desarrollo de un modelo estadístico que genere las bases para el futuro modelo matemático.

Además, el proyecto dependió de la disponibilidad de los equipos encargados de realizar las pruebas mecánicas, tanto de las pruebas de compresión como flexión, ya que sus resultados fueron vitales para elaborar las distintas comparaciones y modelos requeridos. Asimismo, este proyecto dependió de las condiciones en la cámara de ambiente controlado, ya que durante varias semanas su sistema de acondicionamiento no funcionó de manera adecuada, generando una atmosfera con una humedad mayor a los límites establecidos por la norma pertinente (TAPPI, 2013b). Además, estos equipos se encuentran en los laboratorios de las Universidad Politécnica de Virginia (Virginia Tech), por lo cual se requirió la obtención de una Visa que permita el ingreso al país para realizar las pruebas correspondientes.

Finalmente, debido al propósito de realizar una comparación de los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas con los de simulaciones en software de elementos finitos, se requirió la obtención de una licencia. Para esto, se conversó con el personal de la Escuela de Ciencias e Ingeniería de los Materiales del Tecnológico de Costa Rica, el cual generó un acceso remoto a una computadora equipada con COMSOL Multiphysics; de no ser así, esta comparación no se hubiese podido llevar a cabo.

1.9 Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto

Actividad	Fecha																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
	5-feb	12-feb	19-feb	26-feb	4-mar	11-mar	18-mar	25-mar	1-abr	8-abr	15-abr	22-abr	29-abr	6-may	13-may	20-may	27-may	3-jun
Objetivo específico 1																		
Preparación de muestras																		
Pruebas de compresión																		
Objetivo específico 2																		
Preparación de muestras																		
Pruebas de flexión																		
Objetivo específico 3																		
Toma de datos																		
Construcción del modelo estadístico																		
Recreación de los datos obtenidos																		
Objetivo específico 4																		
Simulación en software de elementos finitos																		
Comparación con resultados prácticos																		
Redacción de informe y defensa																		

Figura 1. Cronograma de trabajo.

2 Marco teórico

2.1 Mecánica y propiedades de los materiales

Para una correcta caracterización de materiales, es importante conocer sus diferentes características, como pueden variar y el efecto que pueden tener en su desempeño. Para esto, distintos autores se han dedicado a describir las propiedades más importantes y los procedimientos para determinarlas. Entre estas podemos encontrar:

- Coeficiente de Poisson: Es la razón que se obtiene al dividir el negativo de la deformación lateral entre la deformación longitudinal de un material. El coeficiente de Poisson es un valor adimensional único para cada material cuando este es isotrópico y homogéneo (Hibbeler, 2019)
- Contenido de humedad o agua (Moissure content): Cantidad de agua que se encuentra dentro del material; esta característica es de suma importancia en los materiales a base de madera, ya que puede afectar las distintas cualidades con las que este cuenta. Generalmente se expresa en forma de porcentaje, el cual se

obtiene de la diferencia entre la masa del material húmedo menos la del material seco y dividiendo este resultado entre la masa del material húmedo. Su comportamiento es distinto en condiciones ascendentes y descendentes como se observa en la Figura 2 (ASTM, 2020b).

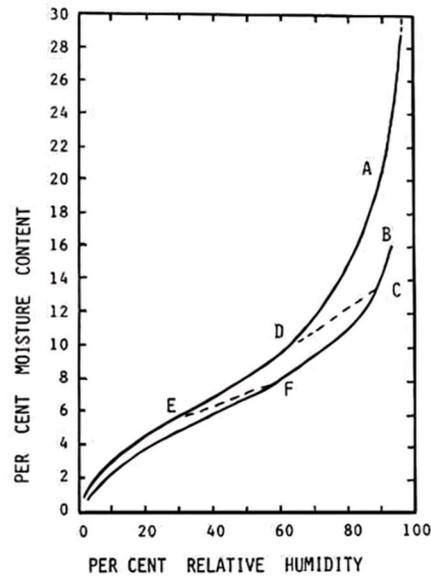


Figura 2. Gráfica típica de un proceso isotérmico de absorción y liberación de humedad de materiales a base de papel y pulpa celulosa, donde B es la gráfica de absorción y A la de liberación de humedad.

Fuente: (TAPPI, 2013b)

- Deformación nominal: es la relación que determina la deformación de un material, esta se obtiene dividiendo el cambio de la medida lateral o longitudinal entre la respectiva medida original (Hibbeler, 2019).
- Prueba de compresión de canto (Edge Compression Test): Prueba encargada de determinar la resistencia a la compresión por unidad lineal (ECT) que tiene una muestra de cartón corrugado colocado con las flautas de forma vertical (Fadiji et al, 2018).
- Resistencia a la compresión: Propiedad utilizada para la evaluación de los distintos métodos de empaquetado, con el propósito de que estos puedan soportar

todas las cargas a las que se pueden enfrentar a lo largo de su vida útil (ASTM, 2020a).

- Resistencia a la Flexión: Según la norma TAPPI T 836 om-13, la resistencia a la flexión de un material se define como el momento de flexión por unidad de ancho de la muestra, dividido entre la respectiva curvatura (TAPPI, 2013a):

$$S^b = \frac{M}{kb} \quad (2.1)$$

Donde:

S^b	=	resistencia a la flexión
M	=	momento de flexión
k	=	curvatura
b	=	ancho de la probeta

Asimismo, es importante comprender las diferentes causas y efectos presentes durante la determinación de las propiedades. Esto permite generar un análisis adecuado de los resultados obtenidos. Entre los más importantes encontramos:

- Carga constante: Carga que no varía o cambia a lo largo del tiempo (ASTM, 2023).
- Carga estática: fuerza estacionaria aplicada sobre un cuerpo, de una manera constante en magnitud y dirección (ASTM, 2023).
- Fuerza de compresión: fuerza que genera que un cuerpo tienda a reducir su longitud (Hibbeler, 2019).
- Factor de pérdida por voladizo (Overhang loss factor): relación entre el porcentaje de pérdida de la capacidad de carga de compresión de una caja, dividido entre el porcentaje del perímetro de esta que se encuentra sobresaliendo de una superficie o en voladizo (Kim et al, 2023).

- Pandeo (buckling): Se puede definir como “modo de falla distintivo causado por cargas de compresión puras, en las que el punto medio de la muestra se mueve sustancialmente hacia afuera respecto al plano vertical, creando una forma similar a una letra “C” (International Organization of Standardization, 2022)

2.2 Sistemas de empaquetado y transporte

Los corrugados están caracterizados por contar con diferentes secciones, esto genera que sus características sean distintas dependiendo de su orientación. Dentro de las principales características de los materiales corrugados podemos encontrar:

- Corrugado de cara simple: Variación de material corrugado que está compuesto por una capa de flautas y un solo liner (Fibre Box Association, 2018).
- Corrugado de pared doble: Está compuesto de dos liners externos y capas de flautas (del mismo tipo o distintas) separadas por un liner adicional, como se muestra en la Figura 3 (Fibre Box Association, 2018).



Figura 3. Corrugado de pared doble. Fuente: (Fibre Box Association, 2018)

- Corrugado de pared simple: Tipo de corrugado compuesto por dos liners y una fila de flautas (Fibre Box Association, 2018).

- Dirección de la Máquina (Machine Direction): Indica la dirección paralela a las flautas que componen el corrugado, como se observa en la Figura 4 (a) (Frank, 2013).
- Dirección transversal (Cross Direction): Dirección perpendicular a las flautas del corrugado, como se observa en la Figura 4 (b) (Frank, 2013).

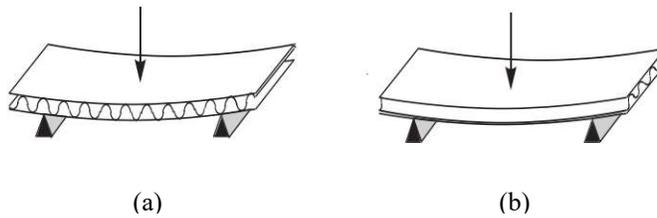


Figura 4. Dirección del maquinado (a) y dirección transversal (b). Fuente: (Frank, 2013)

- Flauta (flute): estructura interna del material corrugado, encargada de darle la resistencia requerida a la estructura. Esta se encuentra entre las paredes y tiene forma ondulada (Jamsari, et al., 2019). Según el Manual de las Cajas a base de Fibra se puede encontrar distintos de tipos (Figura 5), entre los que se encuentran (Fibre Box Association, 2018):
 - Flauta A: Contiene aproximadamente treinta y tres flautas por pie lineal.
 - Flauta B: Con alrededor de cuarenta y siete flautas por pie lineal, fue diseñada para el empaque de productos enlatados.
 - Flauta C: Tiene cerca de treinta y nueve flautas por cada pie lineal y es de uso general.
 - Flauta E: Se compone de noventa flautas por pie lineal.

- Flauta F: Desarrollada para facilitar su doblez, contiene cerca de 125 flautas por pie lineal.

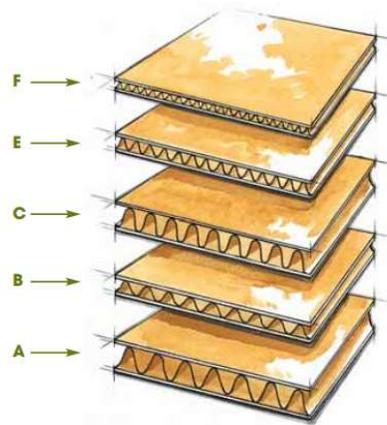


Figura 5. Distintos tipos de flauta. Fuente: (Fibre Box Association, 2018)

- Liner: sección del material corrugado que envuelve a la flauta (Fibre Box Association, 2018).
- Unión del fabricante: Como se muestra en la Figura 6, es una sección extra de material que permite cerrar por completo el perímetro de la caja de manera que pueda ser armada posteriormente. Esta suele fijarse por medio del uso de pegamento (Fibre Box Association, 2018).

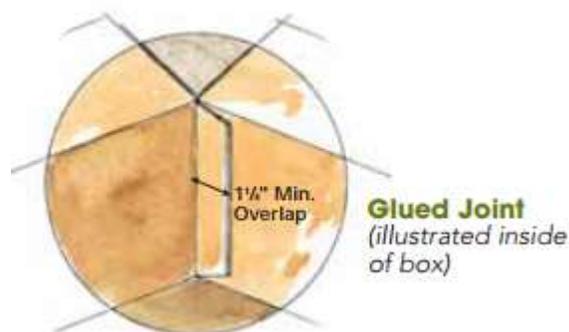


Figura 6. Unión del fabricante, vista desde el interior de la caja. Fuente: (Fibre Box Association, 2018)

Los sistemas de transporte a gran escala, utilizan diferentes elementos, entre los que se encuentra la tarima (pallet), la cual es una plataforma hecha de diferentes materiales sobre la cual se van a soportar las unidades de carga, estas tienen el propósito de servir de apoyo, distanciar el producto del suelo y facilitar el manejo de los productos (Murphy, 2018)

Sobre estas tarimas se generan las unidades de carga, como la mostrada en la Figura 7, las cuales son definidas por Murphy & Knemeyer (2018) para quienes la unidad de carga es una consolidación de varias unidades menores en una más grande, esta está enfocada en el transporte de grandes cantidades de producto de una manera más eficiente, permitiendo la reducción de costos.

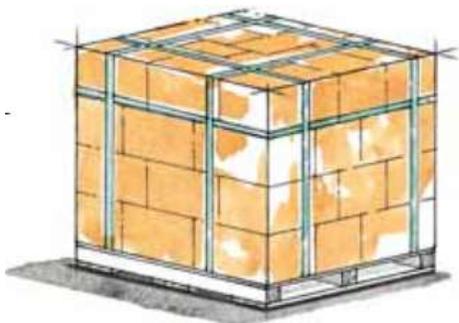


Figura 7. Unidad de carga. Fuente: (Fibre Box Association, 2018)

Asimismo, el ámbito de transporte y almacenamiento de productos, existe un término en inglés conocido como “overhang” que, si bien es difícil encontrar un término en español, se puede traducir como voladizo ya que, según la Real Academia Española, se define como un elemento que sobresale respecto al resto de una estructura (Real Academia Española). Si se aplica al contexto de materiales corrugados, se trata del estado en el cual el empaque no se encuentra completamente soportado, como se observa en la Figura 8, generando pérdidas en su capacidad de resistencia de cargas (Fibre Box Association, 2018).



Figura 8. Caja de cartón en voladizo u "overhang". Fuente: elaboración propia

2.3 Estadística

Como se mencionó anteriormente, en este proyecto se desarrolló un modelo estadístico, el cual es una herramienta utilizada para describir el comportamiento de una población o conjunto de datos (Walpole, Myers, L., & Ye, 2022). El tipo de modelo desarrollado se conoce como regresión lineal, el cual permite representar de manera casi ideal la relación entre una o más variables independientes con el resultado de un experimento o variable dependiente (Walpole, Myers, L., & Ye, 2022). Este se divide en dos tipos: regresión lineal simple y regresión lineal múltiple, cuya diferencia se basa en si el comportamiento descrito depende de una única variable independiente o más de un regresor (Walpole, Myers, L., & Ye, 2022).

Asimismo, es necesario determinar si el desarrollo del modelo cumple con las expectativas planteadas y que, genera predicciones correctas del fenómeno estudiado. Para esto fue necesario aplicar un análisis de regresión, este es un proceso que determina la mejor relación entre las variables dependientes e independientes, para que el modelo pueda realizar predicciones que se acerquen lo más posible a los valores reales o experimentales (Walpole, Myers, L., & Ye, 2022). En este caso, se utilizó un análisis por mínimos cuadrados, el cual disminuye la desviación entre los valores predichos por el modelo y los experimentales, a través de la reducción de los residuos, los cuales son los errores de ajuste existente tras el desarrollo de un modelo estadístico. (Walpole, Myers, L., & Ye, 2022)

Finalmente, se debe resaltar el uso del coeficiente de determinación (R^2), el cual representa la calidad del ajuste a través de la medida de la variabilidad del modelo. Su valor se encuentra $0 \leq R^2 \leq 1$ donde, si es igual a uno, sus residuos son cero, generando un ajuste perfecto, pero si se acerca a cero, significa un mal ajuste (Walpole, Myers, L., & Ye, 2022).

3 Metodología

Tabla 1. Resumen de la metodología del proyecto

Objetivo específico planteado	Actividad por realizar	Fuente de información	Análisis de datos con criterios estadísticos.	Resultados esperados (Entregables)
#1	Someter probetas estandarizadas hechas de material corrugado de diferentes calidades a pruebas de compresión.	TAPPI Test Method T 811(TAPPI, 2017)	Gráficos de resistencia a la compresión	Gráfico de carga de compresión soportada para diferentes calidades del material.
#2	Someter probetas estandarizadas hechas de material corrugado de diferentes calidades a pruebas de flexión.	TAPPI Test Method T 836 (TAPPI, 2013a)	Gráficos de resistencia a la flexión	Gráfico de carga de flexión soportada contra calidad del material.
#3	Construcción del modelo estadístico Recreación de los resultados obtenidos en las pruebas prácticas	Predicting the effect of pallet overhang on the box compression strength (Kim et al, 2018)	Resultados obtenidos en las pruebas de flexión y compresión	Modelo estadístico.
#4	Simulación en software de elemento finito Comparación de resultados	Application of finite element analysis to predict the mechanical strength of ventilated corrugated paperboard packaging for handling fresh produce. (Fadiji, Ambaw, Coetzee, Berry, & Opara, 2018) Estimation of the Compressive Strength of Cardboard Boxes (Mrowczynski, Gajewski, Pospiech, & Garbowski, 2024)	Datos prácticos contra datos de simulación	Análisis comparativo de los resultados prácticos contra los obtenidos por medio del análisis de elemento finito.

3.1 Prueba de compresión

En relación con el objetivo específico 1, se propone la prueba Edge Crush Resistance Testing, la cual se realizará bajo la norma TAPPI 811 om-17. Entre sus diferentes apartados, esta norma indica las características que deben presentar las muestras a evaluar (Figura 9); las cuales deben medir $50.8 \text{ mm} \pm 0,8 \text{ mm}$ de largo (dirección perpendicular a las flautas) y $31.8 \text{ mm} \pm 1,6 \text{ mm}$ de altura (dirección paralela de las flautas) para corrugados de flauta tipo B; y $38.1 \text{ mm} \pm 1,6 \text{ mm}$ de altura para flauta tipo C (TAPPI 2017).

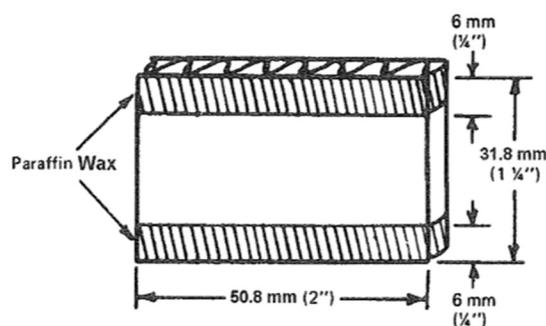


Figura 9. Dimensiones para las probetas de corrugado de flauta B. Fuente; Edgewise compressive strength of corrugated fiberboard (short column test) (TAPPI, 2017).

Asimismo, indica que los extremos verticales deben reforzarse con parafina, para que el fallo se genere en el centro de la probeta. Para esto, se debe calentar la parafina a no más de $74 \text{ }^\circ\text{C}$ y sumergir 6 mm cada extremo por tres segundos e, inmediatamente, secar el exceso con la ayuda de un papel toalla precalentado en una plantilla. Seguidamente, se dejan secar y después se colocan en una pequeña cámara de acondicionamiento (Figura 10) a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ y $50\% \pm 1\%$ de humedad relativa durante un mínimo de 24 horas.



Figura 10. Cámara de acondicionamiento Parameter. Fuente: Elaboración propia.

Para efectuar la prueba, se utilizó el equipo MTS Criterion C42-503 con una celda de carga LBS-503, la cual permite una medición máxima de 5000 N, esta se puede observar en la Figura 11.



Figura 11. Equipo MTS Criterion C42-503 utilizado para las pruebas de compresión. Fuente: elaboración propia

La prueba consiste en colocar la muestra de manera que la sección de 50.8 mm quede de manera horizontal, quedando paralela a las caras de la máquina que aplicarán la fuerza. Para esto, se utilizan dos bloques guía o soportes como se puede apreciar en la Figura 12; las dimensiones y requerimientos de estas guías están establecidos por la norma (TAPPI, 2017). Una vez colocadas las guías y la muestra, se selecciona el comando para el inicio a prueba, generando que las caras del equipo avancen a una velocidad constante de $(12,5 \pm 0,25)$ mm/min hasta aplicar una precarga de entre 22 N y 67 N, lo cual permitirá quitar los bloques y que estos no interfieran con los resultados de la prueba. A continuación, se reanuda el avance del equipo hasta que la muestra falle; este procedimiento debe repetirse hasta obtener, como mínimo, 10 mediciones válidas (TAPPI, 2017).

3.2 Pruebas de flexión

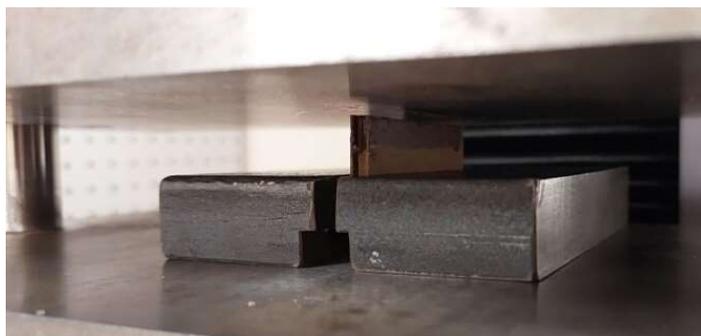


Figura 12. Bloque guía de metal. Fuente: elaboración propia

Para el cumplimiento del objetivo específico 2, se utilizará la prueba “Bending Stiffness Testing”, la cual está normada bajo el estándar TAPPI T 836 om-13 (TAPPI, 2013a), el cual nos indica cómo realizar el método de flexión a 4 puntos, el recomendado para materiales corrugados según la norma ISO 5628:2019 (International Organization for Standardization , 2019). Esta prueba, es considerada de 4 puntos debido a que la fuerza “F” se aplica en ambos extremos de la probeta, que es sujeta por dos prensas, lo cual genera

dos ejes de rotación “r” en los bordes internos de ambos puntos de sujeción; tal y como se observa en la Figura 13.

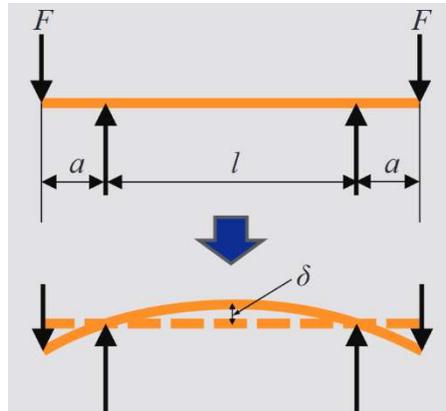


Figura 13. Configuración para la prueba de flexión de cuatro puntos, donde: F= fuerza aplicada, a= brazo de palanca, l= espacio libre, δ = deflexión. Fuente: (ABB, 2017)

Esta figura, permite entender el cálculo de la ecuación (2.1) de la siguiente forma:

$$S^b = \frac{F \times a \times l^2}{w \times \delta \times 8} \quad (3.1)$$

donde;

S^b = resistencia a la flexión (Nm)

F= fuerza (N)

a= distancia entre el punto de apoyo y el de aplicación de la fuerza (m)

l= distancia de flexión (m)

δ = desplazamiento máximo (m)

w= ancho de la pieza (m)

Debido a que los materiales a probar son de flauta tipo B y C, ambos de pared simple, la norma nos indica que las muestras se deben preparar con un ancho de 100 mm y se les debe garantizar un espacio libre “l” de 200 mm a la hora de efectuarse la prueba (TAPPI, 2013a). Por lo tanto, se establece que su largo sea 300 mm, teniendo así, suficiente material para asegurar una correcta sujeción.

Además, la norma indica que para el estudio adecuado su comportamiento, se deben realizar al menos diez pruebas por cada dirección del material. Como se observa en la Figura 14, en las pruebas en dirección de la máquina (MD) se establece que el ancho de la probeta se medirá de manera paralela a la dirección de las flautas del material. Por el contrario, para las pruebas en dirección transversal (CD), la longitud de cada muestra se medirá en de forma paralela a las flautas. Asimismo, de las diez pruebas realizadas por cada dirección, se realizan cinco para la cara interna del corrugado y cinco para la externa (TAPPI, 2013a).



Figura 14. Muestras para pruebas de flexión a cuatro puntos en configuración MD (superior) y CD (inferior). Fuente: elaboración propia

Para realizar esta prueba, se utiliza el equipo “4 point bending stiffness tester” de la compañía Lorentzen & Wettre, el cual funciona por medio de aire comprimido y divide el proceso en cuatro etapas. En la primera etapa (Figura 15), el equipo abre las prensas con el propósito de que se pueda insertar la muestra a evaluar de manera correcta. Además, se levantan los soportes ubicados a ambos extremos, en los cuales se colocarán las masas seleccionadas para la aplicación de la fuerza “F” mostrada en la Figura 13.



Figura 15. Etapa uno de la prueba de flexión a 4 puntos. Fuente: elaboración propia.

En la segunda etapa, las prensas sujetan la probeta por medio de un accionamiento neumático. En este punto, el material queda completamente horizontal y nivelado con la barra de medición (ubicada en el centro de la muestra), por lo cual este será el punto de referencia para medir la deformación durante la prueba. Además, para asegurarse que el punto de inicio sea el correcto, el equipo cuenta con un tornillo (etiquetado como “ZERO” en la Figura 16) que permite ajustar la medición inicial de desplazamiento a 0,00 mm, debido los efectos de las variables del proceso, como los distintos espesores de los materiales.



Figura 16. Panel de control del equipo L&W 4-p Bending Stiffness Tester. Fuente: elaboración propia

En la tercera etapa, las masas descenden lentamente hasta hacer contacto con las prensas, iniciando la flexión del material (Figura 17). Es importante mencionar que, se deben cronometrar 10 ± 3 s desde el instante en que las masas hacen contacto con las prensas y, una vez transcurrido este periodo, anotar la medición de desplazamiento (TAPPI, 2013a). Finalmente, en la cuarta etapa las masas son elevadas y las prensas se abren para poder retirar el material.

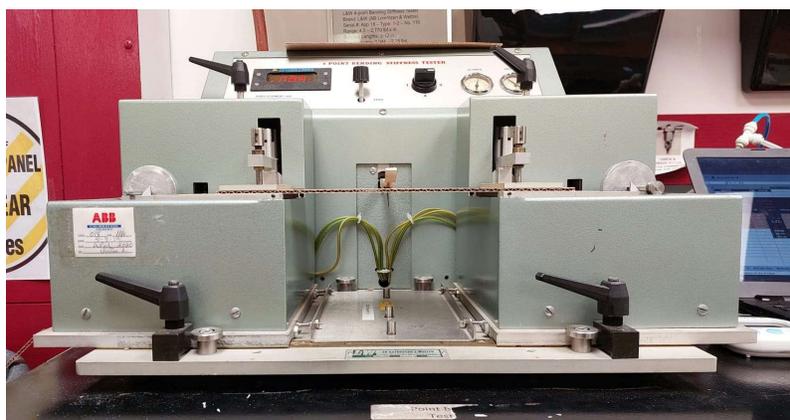


Figura 17. Tercera etapa de la prueba de flexión a cuatro puntos. Fuente: elaboración propia.

3.3 Modelo estadístico

Respecto al objetivo específico 3, se propone el desarrollo de un modelo estadístico que permita describir el comportamiento de la resistencia a la compresión de cajas de cartón en voladizo u “overhang”. Esta investigación, tiene como finalidad continuar con la investigación realizada en la publicación “Predicting the effect of pallet overhang on the box compression strength” (Kim, et al., 2023), en conjunto con el laboratorio que realizó esta primera etapa. Para esto, se toma como referencia la propuesta realizada a la Asociación de Cajas a base de Fibras (FBA) sobre el diseño del experimento, realizada por los miembros del laboratorio; el Dr. Eduardo Molina y el Dr. Laszlo Horvath. En este documento se describe el uso del método “Fast Flexible Filling” para cubrir de manera uniforme el espacio

multidimensional en el que se desarrolla el experimento; considerando las diferentes variables empleadas en la fase 1 y otras nuevas como la altura de la caja, para así expandir la cantidad de datos con los que se cuenta y generar un modelo más robusto para la pronosticación del efecto del voladizo en el desempeño de empaque.

Una vez aplicado el método, el equipo concluye que serán necesarios tres calidades distintas de material (basadas en el ECT y tipo de flauta), con cinco variaciones de tamaños de caja por caja uno. Asimismo, se obtuvo un rango de voladizo de entre 0,25 y 3,25 pulgadas que puede ser aplicado para el largo, ancho o ambos lados al mismo tiempo. Además, se obtuvo dos escenarios de voladizo por dirección, generando seis pruebas distintas por caja. A esto se le debe sumar que, para cada tipo de caja, se midió la máxima fuerza de compresión que esta resiste cuando está soportada de manera completa sobre una superficie, con el propósito de tener una referencia acerca de cuánto afecta la existencia del voladizo; para un total de siete variaciones de pruebas por cada tipo caja. En resumen, se tuvo cinco tamaños distintos de cajas por cada uno de los tres tipos de ECT, las cuales fueron estudiadas en siete escenarios distintos con 10 repeticiones de cada uno; para un total de 1050 pruebas realizadas. La totalidad de escenarios se pueden ver en la Tabla 2 y la Tabla 3.

Tabla 2. Características de las cajas a estudiar en las pruebas BCT, obtenidas del diseño de experimentos realizado por el laboratorio (parte 1). Fuente: elaboración propia

Flauta	ECT (kN/m)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Voladizo Largo (cm)	Voladizo Ancho (cm)	Lado
B	5.6	34.3	34.3	40.6	0.0	3.4	Ancho
B	5.6	34.3	34.3	40.6	0.0	6.7	Ancho
B	5.6	34.3	34.3	40.6	3.5	0.0	Largo
B	5.6	34.3	34.3	40.6	4.9	6.9	Adyacente
B	5.6	34.3	34.3	40.6	7.5	0.0	Largo
B	5.6	34.3	34.3	40.6	7.7	1.6	Adyacente
B	5.6	46.7	26.7	25.4	0.0	5.1	Ancho
B	5.6	46.7	26.7	25.4	0.0	6.5	Ancho
B	5.6	46.7	26.7	25.4	1.1	0.7	Adyacente
B	5.6	46.7	26.7	25.4	2.6	4.9	Adyacente
B	5.6	46.7	26.7	25.4	3.0	0.0	Largo
B	5.6	46.7	26.7	25.4	7.3	0.0	Largo
B	5.6	61.0	25.4	50.8	0.0	1.6	Ancho
B	5.6	61.0	25.4	50.8	0.0	6.3	Ancho
B	5.6	61.0	25.4	50.8	1.2	5.5	Adyacente
B	5.6	61.0	25.4	50.8	2.4	0.0	Largo
B	5.6	61.0	25.4	50.8	4.1	2.9	Adyacente
B	5.6	61.0	25.4	50.8	6.1	0.0	Largo
B	5.6	61.0	49.5	50.8	0.0	1.0	Ancho
B	5.6	61.0	49.5	50.8	0.0	5.9	Ancho
B	5.6	61.0	49.5	50.8	0.6	0.0	Largo
B	5.6	61.0	49.5	50.8	0.7	8.1	Adyacente
B	5.6	61.0	49.5	50.8	8.1	0.6	Adyacente
B	5.6	61.0	49.5	50.8	8.3	0.0	Largo
B	5.6	52.1	50.8	25.4	0.0	4.7	Ancho
B	5.6	52.1	50.8	25.4	0.0	8.3	Ancho
B	5.6	52.1	50.8	25.4	1.4	2.3	Adyacente
B	5.6	52.1	50.8	25.4	3.6	3.9	Adyacente
B	5.6	52.1	50.8	25.4	4.8	0.0	Largo
B	5.6	52.1	50.8	25.4	7.1	0.0	Largo
C	7.7	25.4	25.4	25.4	0.0	1.3	Ancho
C	7.7	25.4	25.4	25.4	0.0	7.9	Ancho
C	7.7	25.4	25.4	25.4	0.8	3.6	Adyacente
C	7.7	25.4	25.4	25.4	2.1	0.0	Largo
C	7.7	25.4	25.4	25.4	6.5	0.8	Adyacente
C	7.7	25.4	25.4	25.4	7.9	0.0	Largo
C	7.7	41.4	25.4	41.9	0.0	2.3	Ancho
C	7.7	41.4	25.4	41.9	0.0	5.3	Ancho
C	7.7	41.4	25.4	41.9	3.2	0.0	Largo
C	7.7	41.4	25.4	41.9	3.4	7.3	Adyacente
C	7.7	41.4	25.4	41.9	5.2	4.7	Adyacente
C	7.7	41.4	25.4	41.9	5.4	0.0	Largo
C	7.7	41.4	40.6	50.8	0.0	2.9	Ancho
C	7.7	41.4	40.6	50.8	0.0	7.4	Ancho
C	7.7	41.4	40.6	50.8	4.4	0.0	Largo

Tabla 3. Características de las cajas a estudiar en las pruebas BCT, obtenidas del diseño de experimentos realizado por el laboratorio (parte 2). Fuente: elaboración propia

Flauta	ECT (kN/m)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Voladizo Largo (cm)	Voladizo Ancho (cm)	Lado
C	7.7	41.4	40.6	50.8	6.0	3.5	Adyacente
C	7.7	41.4	40.6	50.8	6.3	0.0	Largo
C	7.7	41.4	40.6	50.8	7.1	7.5	Adyacente
C	7.7	61.0	25.4	30.5	0.0	3.8	Ancho
C	7.7	61.0	25.4	30.5	0.0	5.6	Ancho
C	7.7	61.0	25.4	30.5	1.1	0.0	Largo
C	7.7	61.0	25.4	30.5	1.9	4.2	Adyacente
C	7.7	61.0	25.4	30.5	2.4	1.8	Adyacente
C	7.7	61.0	25.4	30.5	6.9	0.0	Largo
C	7.7	61.0	40.6	38.1	0.0	2.6	Ancho
C	7.7	61.0	40.6	38.1	0.0	6.1	Ancho
C	7.7	61.0	40.6	38.1	1.4	0.0	Largo
C	7.7	61.0	40.6	38.1	2.2	6.4	Adyacente
C	7.7	61.0	40.6	38.1	5.9	0.0	Largo
C	7.7	61.0	40.6	38.1	7.4	5.3	Adyacente
C	10.7	25.4	25.4	50.8	0.0	0.6	Ancho
C	10.7	25.4	25.4	50.8	0.0	7.7	Ancho
C	10.7	25.4	25.4	50.8	1.7	7.7	Adyacente
C	10.7	25.4	25.4	50.8	5.1	0.0	Largo
C	10.7	25.4	25.4	50.8	5.4	2.1	Adyacente
C	10.7	25.4	25.4	50.8	6.7	0.0	Largo
C	10.7	39.6	39.4	31.8	0.0	3.1	Ancho
C	10.7	39.6	39.4	31.8	0.0	7.2	Ancho
C	10.7	39.6	39.4	31.8	1.8	0.0	Largo
C	10.7	39.6	39.4	31.8	3.1	1.0	Adyacente
C	10.7	39.6	39.4	31.8	6.5	0.0	Largo
C	10.7	39.6	39.4	31.8	8.2	8.2	Adyacente
C	10.7	50.3	29.2	50.8	0.0	4.4	Ancho
C	10.7	50.3	29.2	50.8	0.0	5.5	Ancho
C	10.7	50.3	29.2	50.8	2.7	0.0	Largo
C	10.7	50.3	29.2	50.8	7.0	2.5	Adyacente
C	10.7	50.3	29.2	50.8	8.0	6.7	Adyacente
C	10.7	50.3	29.2	50.8	8.1	0.0	Largo
C	10.7	61.0	45.7	25.4	0.0	4.1	Ancho
C	10.7	61.0	45.7	25.4	0.0	8.1	Ancho
C	10.7	61.0	45.7	25.4	3.8	0.0	Largo
C	10.7	61.0	45.7	25.4	4.6	1.2	Adyacente
C	10.7	61.0	45.7	25.4	5.6	8.0	Adyacente
C	10.7	61.0	45.7	25.4	5.7	0.0	Largo
C	10.7	52.1	50.8	47.0	0.0	2.0	Ancho
C	10.7	52.1	50.8	47.0	0.0	7.0	Ancho
C	10.7	52.1	50.8	47.0	4.1	0.0	Largo
C	10.7	52.1	50.8	47.0	4.5	5.7	Adyacente
C	10.7	52.1	50.8	47.0	6.3	6.1	Adyacente
C	10.7	52.1	50.8	47.0	7.7	0.0	Largo

Las pruebas se llevaron a cabo dentro de una cámara de ambiente controlado Conviron CMP5000 (Figura 18) la cual, entre otras funciones, tiene la capacidad de controlar tanto la temperatura como la humedad en su interior. Debido al espacio reducido dentro de la cámara, se llevaron diferentes tipos de cajas en distintos grupos a lo largo de todo el proceso del experimento y se colocaron en estantes de manera que existiese una separación adecuada para un correcto acondicionamiento del material. Cada proceso de acondicionamiento contó con dos etapas, pre-acondicionado y acondicionado, las cuales fueron realizadas cada vez que ingresó una nueva carga de material a la cámara.



Figura 18. Cámara de ambiente controlado Conviron CMP5000. Fuente: elaboración propia

El acondicionamiento de los materiales se llevó a cabo de acuerdo con la norma TAPPI T 402 sp-13 (TAPPI, 2013b), la cual nos indica que se deben pre-acondicionar las muestras por al menos veinticuatro horas, a una temperatura entre 22-40°C y una humedad relativa entre 10-35%. Por lo que se establecieron 30°C y 20% HR como las condiciones base de pre-acondicionado para el presente proyecto. Ahora, una vez transcurrido este periodo, se ajustó la temperatura a $23,0 \pm 1,0$ °C y la humedad a $50,0 \pm 2,0\%$ HR para asegurar la atmósfera de acondicionamiento durante otras veinticuatro horas. Una vez

transcurrido este tiempo, se pueden llevar a cabo las pruebas bajo las últimas condiciones atmosféricas establecidas (TAPPI, 2013b).

Para realizar la prueba, se utiliza el equipo llamado Lansmont Squeezer (Figura 19), el cual tiene la capacidad de admitir muestras de hasta 91,4 cm de alto, 76,2 cm de largo y 76,2 cm de ancho; debido a las placas paralelas de aluminio con las que cuenta. Además, está equipado con una celda de carga que puede medir hasta 5000 lb o 2224 N. Asimismo, se utilizaron dos bloques de madera de 50,8cm x 38,1cm x 5,08cm y 63,5cm x 52cm x 3,8cm para simular la presencia de las tarimas, pero evitando las alteraciones en los resultados que puedan ser causadas por zonas sin material o la flexión de las tablas que las componen.



Figura 19. Lansmont Squeezer. Fuente: elaboración propia

Una vez terminado el proceso de acondicionamiento, se tomó cada caja del estante y se procedió a armarlas respetando el diseño del fabricante. Para esto, se unieron las tapas con pegamento caliente, por lo cual no se probaron inmediatamente después de armarlas, si no que se consideró un periodo de reposo. Si bien los lados de la caja son los que soportan la carga y no las tapas, esta fijación permite que la forma del empaque se mantenga a lo largo

de la prueba, evitando deslizamientos y, por ende, inconsistencias en los resultados (TAPPI, 2020).

Una vez pasado este tiempo, se colocó la caja en el equipo de pruebas con la correspondiente configuración de voladizo que se requiere. Las configuraciones de voladizo se midieron de manera perpendicular al largo (length overhang), perpendicular al ancho (width overhang), la combinación de ambos (adjacent) o sin voladizo (no overhang). Para configurar la medida de voladizo requerida para cada prueba, se utilizaron dos guías ajustables (Figura 20), a las cuales se les establecía su medida por medio de un calibrador digital Mitutoyo 500-196-30.



Figura 20. Guías utilizadas para ajustar la configuración de voladizo requerida.

Fuente: Elaboración propia

Una vez terminada la configuración del voladizo, se retiran las guías y se procede a accionar el inicio de la prueba. Para esto, la placa superior inicia un descenso a una velocidad constante de $13,0 \pm 2,5$ mm/min hasta que se genere un fallo visible en la caja (TAPPI, 2020). A continuación, se exportaron los datos obtenidos a una computadora donde se extrajo la mayor fuerza registrada durante la prueba; considerada la mayor fuerza de compresión soportada por la caja en ese escenario en específico.

Es importante recalcar que, para admitir un resultado como válido, se midió el contenido de agua de las cajas puestas a prueba, el cual debió ser $7 \pm 0,5\%$; en caso de no ser así, el resultado de la fuerza de compresión se descartó y se realizó una nueva prueba.

Para medir el contenido de humedad, se utilizó el Cole-Parmer MP-40 Moisture Balance, en el cual se coloca una pequeña sección de la caja probada y la calienta hasta que se evapore el agua contenida; determinando el contenido de agua por medio del cálculo establecido por la norma ASTM D4442-20 (ASTM, 2020b):

$$MC\% = \frac{A-B}{B} \times 100 \quad (3.2)$$

donde;

MC%: es el contenido de agua expresado en porcentaje (%)

A: es la masa original medida en gramos (g)

B: es la masa después de la evaporación del agua contenida (g)

Asimismo, se mantuvo un coeficiente de variación entre las diez repeticiones de cada prueba por debajo del 10%, con el propósito de reducir la influencia de factores externos a la prueba, como lo son la unión del fabricante, el proceso de unión de las tapas de la caja, errores de configuración de voladizo, entre otros.

$$CoV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (3.3)$$

donde;

CoV: es el coeficiente de variación

s: es la desviación estándar

\bar{x} : es el promedio de los resultados

Una vez obtenida una cantidad representativa de resultados, se procedió a construir un modelo estadístico con el software estadístico JMP donde, inicialmente, se revisaron las

distintas tendencias observadas en el proceso a través de la construcción de gráficas que demostraran la influencia de las variables en la resistencia a la compresión de las cajas.

Los datos fueron analizados tomando como referencia el promedio de las diez pruebas realizadas a cada uno de los tipos de caja sin la presencia del voladizo, este valor corresponde al cien por ciento de la carga soportada. Ahora, con los resultados de los escenarios con presencia de voladizo, se calculó el porcentaje restante de la resistencia a la compresión medido en cada prueba de la siguiente forma:

$$\%BCT_{restante} = \frac{BCT_{sin\ voladizo}}{BCT_{con\ voladizo}} \times 100\% \quad (3.4)$$

Este porcentaje restante, es el considerado como la variable dependiente del estudio, es decir, el resultado que se quiere predecir con los modelos estadísticos realizados. Para esto, se realizaron y compararon tres análisis, cada uno con su modelo correspondiente.

Para el primer análisis, se decidió incluir cada una de las repeticiones de los escenarios propuestos para la etapa actual del proyecto, y así obtener las gráficas y posteriormente generar el modelo estadístico.

En su segunda versión, se decidió tomar en cuenta tanto los datos obtenidos en la etapa actual como en la etapa uno del proyecto, la cual fue desarrollada por (Kim, et al., 2023). Esto, con el propósito de incluir mayor cantidad de escenarios y mejorar la robustez del modelo.

Para el tercer modelo, se tomaron los datos de la fase anterior, pero, en lugar de incluir las diez repeticiones de cada escenario, se decidió obtener el promedio de cada uno y posteriormente analizar su comportamiento y generar un modelo de regresión lineal.

Una vez obtenidos los tres modelos, se compararon a través de indicadores de calidad como el coeficiente de determinación para señalar cuál de estos genera una predicción más confiable.

3.4 Simulación COMSOL

Finalmente, en relación con el objetivo específico 4, se plantea una simulación de elemento finito por medio del software COMSOL Multiphysics y comparar sus resultados con los obtenidos de manera práctica y, así, evaluar si el programa se puede utilizar como una herramienta alternativa a las pruebas físicas; en casos como que no se tenga acceso a los equipos especializados y certificados. Para esto, se realizó un sólido en el software SolidWorks que cumplió con las dimensiones reales del corrugado, en lo que respecta a espesor general, distancia entre crestas y espesor del material (Figura 21). Cabe aclarar que, el diseño generado cuenta con las dimensiones mínimas requeridas para el desarrollo del análisis por elemento finito, con el propósito de que este sirva como base para futuras investigaciones, para que estas puedan escalar la simulación y obtener resultados detallados.

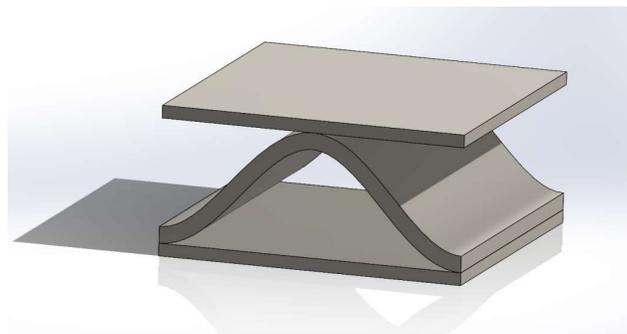


Figura 21. Sólido realizado en el software SolidWorks para su posterior importación en COMSOL.

El acceso al software se dio a través del personal de la Escuela de Ciencias e Ingeniería de los materiales del Tecnológico de Costa Rica, el cual generó la posibilidad de acceder de forma remota a las computadoras equipadas con el programa.

Debido a que el software COMSOL Multiphysics no incluye materiales corrugados dentro de su librería, se decidió definirlo basado en las propiedades que se presentan en la publicación “Estimation of the Compressive Strength of Cardboard Boxes” (Mrowczynski, Gajewski, Pospiech, & Garbowski, 2024) para corrugados de flauta B y C; las cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades utilizadas en las simulaciones en COMSOL Multiphysics. Fuente: (Mrowczynski, Gajewski, Pospiech, & Garbowski, 2024)

Flauta	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	ν_{12}
B	2317	969	0.46
C	1420	833	0.39

Una vez ingresadas las propiedades, se estableció el canto inferior como una constante fija y se agregó al canto superior (Figura 22) un desplazamiento prescrito que generase un ocho por ciento de deformación, a un avance de 0,005mm por paso.

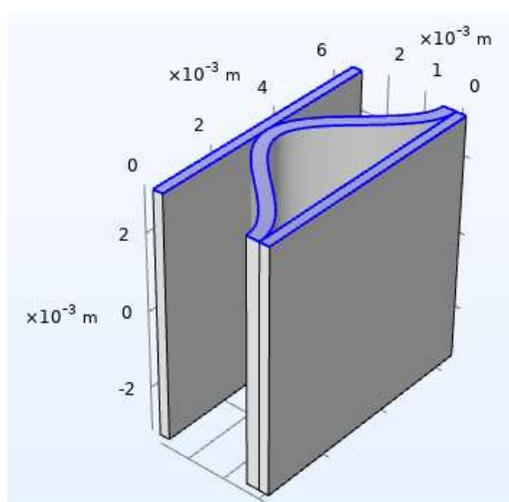


Figura 22. Canto desde el cual se generará el desplazamiento prescrito. Fuente: elaboración propia en el software COMSOL.

Seguidamente se procedió a realizar la malla correspondiente, primero se realizó en la cara inferior y se hizo un barrido en dirección Z^+ . A continuación, se evaluó calidad de la malla, tal y como se observa en la Figura 23. Una vez establecidos estos parámetros, se generó el estudio.

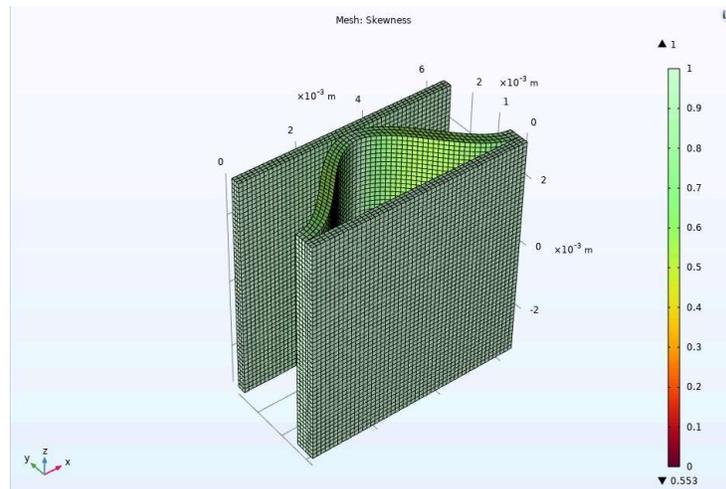


Figura 23. Análisis de simetría de la malla a estudiar, donde más cercano a uno, mejor es su calidad. Fuente: elaboración propia en el software COMSOL.

4 Resultados

4.1 Pruebas de compresión

Al realizar las pruebas de compresión, se obtuvo dos tipos de resultados: válidos y no válidos. Los resultados no válidos se caracterizaron por fallar en los cantos (Figura 24), las zonas que fueron reforzadas con cera, generando un descenso irregular en los valores de fuerza medidos una vez alcanzado el punto máximo (Gráfico 1). Este tipo de resultado pudo haberse generado debido a una mala absorción de la cera por parte del material, ya sea porque el tiempo que estuvo sumergido no fue el correcto o la temperatura a la que se realizó el proceso no era la adecuada (TAPPI, 2017).



Figura 24. Muestra sometida a la prueba ECT con resultado no válido.

Fuente: elaboración propia

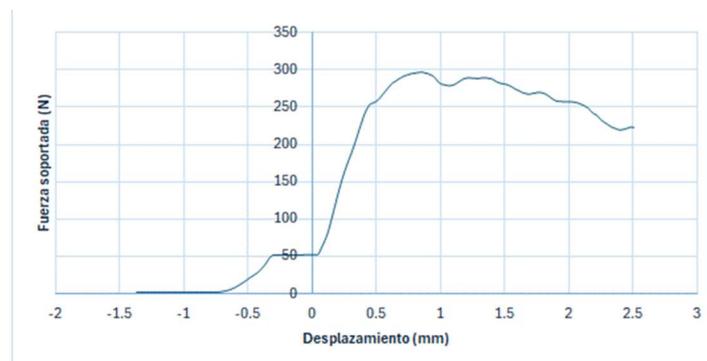


Gráfico 1. Comportamiento de un resultado no válido de la prueba ECT.

Fuente: elaboración propia.

Ahora, en los resultados válidos se obtuvo un fallo en el centro de la probeta, el cual no estaba reforzado con cera, como se muestra Figura 25. Esto generó el Gráfico 2 donde, una vez alcanzada la fuerza máxima soportada por el material, la lectura cae precipitadamente.

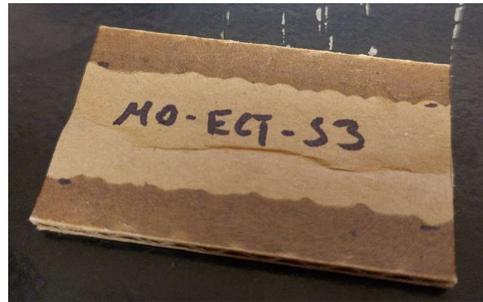


Figura 25. Muestra sometida a la prueba ECT tras un resultado válido.

Fuente: elaboración propia

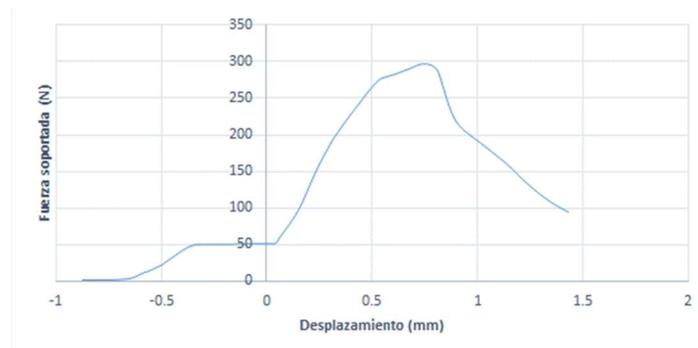


Gráfico 2. Comportamiento de un resultado válido de la prueba ECT. Fuente: elaboración propia.

Tras la realización de las diez pruebas tanto para el corrugado de flauta B (Figura 3) como flauta C (Figura 4), fue posible obtener el valor promedio de la mayor fuerza soportada por unidad lineal de cada material, con su respectiva desviación estándar y coeficiente de variación.

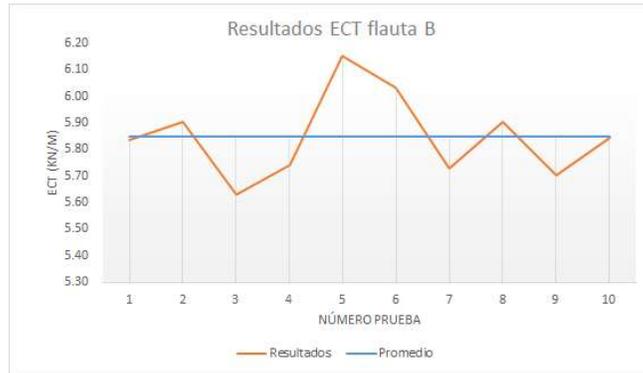


Gráfico 3. Resultados obtenidos en las pruebas ECT aplicadas a corrugado con flauta tipo B.

Fuente: elaboración propia.

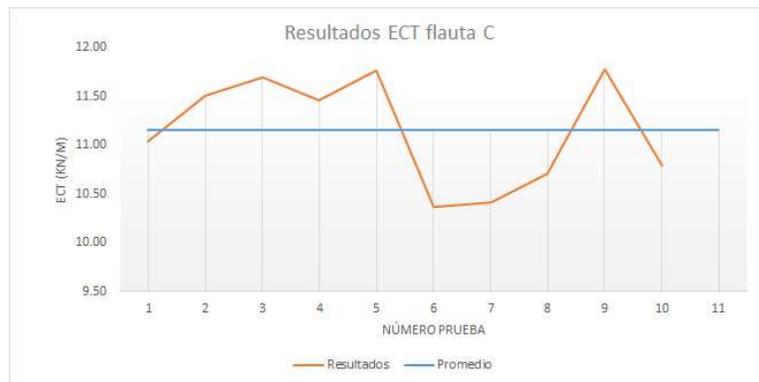


Gráfico 4. Resultados obtenidos en las pruebas ECT aplicadas a corrugado con flauta tipo C.

Fuente: elaboración propia.

4.2 Prueba de flexión a 4 puntos

Para cada uno de los materiales, se realizó cinco repeticiones de las pruebas de flexión para cada material, las cuales se dividieron entre las direcciones MD, CD y las caras interna y externa para cada una; y así tener un registro completo del comportamiento del material bajo este tipo de cargas. A continuación, en los gráficos 5, 6 y 7 se puede observar el comportamiento de los resultados obtenidos en las pruebas aplicadas al material de flauta tipo B:

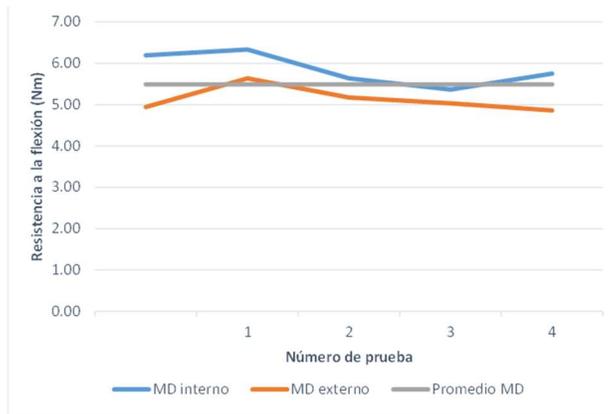


Gráfico 5. Resultados obtenidos en las caras internas y externas de las pruebas de flexión a cuatro puntos en dirección MD del corrugado con flauta tipo B. Fuente: elaboración propia

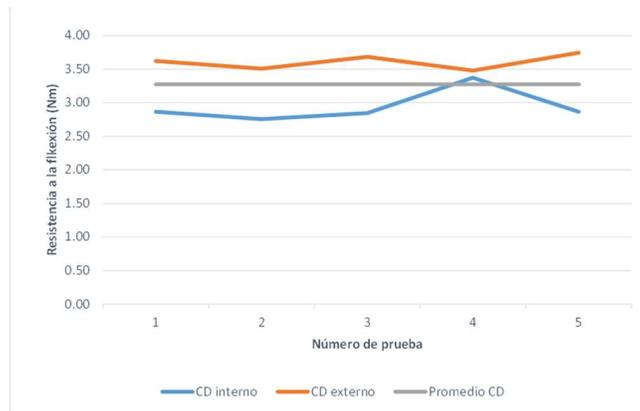


Gráfico 7. Resultados obtenidos en las caras internas y externas de las pruebas de flexión a cuatro puntos en dirección CD del corrugado con flauta tipo B. Fuente: elaboración propia

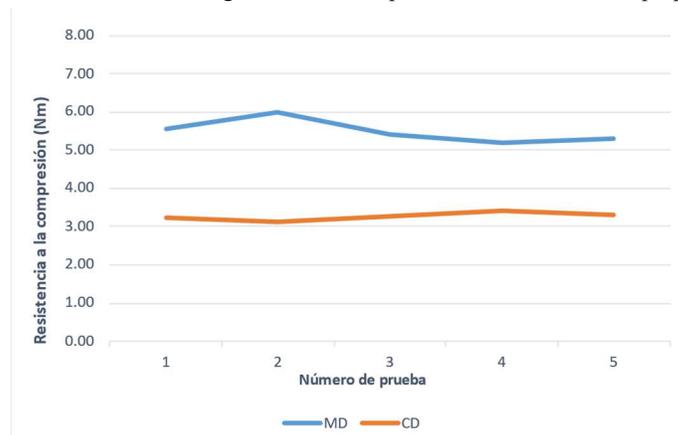


Gráfico 6. Comparación resultados obtenidos en las caras internas y externas de las pruebas de flexión a cuatro puntos del corrugado con flauta tipo B. Fuente: elaboración propia

Ahora, en los Gráficos 8, 9 y 10 se presenta un resumen del comportamiento observado en el corrugado tipo flauta C:

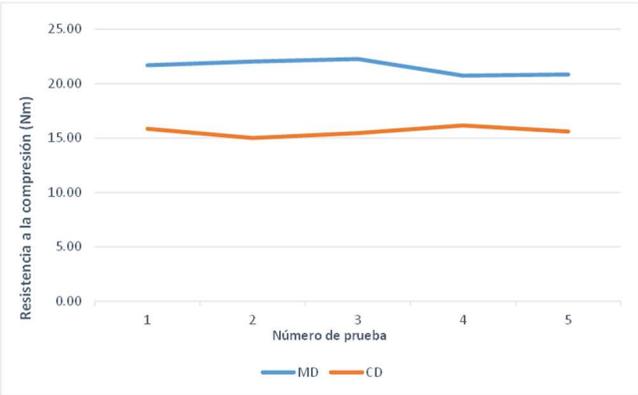


Gráfico 8. Resultados obtenidos en la prueba de flexión a cuatro puntos del corrugado con flauta tipo C en ambas direcciones. Fuente: elaboración propia

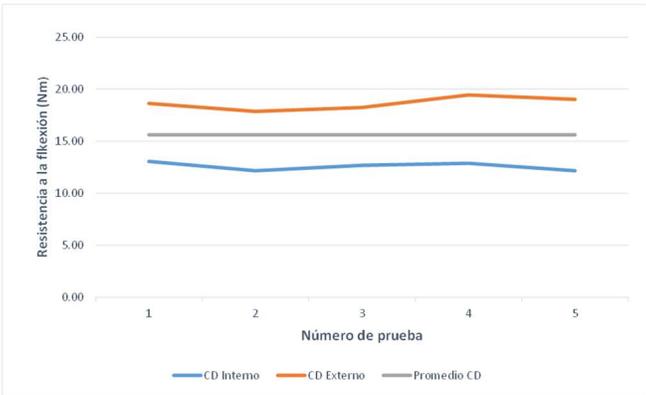


Gráfico 9. Resultados obtenidos en las caras internas y externas de las pruebas de flexión a cuatro puntos en dirección CD del corrugado con flauta tipo C. Fuente: elaboración propia

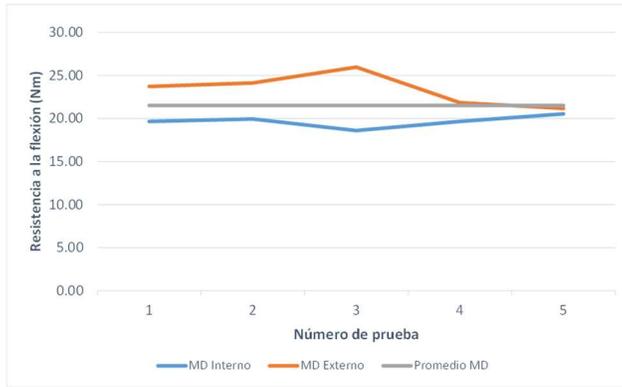


Gráfico 10. Comparación resultados obtenidos en las caras internas y externas de las pruebas de flexión a cuatro puntos en dirección MD del corrugado con flauta tipo C. Fuente: elaboración propia

4.3 Modelo estadístico

Inicialmente, se compararon los datos obtenidos en cada una de las diez repeticiones realizadas de los distintos escenarios. Acá, se observan las primeras señales de la pérdida de capacidad de carga conforme aumenta el perímetro en voladizo; tal y como se observa en el Gráfico 11.

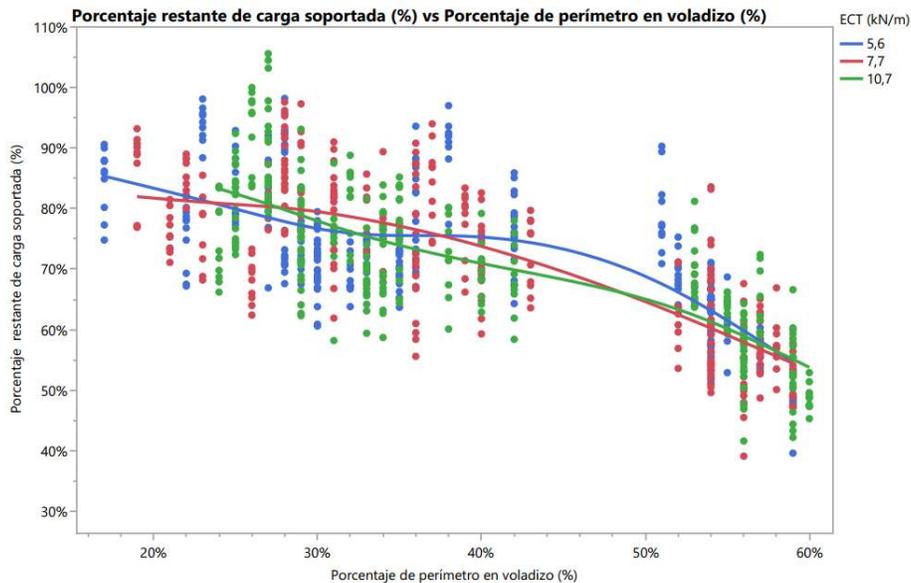


Gráfico 11. Comportamiento de las cajas de corrugado debido a la presencia de voladizo. Fuente: elaboración propia en el software JMP.

Con este primer grupo de datos, se genera el primer modelo estadístico, aplicando regresión lineal por medio de cuadrados mínimos por medio del software JMP. En este análisis, se obtiene un modelo aceptable, donde se cuenta con un $R^2 = 0,77$, el cual indica la relación entre los datos reales y los obtenidos por medio del pronóstico; generando un punto de referencia para los siguientes análisis. Es importante mencionar que, debido al tamaño de la expresión y la cantidad de datos obtenidos, los resultados completos se encuentran en los Anexos de este documento; sin embargo, en el Gráfico 12 se encuentra la comparación de los datos predichos contra los obtenidos de manera práctica.

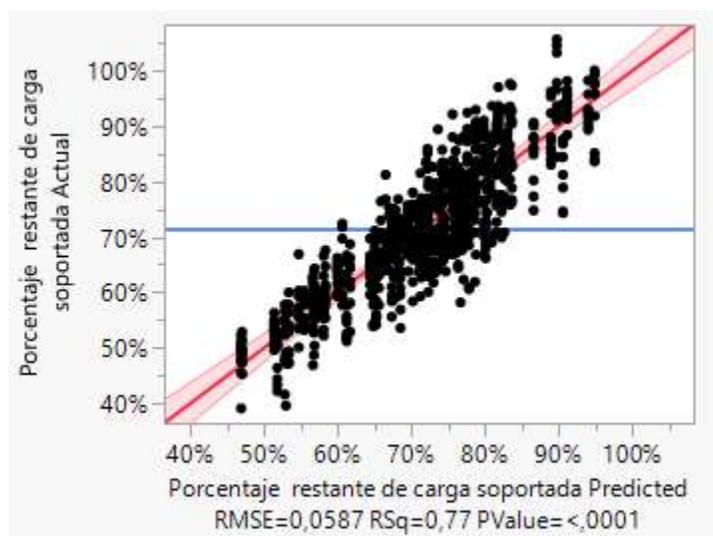


Gráfico 12. Comparación de los datos predichos (abscisas) con el modelo contra los obtenidos de manera experimental (ordenadas). Fuente: elaboración propia con el software JMP.

Ahora, para el segundo análisis, se tomaron los datos tanto de la fase actual (Fase 2) como los obtenidos en la fase realizada por (Kim, et al., 2023), considerada como la primera fase de esta investigación. En esta primera fase, se utilizó otro tipo de corrugado como el de pared doble con flauta BC y ECT de 8,4kN/m. Con este nuevo grupo de datos, se observó el mismo tipo de comportamiento que en el análisis anterior, resaltando la disminución de la

resistencia a la compresión conforme aumenta la porción de la caja que se encuentra en voladizo; tal y como se muestra en Gráfico 14.

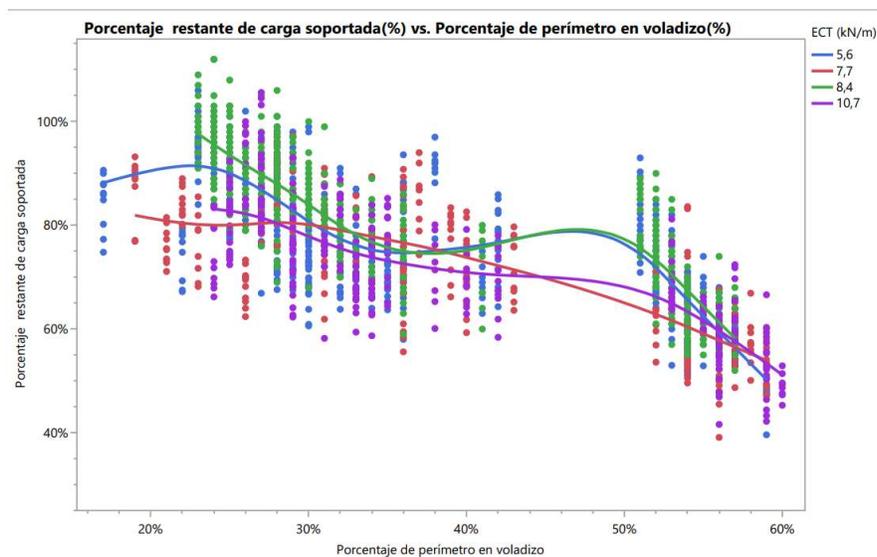


Gráfico 14. Comportamiento de las cajas de corrugado debido a la presencia de voladizo (datos de fase uno y dos). Fuente: elaboración propia en el software JMP.

De igual forma, se procedió a realizar un modelo estadístico por medio de regresión líneas de mínimos cuadrados, el cual muestra una mayor confiabilidad debido a su $R^2 = 0,83$. Este puede observarse en el Gráfico 13.

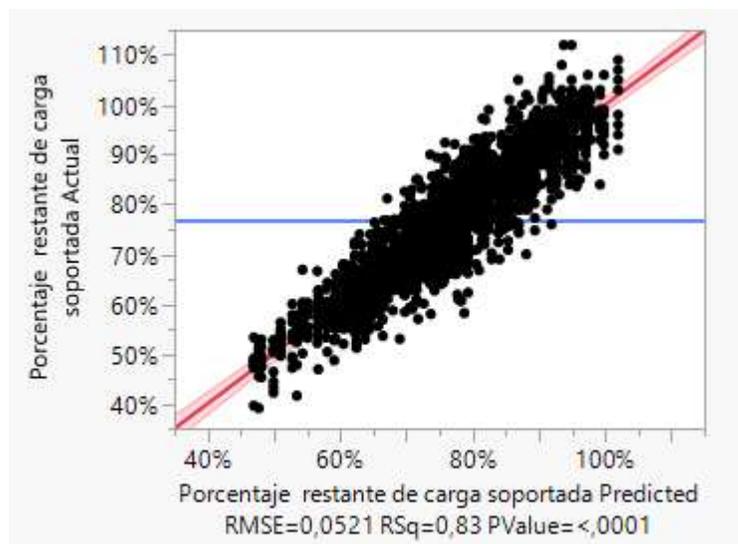


Gráfico 13. Comparación de los datos predichos con el modelo (abscisas) contra los obtenidos de manera experimental (ordenadas) al utilizar los datos de ambas fases. Fuente: elaboración propia con el software JMP.

Finalmente, generó un último modelo en el cual también se incluyeron ambas fases, pero con la característica de que, en lugar de comparar individualmente cada uno de los datos, se calculó el promedio de las diez repeticiones para cada escenario. De igual forma, se comparó el promedio de cada escenario con presencia de voladizo contra el respectivo caso sin este para determinar la disminución en la resistencia a la compresión. Asimismo, por medio de un gráfico se pudo observar el comportamiento de las diferentes calidades de corrugado (ECT) ante diferentes configuraciones de voladizo.

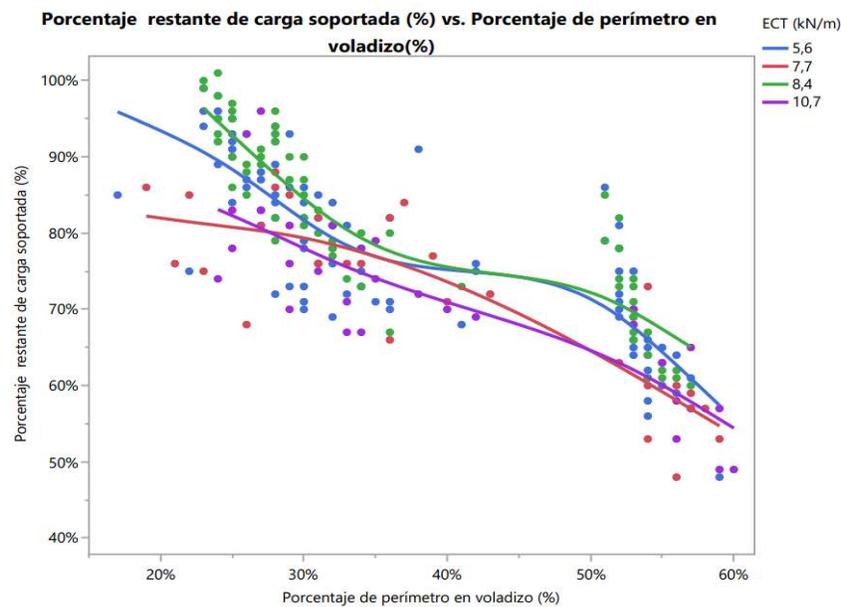


Gráfico 15. Comportamiento de las cajas de corrugado debido a la presencia de voladizo (datos de fase uno y dos) con los datos agrupados por escenario. Fuente: elaboración propia en el software JMP.

Al igual que en los casos anteriores, se realizó un modelo estadístico el cual generó la mejor confiabilidad de los tres modelos, con $R^2=0,93$, indicando la cercanía de los datos predichos con el modelo a los valores reales obtenidos de manera práctica. Esta comparación podemos observarla en Gráfico 16.

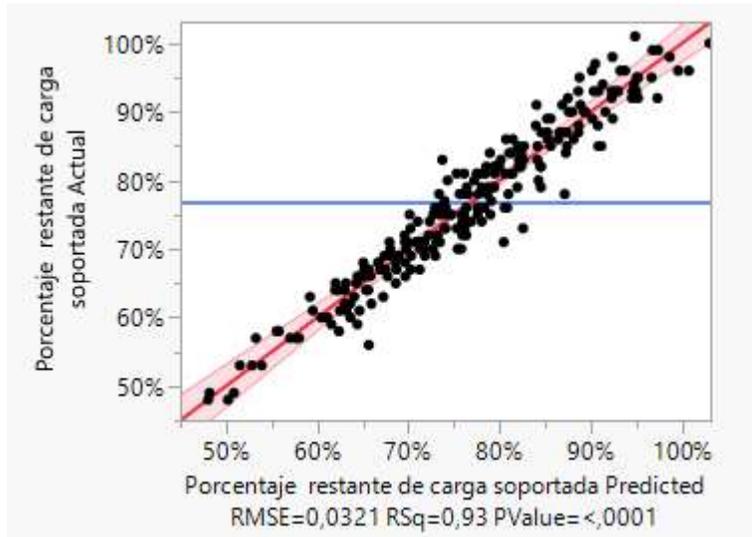


Gráfico 16.Comparación de los datos predichos con el tercer modelo (abscisas) contra los obtenidos de manera experimental (ordenadas). Fuente: elaboración propia con el software JMP.

A continuación, se presenta la ecuación (4.1) que describe el tercer modelo estadístico:

$$\begin{aligned}
 \%BCT_{Restante} = & 0.899455433376954 + 0.000958338313684072 * \\
 & Largo (cm) + 0.000591973686188154 * Ancho (cm) + \\
 & -0.00513501146712529 * Alto (cm) + -0.0325352649797044 * \\
 & Voladizo en largo(cm) + -0.0331190018780567 * Voladizo en Ancho (cm) + \\
 & -0.0000786609224985417 * (Alto (cm) - 30.4695041322314) * (Largo (cm) - \\
 & 46.406429752066) + 0.000317753490319685 * (Alto (cm) - \\
 & 30.4695041322314) * (Alto (cm) - 30.4695041322314) + \\
 & 0.0116405281739638 * (Voladizo en largo(cm) - 2.31030811272438) * \\
 & (Voladizo en largo(cm) - 2.31030811272438) + 0.00167554328402539 * \\
 & (Voladizo en Ancho (cm) - 2.36631904010072) * (Voladizo en largo(cm) - \\
 & 2.31030811272438) + 0.00820729122389887 * (Voladizo en Ancho (cm) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 2.36631904010072) * (Voladizo en Ancho (cm) - 2.36631904010072) + \\
& -0.00344089456913519 * (Voladizo en largo(cm) - 2.31030811272438) * \\
& (Voladizo en largo(cm) - 2.31030811272438) * (Voladizo en largo(cm) - \\
& 2.31030811272438) + -0.00120471647919915 * (Voladizo en Ancho (cm) - \\
& 2.36631904010072) * (Voladizo en Ancho (cm) - 2.36631904010072) * \\
& (Voladizo en Ancho (cm) - 2.36631904010072) + 0.000338287593997024 * \\
& (Voladizo en largo(cm) - 2.31030811272438) * (Voladizo en largo(cm))^n - \\
& 2.31030811272438) * (Voladizo en largo(cm) - 2.31030811272438) * \\
& (Voladizo en largo(cm) - 2.31030811272438)
\end{aligned}$$

Asimismo, el análisis realizado en el software JMP permite observar el efecto que tienen cada una de las variables en el desempeño del corrugado en presencia del voladizo. Este explica la influencia de cada variable a través del valor “LogWorth” donde, entre mayor sea, más influencia tendrá en el modelo. Estos valores los podemos observar en la Figura 26.



Figura 26. Representación del efecto de las variables en el modelo estadístico. Fuente: elaboración propia en el software JMP.

4.4 Simulación COMSOL

Tras realizarse la simulación de la prueba de compresión, se obtuvo el mapa de calor de esfuerzos de von Mises. En la Figura 27 se muestra el respectivo al corrugado de flauta B y en la Figura 28 se encuentra el mapa del corrugado de flauta C.

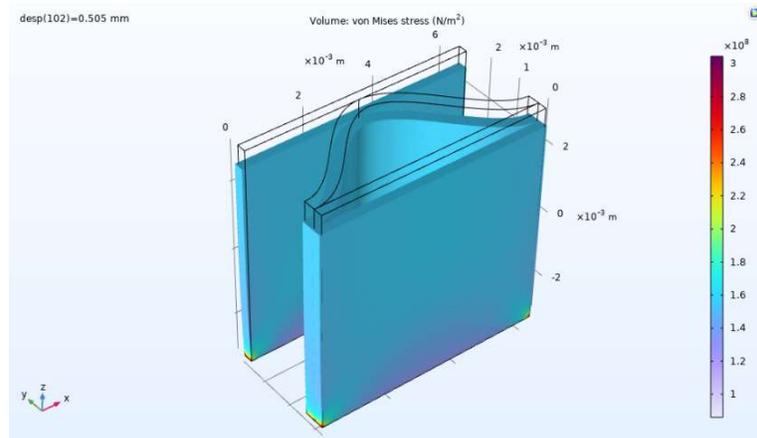


Figura 27. Mapa de calor de esfuerzos de von Mises en corrugado de flauta B. Fuente: elaboración propia.

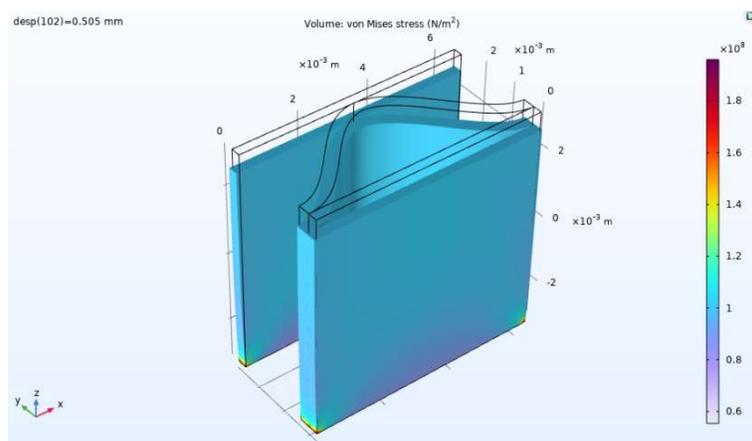


Figura 28. Mapa de calor de esfuerzos de von Mises en corrugado de flauta C. Fuente: elaboración propia.

Seguidamente, se exportaron los datos a una hoja de cálculos para realizar los gráficos de Deformación vs Esfuerzo y los de Desplazamiento vs Fuerza Soportada para cada tipo de corrugado. Estos resultados se muestran en el **Error! Reference source not found.** y el Gráfico 17.

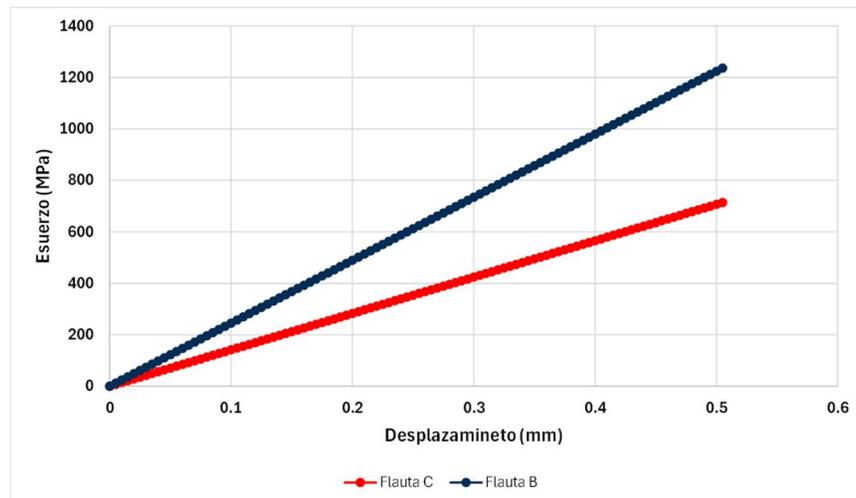


Gráfico 17. Gráfico Fuerza soportada vs Desplazamiento de los corrugados de flauta B y C. Fuente: elaboración propia.

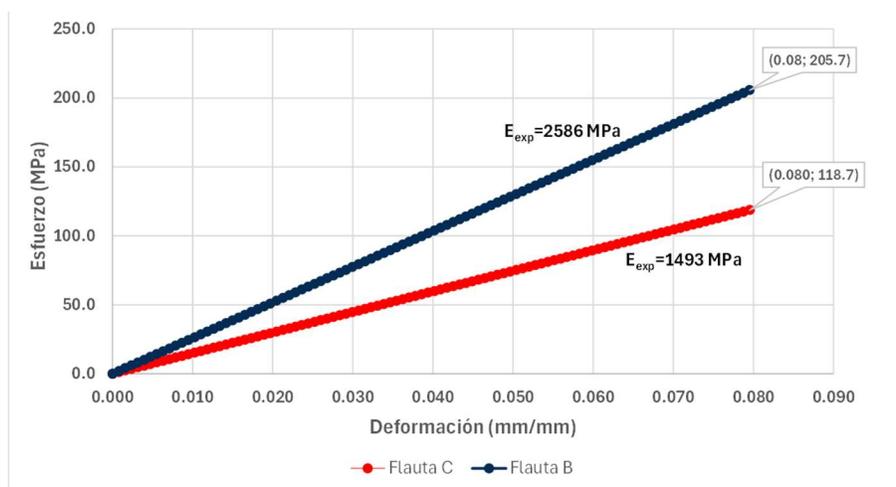


Gráfico 18. Gráfico Esfuerzo vs Deformación de los corrugados de flauta B y flauta C. Fuente: elaboración propia.

5 Discusión

Respecto a las pruebas de compresión, se logra apreciar una tendencia congruente con lo esperado, donde el corrugado tipo C, presenta una mayor resistencia a las fuerzas de compresión por unidad lineal que el corrugado de flauta B. Asimismo, se resalta la importancia de cumplir con lo estipulado en las normas correspondientes para obtener resultados válidos respaldados por coeficientes de desviación aceptables (como se puede observar en el Anexo 9.9.1).

Acerca de las pruebas de flexión realizadas, se resalta la importancia de estudiar el material tanto en las direcciones MD y CD, como en sus caras internas y externas para obtener un panorama completo del comportamiento del material. Esto, debido a que, tanto en el corrugado de flauta tipo B como C, se apreciaron diferentes comportamientos según la configuración establecida. Si bien la diferencia entre los comportamientos de las direcciones MD y CD pueden ser más intuitivos, debido a la diferencia en la dirección de las flautas, los resultados respaldan la influencia que puede tener la calidad del liner (si es para el interior o exterior del empaque) en su resistencia a la flexión; tal y como se lo indica la norma TAPPI (TAPPI, 2013a).

Respecto al modelo estadístico y en conjunto con las pruebas realizadas, se comprobó la hipótesis acerca de la existencia del efecto del voladizo sobre la capacidad de resistir la compresión de las cajas. Asimismo, por medio de los modelos de regresión lineal, se determina que este fenómeno se ve influenciado no solo por la porción de la caja que está en

voladizo, sino también por variables como lo son las dimensiones de la caja, el ECT y sus interacciones. Esto abre camino a pronósticos cada vez más acertados, que permitan generar una visión completa de la capacidad de las cajas a base de materiales corrugados, evitando fallos no previstos y, por ende, una reducción en las pérdidas debido al daño en los empaques.

A pesar de utilizarse las propiedades mostradas en las publicaciones científicas, el comportamiento observado es distinto al obtenido en las pruebas de compresión del primer objetivo. Por ejemplo, como se observa en el Gráfico 19 los difieren respecto al comportamiento plástico del material. Esto puede deberse a que el ECT de los materiales reportados en la publicación era diferente los utilizados en las pruebas para este proyecto, por lo cual sería necesaria más información para realizar una comparación adecuada entre ambos escenarios. Sin embargo, en el Gráfico 20, donde se muestra el caso del corrugado con flauta tipo B, el comportamiento de las gráficas es lo suficientemente cercano como para indicar que se sigue un buen camino, y que futuras investigaciones puedan continuar con su desarrollo.

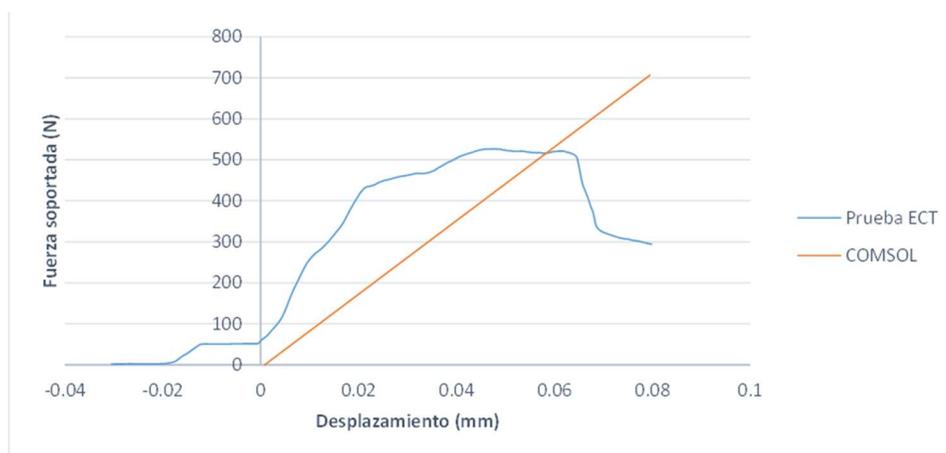


Gráfico 19. Comparación entre el comportamiento obtenidos para Flauta C en el software COMSOL y los realizados en el laboratorio de Virginia Tech. Fuente: elaboración propia

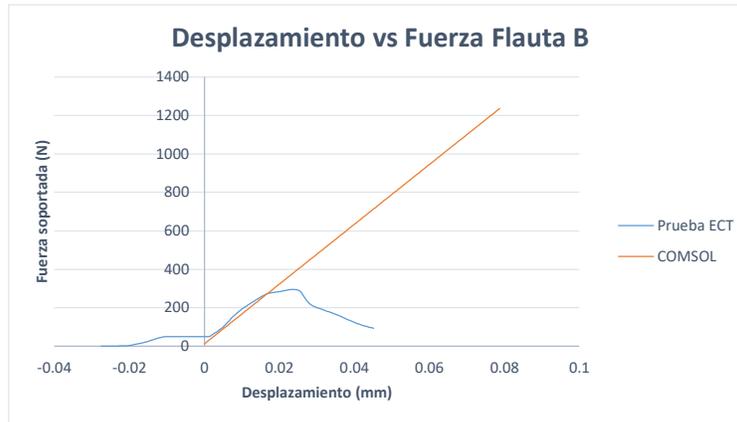


Gráfico 20. Comparación entre el comportamiento obtenido para la flauta B en el software COMSOL y los realizados en el laboratorio de Virginia Tech. Fuente: elaboración propia

6 Conclusiones

A pesar de que el análisis del material corrugado se complica debido a que está conformado por distintas capas, el modelo estadístico demostró que cuenta con la capacidad de predecir el fenómeno de voladizo en empaques y su efecto en el BCT de las cajas. Asimismo, a pesar de que la ecuación que describe el modelo tiene un tamaño constate, fue posible reducir su dependencia a las dimensiones de la caja, el ECT y la dimensión del voladizo.

Finalmente, si bien las pruebas de compresión y flexión permitieron como las diferentes calidades de material corrugado se comportan ante distintos tipos de cargas, aún es necesario recolectar más información para así trasladar este conocimiento a un software de simulación. Esto, invita a generar nuevas investigaciones que permitan un entendimiento integral de los materiales corrugados.

7 Recomendaciones

Si bien para las pruebas se contó con diferentes calidades, tipos y tamaños de cajas, se recomienda tanto para las pruebas ECT, flexión y BCT ampliar la cantidad de materiales en aspectos como más allá de pared simple, tipos de flauta que no se han estudiado, e inclusive, el efecto de procedimientos como la impermeabilización en las propiedades del material.

Asimismo, se recomienda la implementación de dispositivos que permitan monitorear en tiempo real las condiciones de la cámara de ambiente controlado y generar alarmas cuando estas se salen de los rangos establecidos. Esto, para reducir el tiempo de respuesta fallas y evitar que los materiales pierdan su acondicionamiento.

Finalmente, acerca de las simulaciones en COMSOL, se recomienda expandir la base de datos de las propiedades de las diferentes variantes de corrugado, con el propósito de que los análisis por medio de software se acerquen cada vez más a los resultados reales.

8 Bibliografía

- Ait-Oubahou, A., Hanani, Z. N., & Jamilah, B. (2019). Packaging. (pp. 375–399). In Elsevier ebooks. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813276-0.00011-0>
- ASTM. (2020a). Determining Compressive Resistance of Shipping Containers, Components, and Unit Loads. *ASTM Standard Test Method D642-20*.
- ASTM. (2020b). Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-based Materials. *ASTM Standard Test Methods D4442-20*.
- ASTM. (2023). Compression Resistance of a Container Under Constant Load. *ASTM Standard Test Method D4577-19*.
- Baker, M., Horvath, L., & White, M. (2016). Effect of Pallet Deckboard Stiffness on Corrugated Box Compression Strength. 29: 263–274 . Packag. Technol. Sci. doi:10.1002/pts.2201
- 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. 174.260-281. Biosystems Engineering. doi:doi:10.1016/j.biosystemseng.2018
- Fibre Box Association. (2018). The Fibre Box Handbook.
- Frank, B. (2013). Corrugated Box Compression—A Literature Survey. 27:105-128. doi:10.1002/pts.2019
- Hibbeler, R. C. (2019). Statics and mechanics of materials. Pearson Educación. Obtenido de <https://www-ebooks7-24-com.ezproxy.itcr.ac.cr/?il=10917>

International Organization for Standardization . (2019). Paper and board: Determination of bending stiffness. *ISO 5628:2019*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/76347.html>

International Organization of Standardization. (2022). Determination of edgewise crush resistance (non-waxed edge method). *ISO 3037:2022*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/80310.html>

Jamsari, M. A., Kueh, C., Gray-Stuart, E., Martinez-Hermosilla, G. A., Dahm, K., & Bronlund, J. E. (2019). A technique to quantify morphological damage of the flute profile in the midplane of corrugated fibreboard. *Packaging Technology and Science*, 32(5), 213–226. doi:10.1002/pts.2431

Kim, S., Horvath, L., Molina, E., Frank, B., Johnson, S., & Johnson, A. (2023). Predicting the effect of pallet overhang on the box compression strength. *Packag Technol Sci.*, 36(11): 927-939. doi:10.1002/pts.2768

McCrea, B. (2020). Annual Pallet Report: 2020's market evaluation. *Modern Materials Handling*. Obtenido de https://www.mmh.com/article/annual_pallet_report_2020s_market_evaluation

Mrowczynski, D., Gajewski, T., Pospiech, M., & Garbowski, T. (2024). Estimation of the Compressive Strength of Cardboard Boxes. doi:10.3390/app14020819

Murphy, P. R. (2018). *Contemporary Logistics*. Pearson.

Real Academia Española. (s.f.). Diccionario de la lengua española. 23.7. Obtenido de <https://dle.rae.es>

- Standardization, I. O. (2019). Paper and board: Determination of bending stiffness. *ISO 5628:2019*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/76347.html>
- TAPPI. (2013a). Bending stiffness, four point method. *TAPPI Test Method T 836 om-13*.
- TAPPI. (2013b). Standard conditioning and test atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products. Obtenido de www.tappi.org
- TAPPI. (2017). Edgewise compressive strength of corrugated fiberboard (short column test). *TAPPI Test Method T 811 om-17*.
- TAPPI. (2020). Compression test of fiberboard shipping containers. *TAPPI/ANSI T 804 om-20*.
- Wohner, B. P. (2019). Packaging-Related Food Losses and Waste: An Overview and Issues. *Sustainability*, 11(1), 264. doi: <https://doi.org/10.3390/su11010264>

9 Anexos

9.1 Resultados de las pruebas de compresión

Tabla 5. Resultados de las pruebas ECT en corrugados con flauta tipo B.

Fuente: elaboración propia

ECT Testing (kN/m)	
1	5.83
2	5.90
3	5.63
4	5.74
5	6.15
6	6.03
7	5.73
8	5.91
9	5.70
10	5.85
Average	5.85
Std. Dev	0.16
COV (%)	2.73

Tabla 6. Resultados de las pruebas ECT en corrugados con flauta tipo C.

Fuente: elaboración propia

ECT Testing (kN/m)	
1	11.03
2	11.51
3	11.69
4	11.46
5	11.77
6	10.37
7	10.41
8	10.70
9	11.78
10	10.79
Average	11.15
Std. Dev	0.56
COV (%)	4.99

9.2 Resultados de las pruebas de flexión

Tabla 7. Resultados completos de las pruebas de flexión a cuatro puntos del corrugado de flauta B. Fuente: elaboración propia.

Dirección	MD Interno			MD Externo			CD Interno			CD Externo			Resumen		
Numero de Prueba	Deflección (mm)	Resistencia Flexión (Nm)	Deformación (%)	Deflección (mm)	Resistencia Flexión (Nm)	Deformación (%)	Deflección (mm)	Resistencia Flexión (Nm)	Deformación (%)	Deflección (mm)	Resistencia Flexión (Nm)	Deformación (%)	MD	CD	Resistencia Flexión general (Nm)
	0.91	6.19	0.03	1.14	4.94	0.03	1.53	2.86	0.04	1.21	3.62	0.04	5.57	3.24	-
	0.89	6.33	0.03	1.00	5.64	0.03	1.59	2.76	0.05	1.25	3.51	0.04	5.98	3.13	
	1.00	5.64	0.03	1.09	5.17	0.03	1.54	2.85	0.04	1.19	3.68	0.03	5.40	3.26	
	1.05	5.37	0.03	1.12	5.03	0.03	1.30	3.37	0.04	1.26	3.48	0.04	5.20	3.43	
	0.98	5.75	0.03	1.16	4.86	0.03	1.53	2.86	0.04	1.17	3.75	0.03	5.30	3.31	
Promedio	0.97	5.86		1.10	5.13	-	1.50	2.94	-	1.22	3.61	-	5.49	3.27	4.24
Desv. Est	0.07	0.40		0.06	0.31	-	0.11	0.24	-	0.04	0.11	-	0.31	0.11	-
COV (%)	6.8	6.8		5.7	6.0	-	7.6	8.3	-	3.2	3.2	-	5.6	3.2	-

Tabla 8. Resultados completos de las pruebas de flexión a cuatro puntos del corrugado de flauta C. Fuente: elaboración propia.

Maximum Linear deflection (mm)	Dirección	MD Interno			MD Externo			CD Interno			CD Externo			Resumen		
	Numero de Prueba	Deflección (mm)	Resistencia Flexión (Nm)	Deformación (%)	Deflección (mm)	Resistencia Flexión (Nm)	Deformación (%)	Deflección (mm)	Resistencia Flexión (Nm)	Current Strain (%)	Deflección (mm)	Resistencia Flexión (Nm)	Deformación (%)	MD	CD	Resistencia Flexión general (Nm)
1.14		0.70	19.65	0.03	0.58	23.72	0.03	0.67	13.06	0.03	0.47	18.62	0.02	21.68	15.84	-
		0.69	19.94	0.03	0.57	24.13	0.03	0.72	12.16	0.03	0.49	17.86	0.02	22.03	15.01	
		0.74	18.59	0.03	0.53	25.95	0.02	0.69	12.69	0.03	0.48	18.24	0.02	22.27	15.46	
		0.70	19.65	0.03	0.63	21.83	0.03	0.68	12.87	0.03	0.45	19.45	0.02	20.74	16.16	
		0.67	20.53	0.03	0.65	21.16	0.03	0.72	12.16	0.03	0.46	19.03	0.02	20.85	15.59	
Average	Promedio	0.70	19.67		0.59	23.36		0.70	12.59		0.47	18.64		21.52	15.61	18.33
Std. Dev	Desv. Est	0.03	0.70		0.05	1.91		0.02	0.41		0.02	0.63		0.69	0.43	-
COV (%)	COV (%)	3.6	3.6		8.1	8.2		3.3	3.3		3.4	3.4		3.2	2.8	-

9.3 Ecuaciones de los modelos estadísticos

9.3.1 Ecuación del primer modelo estadístico

0,6750429439
 + -0,01944286 • Voladizo en largo(cm)
 + -0,016194189 • Voladizo en Ancho (cm)
 0,0037262459
 + • (Voladizo en Ancho (cm) - 3,0709289745)
 • (Voladizo en Ancho (cm) - 3,0709289745)
 0,004726068
 + • (Voladizo en largo(cm) - 3,1077173698)
 • (Voladizo en largo(cm) - 3,1077173698)
 + -0,000759274 • (ECT (kN/m) - 7,9974595013) • (Voladizo en Ancho (cm) - 3,0709289745)
 + -1,16508e-6 • (Largo (cm) - 47,565733333) • (Voladizo en largo(cm) - 3,1077173698)
 + 0,0014564654 • Alto (cm)
 + 0,0002476263 • (Alto (cm) - 39,031333333) • (Alto (cm) - 39,031333333)
 + -0,0005105 • Largo (cm)
 + -0,000074014 • (Alto (cm) - 39,031333333) • (Largo (cm) - 47,565733333)
 + -2,637167e-5 • (Ancho (cm) - 35,644666667) • (Largo (cm) - 47,565733333)
 + -0,000156262 • ECT (kN/m)
 + -0,000887475 • (ECT (kN/m) - 7,9974595013) • (ECT (kN/m) - 7,9974595013)
 + -0,000513088 • (Largo (cm) - 47,565733333) • (ECT (kN/m) - 7,9974595013)
 + -0,000723146 • Ancho (cm)
 0,0019333873
 + • (Voladizo en largo(cm) - 3,1077173698)
 • (Voladizo en Ancho (cm) - 3,0709289745)
 + 0,0002536958 • (Ancho (cm) - 35,644666667) • (Ancho (cm) - 35,644666667)
 + -0,000088454 • (Ancho (cm) - 35,644666667) • (Voladizo en Ancho (cm) - 3,0709289745)
 + -2,694343e-5 • (ECT (kN/m) - 7,9974595013) • (Alto (cm) - 39,031333333)
 + 0,0000786305 • (Ancho (cm) - 35,644666667) • (Alto (cm) - 39,031333333)
 + -0,000500139 • (ECT (kN/m) - 7,9974595013) • (Voladizo en largo(cm) - 3,1077173698)
 + -0,000040695 • (Alto (cm) - 39,031333333) • (Voladizo en largo(cm) - 3,1077173698)
 + -1,184735e-5 • (Largo (cm) - 47,565733333) • (Voladizo en Ancho (cm) - 3,0709289745)

$$\begin{aligned}
&+ -0,000071395 \cdot (\text{Ancho (cm)} - 35,644666667) \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 3,1077173698) \\
&-0,002259215 \\
&\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 3,0709289745) \\
+ &\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 3,0709289745) \\
&\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 3,0709289745) \\
&-0,002145513 \\
&\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 3,1077173698) \\
+ &\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 3,1077173698) \\
&\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 3,1077173698) \\
&+ 0,0003796725 \cdot (\text{Perimetro (cm)} - 166,4208) \cdot (\text{ECT (kN/m)} - 7,9974595013) \\
&0,0003027748
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 3,1077173698) \\
+ &\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 3,1077173698) \\
&\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 3,1077173698) \\
&\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 3,1077173698) \\
&0,000321143 \\
&\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 3,0709289745) \\
+ &\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 3,0709289745) \\
&\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 3,0709289745) \\
&\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 3,0709289745)
\end{aligned}$$

9.3.2 Ecuación del segundo modelo

1,232463066

$$+ \text{Match}(\text{ECT (kN/m)}) \begin{pmatrix} 5,6040592126 \Rightarrow 0,0519392401 \\ 7,7055814173 \Rightarrow -0,145383674 \\ 8,4060888189 \Rightarrow 0,0743352194 \\ 10,682737874 \Rightarrow 0,0191092147 \\ \text{else} \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

+ -0,00707758 • Largo (cm)

+ -0,002465117 • Ancho (cm)

+ 0,0213832753 • Alto (cm)

+ -0,036897034 • Voladizo en largo(cm)

+ -0,027742627 • Voladizo en Ancho (cm)

+ -0,001270445 • Perímetro en voladizo

+ -3,100433914 • Razón(Alto/Perímetro)

$$+ \text{Match}(\text{ECT (kN/m)}) \begin{pmatrix} 5,6040592126 \Rightarrow 0,0066593414 \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\ 7,7055814173 \Rightarrow 0,0096825928 \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\ 8,4060888189 \Rightarrow -0,015519536 \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\ 10,682737874 \Rightarrow -0,000822398 \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\ \text{else} \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

$$+ \text{Match}(\text{ECT (kN/m)}) \begin{pmatrix} 5,6040592126 \Rightarrow -0,00551521 \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447) \\ 7,7055814173 \Rightarrow -0,003450691 \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447) \\ 8,4060888189 \Rightarrow 0,0225700274 \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 10,682737874 \Rightarrow -0,013604127 \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447) \\ \text{else} \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

$$+ \text{Match}(\text{ECT (kN/m)}) \begin{pmatrix} 5,6040592126 \Rightarrow -0,008204568 \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391) \\ 7,7055814173 \Rightarrow -0,010680173 \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391) \\ 8,4060888189 \Rightarrow 0 \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391) \\ 10,682737874 \Rightarrow 0,0188847413 \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391) \\ \text{else} \Rightarrow . \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 5,6040592126 \Rightarrow 0,0021674863 \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311) \\ 7,7055814173 \Rightarrow 0,0021262475 \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311) \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \text{Match}(\text{ECT (kN/m)}) \left(\begin{array}{l} 8,4060888189 \Rightarrow -0,001305394 \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311) \\ 10,682737874 \Rightarrow -0,00298834 \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311) \\ \text{else} \Rightarrow . \end{array} \right) \\
& + \text{Match}(\text{ECT (kN/m)}) \left(\begin{array}{l} 5,6040592126 \Rightarrow 0,0016925338 \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559) \\ 7,7055814173 \Rightarrow 0,0036990795 \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559) \\ 8,4060888189 \Rightarrow -0,000074464 \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559) \\ 10,682737874 \Rightarrow -0,005317149 \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559) \\ \text{else} \Rightarrow . \end{array} \right) \\
& + \text{Match}(\text{ECT (kN/m)}) \left(\begin{array}{l} 7,7055814173 \Rightarrow -0,000314785 \cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285) \\ 8,4060888189 \Rightarrow -0,000048917 \cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285) \\ 10,682737874 \Rightarrow 0,0005324019 \cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285) \\ \text{else} \Rightarrow . \end{array} \right) \\
& + \text{Match}(\text{ECT (kN/m)}) \left(\begin{array}{l} 5,6040592126 \Rightarrow -0,128765532 \cdot (\text{Razón(Alto/Perímetro)} - 0,1948131183) \\ 7,7055814173 \Rightarrow 3,4235175932 \cdot (\text{Razón(Alto/Perímetro)} - 0,1948131183) \\ 8,4060888189 \Rightarrow 0,0802848695 \cdot (\text{Razón(Alto/Perímetro)} - 0,1948131183) \\ 10,682737874 \Rightarrow -3,375036931 \cdot (\text{Razón(Alto/Perímetro)} - 0,1948131183) \\ \text{else} \Rightarrow . \end{array} \right) \\
& + -0,000668924 \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447) \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\
& + 0,0009164515 \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391) \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\
& + -2,633319e-5 \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311) \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\
& + 0,0000373534 \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559) \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\
& + 0,000077489 \cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285) \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\
& + -0,221018692 \cdot (\text{Razón(Alto/Perímetro)} - 0,1948131183) \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \\
& + -0,000237232 \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447) \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447) \\
& + 0 \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391) \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447) \\
& + -0,000382322 \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311) \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447)
\end{aligned}$$

$+ 0,0000986695 \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559) \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447)$
 $+ 0,0001473436 \cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285) \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447)$
 $+ 0 \cdot (\text{Razón(Alto/Perímetro)} - 0,1948131183) \cdot (\text{Ancho (cm)} - 36,913123447)$
 $+ 0 \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528) \cdot (\text{Largo (cm)} - 46,395509528)$
 $+ -0,000122682 \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311) \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391)$
 $+ -0,000757891 \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559) \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391)$
 $+ 0,0000190709 \cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285) \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391)$
 $+ 0 \cdot (\text{Razón(Alto/Perímetro)} - 0,1948131183) \cdot (\text{Alto (cm)} - 30,482104391)$
 0,0020423673
 $+ \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 $\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 -0,000035232
 $+ \cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285)$
 $\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 0,0024951864
 $+ \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 $\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 0,0001647008
 $+ \cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285)$
 $\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 0,0749170302
 $+ \cdot (\text{Razón(Alto/Perímetro)} - 0,1948131183)$
 $\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 -0,000039435
 $+ \cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285)$
 $\cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285)$
 0,0018943606
 $+ \cdot (\text{Razón(Alto/Perímetro)} - 0,1948131183)$
 $\cdot (\text{Perímetro en voladizo} - 63,338253285)$
 0,0000513094
 $\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 $+ \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$

$\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 0,007210579
 $+ \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 $\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 -0,000845099
 $\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 $+ \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 $\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 -0,000129486
 $\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 $+ \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 $\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 0,0000583954
 $\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 $+ \cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 $\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 $\cdot (\text{Voladizo en largo(cm)} - 2,310263311)$
 -2,807913e-5
 $\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 $+ \cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 $\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$
 $\cdot (\text{Voladizo en Ancho (cm)} - 2,3658873559)$