



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE CÁLCULO PARA LA
PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UNA
LÁMINA DE CARTÓN CORRUGADO TOMANDO COMO BASE
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAPEL.**

Autor

Cristian Vergara Cañas

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química

Ingeniería Agroindustrial

Carepa, Colombia

2021



DESARROLLO DE UN MODELO DE CÁLCULO PARA LA PREDICCIÓN DE LA
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UNA LÁMINA DE CARTÓN CORRUGADO
TOMANDO COMO BASE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAPEL.

Cristian Vergara Cañas

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Profesional en Ingeniería Agroindustrial

Asesores (a):

Angelly Patricia Martínez Rodríguez – Ingeniería Agroindustrial

Bryan Dávila Ortiz – Ingeniería de Procesos

Línea de Investigación:

Industria de Pulpa, Papel y Cartón Corrugado

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química

Ingeniería Agroindustrial

Carepa, Colombia

2021

Resumen

La resistencia a la compresión de una lámina de cartón corrugado es una medida directa de la capacidad de resistir al apilamiento en condiciones de almacenamiento y transporte; dicha propiedad está relacionada directamente con la resistencia a la compresión del papel. Existen varios métodos como el SCT y el RCT para estimar esta propiedad mecánica existiendo una variación significativa en los resultados obtenidos en cada uno. Por tanto, el objetivo de este estudio fue encontrar un modelo matemático predictivo de la resistencia a la compresión de una lámina de cartón, ECT. Al mismo tiempo, se halló una correlación lineal entre el SCT y RCT. Como objeto de estudio se eligieron láminas de pared sencilla con flauta C con el fin de realizar una caracterización en el laboratorio de calidad que comprendió análisis de calibre, peso básico, SCT y RCT para el caso de los papeles y ECT para el caso de las láminas; de acuerdo con los métodos estándar basados en las normas internacionales Tappi. Los resultados de este estudio se usaron para determinar los coeficientes de regresión lineal simple y múltiple en el modelo de Maltenfort al correlacionar la resistencia a la compresión de la lámina (ECT) medida versus la resistencia calculada y/o prevista, utilizando las resistencias a la compresión de los componentes del papel, medidas con la prueba de SCT dirección transversal. Los coeficientes de determinación (R^2) del ajuste lineal para una y múltiples variables fue de 0,9829 y 0,9840, respectivamente. Por otro lado, se halló una correlación entre los valores medidos de resistencia a la compresión del papel, SCT y RCT con un $R^2=0,9807$. Finalmente, se sugiere replicar el estudio a láminas de cartón corrugado doble pared con diferente combinación de flauta, con el fin de estandarizar un modelo predictivo con un óptimo nivel de confianza.

Palabras claves: Cartón corrugado, Papel, Short Span Compressive Test (SCT), Ring Crush Test (RCT), Edge Crush Test (ECT), Resistencia a la compresión del papel.

Tabla de contenido

1.	Introducción	2
2.	Objetivos	3
2.1	Objetivo general.	3
2.2	Objetivos específicos.	3
3.	Marco Teórico	3
3.1	Papel.	3
3.2	Calibre del papel y cartón.	4
3.3	Gramaje o peso básico del papel y el cartón.	4
3.4	Resistencia a la compresión.	4
4.	Metodología	5
4.1	Muestreo.	5
4.2	Cortar muestras de papel.	7
4.3	Peso básico.	7
4.4	Calibre.	7
4.5	Short Span Compressive Test (SCT).	7
4.6	Ring Crush Test, RCT.	7
4.7	Edge Crush Test, ECT.	8
4.8	Análisis de la información.	9
5.	Resultados y análisis	10
5.1	Regresión lineal simple, RLS.	10
5.2	Regresión lineal múltiple, RLM.	11
5.3	Resistencia a la compresión del papel SCT y RCT.	12
5.4	Prueba del modelo predictivo.	12
6.	Conclusiones	13
7.	Referencias bibliográficas	13
8.	Anexos.	14

1. Introducción

Corrugados del Darién S.A.S. es una compañía dedicada a la fabricación de cajas de cartón corrugado para el embalaje y exportación principalmente de plátano y banano y, en una menor proporción, de flores, limón, entre otros productos cosechados en las regiones del Urabá y oriente antioqueño, respectivamente. Entre sus unidades de negocio, también se encuentra la fabricación de esquineros de cartón, sellos y etiquetas autoadhesivas, componentes que también forman parte de la estructura de embalaje de los productos mencionados.

Con el fin de garantizar la calidad de los productos fabricados, desde el departamento de calidad se llevan a cabo diferentes análisis que tienen como objetivo la determinación de las propiedades de las materias primas e insumos, como lo son el papel, gomas y adhesivos utilizados en la fabricación de cajas de cartón corrugado, así como al producto en tránsito y producto final, basados en las normas internacionales de la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel (TAPPI).

Entre los ensayos mecánicos realizados a las láminas de cartón corrugado se encuentra el Edge Crush Test (ECT), que proporciona información sobre la capacidad de resistir el

apilamiento, es decir, da cuenta de los efectos de las condiciones de transporte y almacenamiento (Pathare & Opara, 2014), este procedimiento se realiza siguiendo la metodología descrita en la norma Tappi T-811; del mismo modo el valor del ECT también se puede predecir a partir de la denominada ecuación de Maltenfort, mediante el uso de la resistencia a la compresión de los papeles que conforman la lámina de cartón (Dimitrov & Heydenrych, 2009). En la compañía actualmente se estima este valor usando los valores de la resistencia del papel obtenidos en el Ring Crush Test (RCT).

Desde el área de I+D se pretende desarrollar un modelo de cálculo para predecir el ECT de una lámina de cartón corrugado a partir del Short Span Compressive Test (SCT) del papel liner y corrugado medio, apoyándose en la norma Tappi T-826, esto teniendo en cuenta que diferentes autores han demostrado que este método es más preciso para predecir la resistencia a la compresión del cartón corrugado (Šarčević et al., 2016), (Schaffrath et al., 2018). Este trabajo de investigación forma parte de un amplio estudio que se desea extender para láminas de cartón corrugado flauta B, E y T; y sus posibles combinaciones, es decir, CB, ET, entre otras.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general.

Desarrollar un modelo de cálculo para predecir la resistencia a la compresión de una lámina de cartón pared sencilla flauta C, tomando como base la resistencia a la compresión del papel liner y corrugado medio, medida según la norma Tappi T-826.

2.2 Objetivos específicos.

- Realizar la caracterización de las muestras de papel y láminas de cartón corrugado mediante la medición de propiedades físicas y mecánicas de acuerdo con la norma estándar internacional Tappi correspondiente.
- Correlacionar los resultados de las propiedades mecánicas de SCT y ECT mediante modelos matemáticos lineales de una y múltiples variables, seleccionando el modelo de mayor ajuste.
- Determinar el porcentaje de error relativo de los resultados de ECT estimados a partir de los modelos matemáticos versus el valor real para una lámina de cartón corrugado pared sencilla flauta C.

3. Marco Teórico

3.1 Papel.

Es un material celulósico compuesto al menos en un 80% de pulpa de madera al sulfato. Presenta características sobresalientes para la fabricación de material de embalaje, es natural y excepcionalmente fuerte (Morris, 2017), el proceso de fabricación consiste en la deshidratación de una suspensión de fibra sobre una banda (Harrysson & Ristinma, 2008).

El papel es un material ortotrópico, es decir, sus propiedades mecánicas son diferentes en las tres direcciones principales. En dirección del espesor (DZ), en dirección máquina (DM), la dirección más larga está paralela a la máquina, y en dirección transversal (DT), el lado más largo está perpendicular a la dirección de la máquina. Las propiedades de resistencia generalmente dependen de la selección de la fibra en la dirección del plano (DM y DT), mientras que la resistencia en dirección al espesor (ZD) no es significativa (Jiménez-Caballero et al., 2009).

3.2 Calibre del papel y cartón.

Es el grosor del papel es la distancia perpendicular entre dos superficies planas paralelas, se mide con un micrómetro. El valor del calibre influye en la calidad del rollo y la resistencia. Por su parte, el calibre del cartón corrugado depende de la altura de la flauta y del calibre de los papeles liner o de revestimiento (Fadiji et al., 2018), (Nevins, 2008). En la Tappi T-411 se define el método para medir el grosor de una sola hoja de papel y cartón mediante el uso de un micrómetro (Tappi Press, 2000).

3.3 Gramaje o peso básico del papel y el cartón.

En la norma Tappi T-410 se define el cálculo del gramaje de una muestra de papel y cartón a partir de la relación entre la masa y el área en unidades métricas, es decir, se expresa en gramos por metro cuadrado, g/m^2 . (Tappi Press, 2000). Un cálculo adecuado del gramaje favorece el cálculo de muchas propiedades de resistencia.

3.4 Resistencia a la compresión.

Las propiedades mecánicas de una lámina de cartón se relacionan directamente a los componentes del papel, es decir, la firmeza y la tenacidad del embalaje dependen de la resistencia a la compresión de este. La resistencia a la compresión es una de las propiedades más importantes del cartón, y se define como la máxima fuerza de compresión que resiste una lámina de prueba sin colapsar (Šarčević et al., 2016).

La resistencia a la compresión del papel de una lámina de cartón, el liner y el corrugado medio se puede medir a partir de las siguientes pruebas estandarizadas, entre otras:

3.4.1 Ring Crush Test (RCT) o prueba de aplastamiento de anillo.

Se usa para determinar la resistencia al aplastamiento de una cinta de papel en forma de anillo de una cinta de papel de 152,4 mm de largo y 12,7 mm de ancho, que se enrolla para formar un radio de 24,64 mm (Fadiji et al., 2018), estas son dimensiones estandarizadas en la norma Tappi T-822.

3.4.2 Short Span Compressive Test (SCT) o prueba de compresión de corto alcance.

Según Tappi Press, (2000), el SCT se utiliza para determinar la resistencia a la compresión del papel para cartón. Además, menciona que investigaciones han demostrado que el valor de SCT de los papeles del liner y corrugado médium puede usarse para predecir la resistencia a la compresión de una lámina de cartón y así mismo, la de una caja.

En la norma Tappi T-826 se dictamina que para la prueba se sujeta una muestra de 15 mm de ancho y 150 mm de largo entre dos mordazas con una distancia de separación de 0.7 mm, las mordazas se presionan contra sí mismas aplicando una fuerza de compresión hasta que ocurre un colapso en la muestra; el valor se expresa en kN m^{-1} (Fadiji et al., 2018). Generalmente los papeles tienen al menos 0,3 mm de espesor, la propiedad que se mide es, en esencia, la capacidad del material para resistir el aplastamiento (Hämäläinen et al., 2017).

Comúnmente se mide el RCT y el SCT, que teóricamente miden la misma propiedad, pero los valores pueden variar hasta en un 30% más para la misma muestra, debido a que los principios de cada método son diferentes. Todavía no se especifica qué método es técnicamente más correcto; pero se supone que el método de prueba del SCT es más preciso (Šarčević et al., 2016).

3.4.3 Edge Crush Test (ECT) o prueba de compresión de bordes.

La Tappi T-811 define el método para determinar la resistencia a la compresión de borde (ECT) de forma perpendicular a las flautas de una muestra de lámina de cartón corrugado de pared sencilla, doble o triple (Tappi Press, 2000). Y según Fadiji et al., (2018), el valor del ECT determina la capacidad de una muestra de lámina cartón corrugado colocada verticalmente para sostener una carga de arriba hacia abajo, se mide en N m^{-1} .

Markstrom (1999) citado por Dimitrov y Heydenrych (2009), presenta un modelo matemático para estimar el ECT de la lámina de cartón a partir de la resistencia a la compresión del liner y el médium, la denominada ecuación de Maltenfort. “Puede estimarse utilizando la resistencia a la compresión de los componentes, medida con el método RCT o SCT” (Šarčević et al., 2016).

$$ECT = k * (\sigma_{c,L1} + \sigma_{c,L2} + \alpha * \sigma_{c,F} + \dots) \quad (1)$$

Donde σ_c es la resistencia a la compresión en la dirección transversal (DT) del papel liner y corrugado médium, α es el factor de toma del perfil corrugado específico utilizado (relación entre la longitud del medio corrugado y la longitud del liner), y la constante k debe ser siempre igual a la unidad, independientemente de la prueba de resistencia a la compresión del papel utilizada (Šarčević et al., 2016), (Dimitrov & Heydenrych, 2009), (Biancolini & Brutti, 2003).

4. Metodología

4.1 Muestreo.

Con la programación de producción de la línea corrugadora se identificó la referencia de la lámina pared sencilla flauta C a muestrear y su combinación de papeles (liner y corrugado medio). El procedimiento de muestreo se realizó según lo estipulado en la norma Tappi T-400, “Recolección de muestras y aceptación de un lote único de papel, cartón, cartón para cajas o productos afines”, de la siguiente manera:

4.1.1 Muestras de papeles.

Para cada referencia de lámina analizada se muestrearon los rollos de papel liner interno, corrugado medio y liner externo situados en los montarrollos y empalmadores uno, dos y cinco de la línea del corrugador respectivamente. El muestreo a los rollos de papel se realizó después que el operario retira las capas con daños causados por el transporte y la manipulación en la cadena logística. Es importante resaltar que antes de realizar un corte sobre el rollo se verificó que el área de interés estuviera totalmente lisa, es decir, sin arrugas, humedad o maltratos para evitar datos erróneos en la evaluación de las propiedades. Finalmente, se procedió a tomar las muestras de papel de la capa externa del rollo, teniendo la precaución de no comprometer un mayor número de capas y así evitar el aumento del desperdicio. El procedimiento de muestreo detallado para cada rollo de papel se describe a continuación:

- a. De la tarjeta de identificación del rollo se registró en el formato de muestreo el código del material, molino de procedencia, lote y gramaje del papel.
- b. Se inspeccionó que el área de corte no tuviera arrugas, exceso de humedad o maltratos.
- c. Se midió con un flexómetro un área de 15x15 pulgadas, tomando como punto de partida la orilla del rollo. Luego, se cortó el área medida de la capa externa con un bisturí; se realizó en los dos bordes del rollo para tener dos hojas de papel por cada uno (liner interno L1, corrugado medio CM y liner externo L2).
- d. Se usó el flexómetro para trazar dos líneas paralelas de acuerdo con el sentido de las fibras. Además, se rotuló con el gramaje, el número de muestra y el tipo de papel (L1, CM y L2).
- e. En el laboratorio de calidad, con la guillotina mecánica se realizó un corte con una dimensión de 12x12 pulgadas a las dos muestras de cada rollo, tomando como punto de referencia las líneas paralelas trazadas en el paso d.
- f. Se dejaron acondicionar las muestras en el laboratorio durante 24 horas de acuerdo con la norma Tappi T-402, en lo referente a atmósferas estándar de acondicionamiento de humedad relativa al 50% y una temperatura de 23 °C, para la evaluación correspondiente.

4.1.2 Muestras de láminas.

Se tomó una lámina de la banda transportadora de salida de la línea con material terminado en el momento en que los tres rollos muestreados están montados y empalmados sobre el corrugador. Luego, se trazó sobre la muestra un área de 4 pulgadas cuadradas. Las láminas fueron llevadas al laboratorio con el fin de acondicionarlas según se dispone en la norma Tappi T-402.

4.2 Cortar muestras de papel.

Después de acondicionadas las muestras de papel, una muestra de cada tipo de papel se pasó por una máquina cortadora de cintas con dimensiones de 6 por 1/2 pulgadas; cortando 12 cintas en dirección máquina (MD) y 6 con dirección transversal (CD). Las otras muestras acondicionadas se almacenan con el fin de garantizar un respaldo en caso de posibles daños o errores durante la evaluación de las propiedades.

4.3 Peso básico.

Se pesaron 5 muestras de 6 x 1/2 pulgadas para cada tipo de papel en una balanza analítica con precisión mínima de 0.01 gramos, soportado en la norma Tappi T-410. Luego, se calculó el peso por unidad de área de papel, multiplicando la masa de la muestra por la constante (516.6677) para convertirla en unidades de g/m². Registrando el valor promedio en el formato.

4.4 Calibre.

Se tomó una muestra de 6 x 1/2 pulgadas por cada tipo de papel y se colocó sobre el yunque de un micrómetro. Se determinó el valor del calibre en cada una de las muestras realizando 4 mediciones en una misma muestra; anotando el valor promedio en milímetros en el formato.

4.5 Short Span Compressive Test (SCT).

La prueba de medición del valor SCT de cada unidad de prueba (papel medio, liner interno y externo), se realizó en dirección máquina y dirección transversal de las fibras. Para cada análisis se tomaron 6 muestras o cintas con dimensiones de 6 x 1/2 pulgadas. La evaluación en el equipo compresor de SCT se realizó de la siguiente manera:

- a. Se seleccionó en el equipo el gramaje del papel y dirección en la que se realizaría la evaluación. Se tomó la precaución de manipular la muestra en el área de prueba con guantes debido a que las pruebas son sensibles al contenido de humedad.
- b. Se insertó la muestra de prueba y se accionaron las mordazas que están a una distancia de separación de 0.7 mm por medio del botón START para que se presionen contra sí mismas hasta que ocurra la falla a la compresión del papel. Se aplicó la compresión en 4 puntos de la muestra; pero sin realizarla sobre ningún área de la muestra que ya haya comprimido la mordaza.
- c. Se registró en el formato el valor promedio de los 4 puntos evaluados en KN/m obtenidos al presionar el botón STOP.

4.6 Ring Crush Test, RCT.

La medición del valor RCT de los papeles (liner y corrugado medio) por cada unidad de prueba se realizó en dirección transversal; para ello se tomaron 6 muestras cortadas en dirección máquina con dimensiones de 6 x 1/2 pulgadas y, de acuerdo con su calibre se eligió un disco metálico. La prueba en el equipo compresor de RCT se realizó de la siguiente manera:

- a. Se insertó cuidadosamente cada muestra en el dispositivo circular o disco.
- b. Se ajustó la máquina digital Crush de acuerdo con el gramaje de papel en sus rangos de funcionamiento: pico de sensibilidad (PS) y límite inferior (LL) en unidades de libras fuerza; el rango de trabajo para los papeles liner fue de PS=20 y LL=50, para el caso de muestras de papel corrugado medio el valor de PS y LL fue igual a 10 y 30 lbf respectivamente. También se programó la unidad de medida en Newton (N).
- c. Posteriormente, se colocó el sujetador de tal forma que los extremos de la muestra concuerden con la posición del operador.
- d. Se aplicó una carga a la muestra bajando la placa superior hasta llegar a la deflexión. Inmediatamente después de llegar al máximo, la muestra sufre una deflexión en el área que se proyecta por encima del sujetador.
- e. El valor dado por el equipo se le aplicó la siguiente formula:

$$\frac{a \text{ (Newton)}}{152,4 \text{ mm}} = \frac{b \text{ (K Newton)}}{m} \quad (2)$$

Donde:

- a: Es el valor que reporta el equipo.
 - b: el valor convertido a (KN/m).
 - 152,4 mm es el largo de la cinta de papel.
- f. Finalmente, se registró el valor obtenido en KN/m y comparar el resultado con los estándares de calidad papeles liner y medio.

4.7 Edge Crush Test, ECT.

4.7.1 Corte muestras de lámina.

Se cortaron con precisión 6 muestras de cada lámina de prueba con un bisturí, asegurando un corte exacto en las orillas, es decir, paralelo entre los liner y perpendicular en las esquinas; además, se tuvo presente extraer las muestras de áreas alejadas de incisiones, juntas y cierres. Las orillas del ancho deben ir paralelas entre sí y perpendiculares al eje de las flautas. Se cortaron las muestras con un área de 4 pulgadas cuadradas.

4.7.2 Procedimiento.

Se realizó la prueba después de 24 horas en un ambiente acondicionado de acuerdo con la norma estándar Tappi T-402, usando guantes de látex para evitar humedecer la muestra. Se colocó cada unidad de prueba cortada sobre un soporte ajustable a las dimensiones de la muestra, con las flautas en forma perpendicular a la base del soporte; luego, se puso el conjunto centrado entre dos placas del compresor mecánico de ECT. Se aplicó una fuerza compresiva a la muestra hasta que sufrió una deflexión. Una prueba válida es cuando la lámina de prueba se ha deformado en la zona céntrica, no se tienen en cuenta pruebas donde la muestra presenta compresión en las márgenes, porque es señal de un mal corte.

Finalmente, el valor arrojado por el equipo se dividió entre dos y, el resultado es el valor de ECT en libras fuerzas por pulgada (bf/in).

4.8 Análisis de la información.

En el formato de muestreo se registraron los valores de las repeticiones por cada prueba realizada; al mismo tiempo, se determinó el valor promedio y la desviación estándar, tomando solo los datos más cercanos a la media. A medida que se realizaba el muestreo y posterior evaluación de las propiedades, se tabularon los datos en un libro de Excel. Antes de efectuar los cálculos matemáticos se realizó la conversión de unidades de KN/m a lbf/in para los valores de SCT y RCT; ya que el ECT se expresa en lbf/in. Finalmente, se analizaron los datos de la siguiente forma:

4.8.1 Regresión lineal simple.

- a. Se calculó el ECT con los valores del SCT dirección transversal a partir del modelo de Maltenfort con el coeficiente igual a uno.
- b. Se realizó una correlación de la forma pendiente-intercepto entre el ECT calculado y el ECT real; por otro lado, también se halló la expresión matemática que relaciona el SCT dirección transversal y el RCT. No obstante, fue necesario depurar muestras que no se ajustaban al modelo.
- c. Adicionalmente, se halló una correlación por regresión lineal simple entre los valores el SCT dirección transversal y del RCT.
- d. Se determinó la expresión matemática que describe el modelo y el coeficiente de determinación (R^2).

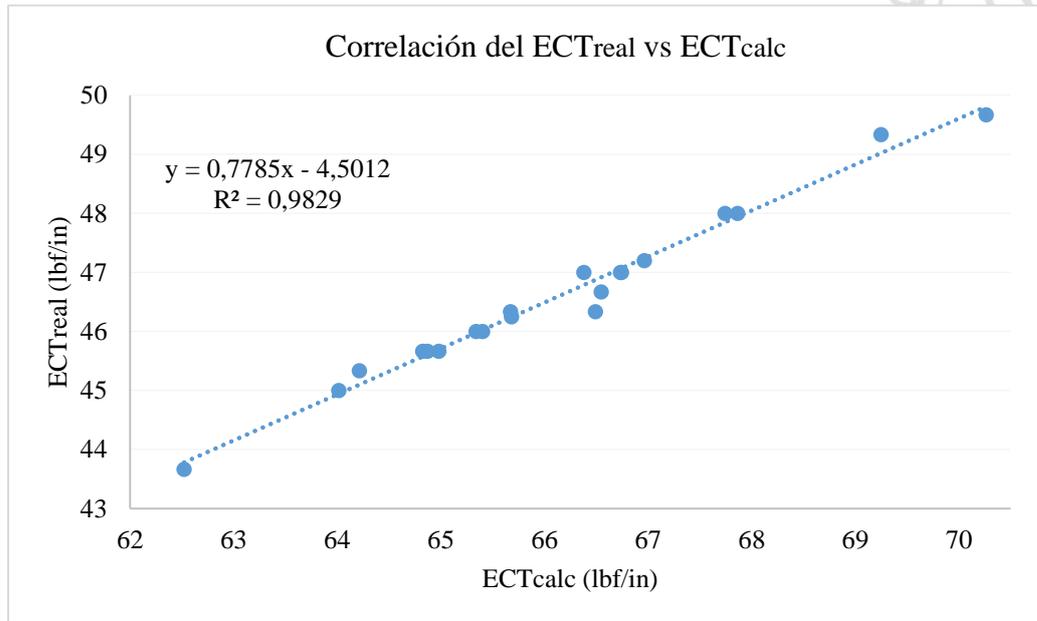
4.8.2 Regresión lineal múltiple.

- a. Cada uno de los valores de la prueba de SCT de los papeles corrugado medio se multiplicaron por el factor de la flauta $\alpha = 1,437$).
- b. Se identificó la variable dependiente $Y(x)$ como el ECT estimado, y las variables independientes X como los valores de SCT dirección transversal de los papeles liner y corrugado medio.
- c. Se utilizó la herramienta de análisis de datos de Excel para modelos de múltiples variables con un nivel de confianza de 95%.
- d. Se determinó el análisis de varianza, el coeficiente de determinación (R^2) y los coeficientes de la ecuación de Maltenfort que describen el modelo para estimar el ECT. Finalmente, se puso a prueba el modelo.

5. Resultados y análisis

5.1 Regresión lineal simple, RLS.

La Gráfica 1 muestra la dispersión de los datos con ajuste lineal de la medición del ECT real, versus el resultado calculado de acuerdo con la ecuación de Maltenfort (véase la Tabla 7 de los anexos).



Gráfica 1. Relación lineal entre el ECT medido y el ECT calculado.

El modelo matemático que relaciona el ECT-real frente al ECT calculado presenta un ajuste lineal de 98.29%, es decir, se puede estimar con un mínimo porcentaje de error el ECT de láminas de cartón corrugado pared sencilla flauta C con diferentes combinaciones de papeles; El modelo está dado por la siguiente expresión:

$$ECT_{real} = 0,7785 * ECT_{calc} - 4,5012 \quad (3)$$

Reemplazando el ECT-calc por la ecuación de Maltenfort (ver ecuación 1), el modelo matemático queda de la siguiente forma:

$$ECT_{real} = 0,7785 * (SCT_{L1} + SCT_{L2} + \alpha SCT_{CM}) - 4,5012 \quad (4)$$

$$R^2 = 0,9829$$

Donde ECT-real y SCT están en lbf/in, la constante de correlación (k) es adimensional y $\alpha = 1,437$ es el factor de flauta C de la masa corrugadora. De acuerdo Dimitrov y Heydenrych (2009), se confirma que un modelo lineal se puede utilizar con éxito para predecir la resistencia a la compresión del cartón corrugado a partir del SCT. Por otro lado, esto se puede extrapolar aún más para predecir indirectamente el rendimiento final de apilado de cajas de cartón ondulado midiendo las propiedades mecánicas del papel.

5.2 Regresión lineal múltiple, RLM.

En la Tabla 1 se observan los resultados estadísticos del modelo matemático de múltiples variables, resaltando el ajuste del R^2 , igual a 0,984. Es decir, que los resultados obtenidos mediante el modelo de cálculo se ajustan a los valores reales de resistencia a la compresión.

Tabla 1. Estadísticas de la regresión.

Coefficiente de correlación múltiple	0,991980129
Coefficiente de determinación R^2	0,984024577
R^2 ajustado	0,981029185
Error típico	0,194797896
Observaciones	20

En la Tabla 2 el valor crítico de F es aproximadamente igual a cero, indica que existe una relación lineal significativa entre la variable dependiente y el conjunto de variables independientes, por tanto, la ecuación del modelo ofrece un buen ajuste.

Tabla 2. Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	37,3974577	12,46581923	328,5128	1,40624E-14
Residuos	16	0,607139525	0,03794622		
Total	19	38,00459722			

Véase en la Tabla 3 los coeficientes de las variables independientes del modelo en un intervalo de confianza de 95%; además, se observa que el error del coeficiente de cada variable independiente tiende a cero.

Tabla 3. Coeficientes del modelo lineal.

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-5,062376	1,750215	-2,892431	-8,772666	-1,35209
Variable X_{L1}	0,834557	0,060592	13,773321	0,706107	0,963007
Variable X_{CM}	0,771755	0,046587	16,565960	0,672995	0,870514
Variable X_{L2}	0,754828	0,035535	21,241885	0,679497	0,830159

Por último, se presenta el modelo matemático de regresión lineal múltiple que estima el ECT partir del SCT.

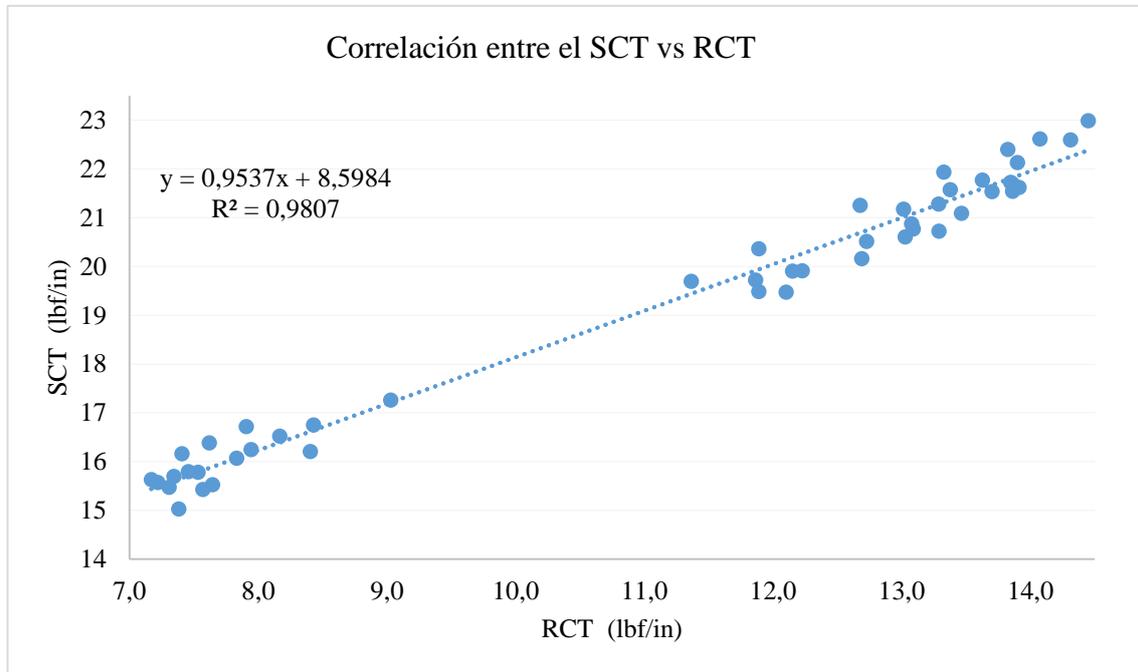
$$ECT_{estimado} = 0,8346 * SCT_{L1} + 0,7548 * SCT_{L2} + 0,7718 * \alpha * SCT_{CM} - 5.0624 \quad (5)$$

$$R^2 = 0,984$$

Donde el valor de SCT está en unidades de lb/in y $\alpha = 1,437$, es el factor de flauta C de la masa corrugadora.

5.3 Resistencia a la compresión del papel SCT y RCT.

En la Gráfica 2 se observa la dispersión respecto a la línea de tendencia de los resultados de la prueba SCT dirección transversal y RCT de los papeles liner y corrugado medio para cada unidad de prueba (véase la Tabla 8 de los anexos).



Gráfica 2. Relación entre las pruebas de la resistencia a la compresión de los papeles.

La expresión matemática que correlaciona los resultados del SCT dirección transversal y el RCT del papel liner y corrugado medio, es la siguiente:

$$SCT = 0,9537 * RCT + 8,5984 \quad (6)$$
$$R^2 = 0,9807$$

Donde los valores de SCT y RCT están en unidades de lb/in. La relación tiene un ajuste de 98% entre los resultados de los métodos de prueba; confirmando lo dicho por Dimitrov y Heydenrych (2009), que ambos métodos de prueba pueden usarse para estimar la resistencia a la compresión de una muestra de cartón corrugado. Por otro lado, Šarčević, Banić y Milčić (2016) afirman que los resultados pueden variar hasta en un 30%, suponiendo mejores resultados la prueba de SCT como se ha demostrado en estudios previos.

5.4 Prueba del modelo predictivo.

La Tabla 4 muestra la discrepancia entre los valores de ECT real versus el estimado para láminas de cartón corrugado pared sencilla a partir de los modelos matemáticos lineales (véase ecuación 4 y 5). Con los resultados de ECT pronosticados a partir del modelo regresión lineal simple (RLS) el error relativo promedio es de 3.61% respecto a los datos medidos. Mientras que el ECT estimado de acuerdo con el modelo matemático de múltiples variables (RLM) presenta un error aproximado de 3.33%; próximo al porcentaje de error del modelo desarrollado por Šarčević, Banić y Milčić (2016), donde los resultados de ECT estimados a partir del SCT difieren un 3,2% de los datos reales.

Tabla 4. Comparación del ECT medido versus el ECT estimado

Muestra	Combinación g/m ²	ECT medido	ECT RLS	% Error RLS	ECT RLM	% Error RLM
6	205-127-186	45,3	46,8	3,34%	46,8	3,19%
7	170-127-229	47,3	49,4	4,38%	49,1	3,71%
18	205-127-205	44,7	46,1	3,16%	46,1	3,16%
23	205-146-205	47,0	48,7	3,54%	48,5	3,27%

Nota: los valores de ECT están en unidades de libras fuerza por pulgada (lbf/in).

6. Conclusiones

Los modelos matemáticos lineales que correlacionan el ECT calculado con el ECT medido y/o real utilizando la resistencia a la compresión del papel medida mediante el método de SCT, mostraron un ajuste lineal aproximado al 98% con un nivel de confianza del 95%, en el caso del modelo de múltiples variables. Demostrando que estos modelos se pueden utilizar con éxito para estimar el valor de la resistencia a la compresión para una lámina de cartón corrugado pared sencilla a condiciones atmosféricas estándar. Sin embargo, estadísticamente hablando el modelo de múltiples variables presenta un mayor grado de confianza, ya que después de realizar una comparación de los resultados de ECT estimados versus el valor real para láminas de cartón corrugado con diferentes combinaciones de papeles este modelo presentó un porcentaje de error relativo del 3.33%, indicando que de los métodos evaluados es el que tiene mayor aproximación a la realidad.

Se suple la necesidad de un modelo de cálculo propio del departamento de calidad de Corrugados del Darién S.A.S., proporcionando resultados precisos sobre la capacidad y/o resistencia de las láminas de cartón corrugado de acuerdo con las propiedades físicas y mecánicas la materia prima que se maneja en la compañía, contribuyendo al cumplimiento de los estándares de calidad del producto terminado, es decir, que cuente con propiedades mecánicas óptimas a un costo mínimo sin comprometer su función de proteger a la fruta en el embalaje.

7. Referencias bibliográficas

- Biancolini, M. E., & Brutti, C. (2003). Numerical and experimental investigation of the strength of corrugated board packages. *Packaging Technology and Science*, 16(2), 47–60. <https://doi.org/10.1002/pts.609>
- Dimitrov, K., & Heydenrych, M. (2009). Relationship between the edgewise compression strength of corrugated board and the compression strength of liner and fluting medium papers. *Southern Forests*, 71(3), 227–233. <https://doi.org/10.2989/SF.2009.71.3.7.919>
- Fadiji, T., Berry, T. M., Coetzee, C. J., & Opara, U. L. (2018). Mechanical design and performance testing of corrugated paperboard packaging for the postharvest handling of horticultural produce. *Biosystems Engineering*, 171, 220–244. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.05.004>

- Hämäläinen, P., Hallbäck, N., Gård, A., & Lestelius, M. (2017). On the determination of transverse shear properties of paper using the short span compression test. *Mechanics of Materials*, 107, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.01.012>
- Harrysson, A., & Ristinmaa, M. (2008). Large strain elasto-plastic model of paper and corrugated board. *International Journal of Solids and Structures*, 45(11-12), 3334–3352. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.01.031>
- Jiménez-Caballero, M. A., Conde, I., García, B., & Liarte, E. (2009). Design of Different Types of Corrugated Board Packages Using Finite Element Tools. In *Conferencia de clientes SIMULIA*. www.ita.es
- Morris, B. A. (2017). Commonly Used Resins and Substrates in Flexible Packaging. In *The Science and Technology of Flexible Packaging* (pp. 69–119). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-24273-8.00004-6>
- Nevins, A. (2008). *Significant factors affecting horticultural corrugated fibreboard strength*. Massey University.
- Pathare, P. B., & Opara, U. L. (2014). Structural design of corrugated boxes for horticultural produce: A review. In *Biosystems Engineering* (Vol. 125, pp. 128–140). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.021>
- Šarčević, I., Banić, D., & Milčić, D. (2016). Evaluation of compressive test methods for paper using a mathematical model, based on compressive test for corrugated board. *Acta Graphica*, 27(1), 47–50.
- Schaffrath, H. J., Reichenbach, F., & Schabel, S. (2018). Prediction of box failure from paper data for asymmetric corrugated board. *Tappi Journal*, 17(8), 429–434. <https://doi.org/10.32964/tj17.08.429>
- Tappi Press. (2000). *Normas y métodos de contenedores corrugados TAPPI*.

8. Anexos

Tabla 5. Valor de ECT medido por cada unidad de prueba.

Muestra	Combinación	ECT (lbf/in)
1	205-127-205	49,3
2	205-127-205	47,0
3	205-127-205	47,0
4	205-127-186	47,0
6	205-127-186	45,3
7	170-127-229	47,3
8	205-127-205WTL	46,0
9	205-127-205	46,3
10	205-127-205WTL	46,3
11	205-127-205WTL	45,3
12	205-127-205	46,0

Muestra	Combinación	ECT (lbf/in)
13	205-127-186	45,7
14	205-127-205	45,0
16	205-127-205	45,7
17	205-146-205	43,7
18	205-127-205	44,7
19	205-146-205	48,0
20	205-127-205	48,0
21	205-127-205WTL	45,7
22	205-146-205	49,7
23	205-146-205	47,0
24	205-146-205WTL	46,7
25	205-127-205	46,3
27	205-127-205WTL	47,2

Tabla 6. Caracterización de la combinación de papel por unidad de prueba.

Muestra	Acabado	Gramaje (g/m ²)	Tipo de papel	Calibre (mm)	Peso básico (g/m ²)	SCT - CD (KN/m ¹)	SCT-MD (KN/m ¹)	RCT-MD (KN/m ¹)
1	KLB	205	L1	0,26	206,7	3,96	7,17	2,51
1	SCM	127	CM	0,19	124,0	2,87	5,12	1,33
1	KLB	205	L2	0,26	196,3	3,96	6,94	2,47
2	KLB	205	L1	0,28	201,5	3,80	6,88	2,43
2	SCM	127	CM	0,21	129,2	2,89	5,09	1,43
2	WTL	205	L2	0,24	206,7	3,41	6,17	2,12
3	KLB	205	L1	0,25	201,5	3,72	7,14	2,22
3	SCM	127	CM	0,19	124,0	2,81	4,92	1,37
3	KLB	205	L2	0,27	201,5	3,77	7,06	2,43
4	KLB	205	L1	0,26	200,5	3,85	6,89	2,25
4	SCM	127	CM	0,18	121,9	2,75	4,96	1,29
4	KLB	205	L2	0,26	202,5	3,81	6,90	2,26
6	KLB	205	L1	0,25	199,4	3,69	6,81	2,29
6	SCM	127	CM	0,19	124,0	2,71	4,94	1,30
6	KLB	186	L2	0,25	189,1	3,97	6,52	2,71
7	KLB	170	L1	0,22	168,4	3,28	5,91	1,98
7	SCM	127	CM	0,21	128,1	2,81	4,96	1,34
7	KLB	229	L2	0,30	224,2	4,80	6,41	2,96
8	KLB	205	L1	0,26	203,6	3,57	6,82	2,08
8	SCM	127	CM	0,20	127,1	2,72	4,94	1,34
8	KLB	205	L2	0,27	204,6	3,88	6,92	2,21
9	KLB	205	L1	0,27	204,6	3,71	6,80	2,28
9	SCM	127	CM	0,20	128,1	2,96	5,12	1,34
9	KLB	205	L2	0,27	198,4	3,45	6,71	1,99
10	KLB	205	L1	0,27	206,7	3,84	6,89	2,33

Muestra	Acabado	Gramaje (g/m ²)	Tipo de papel	Calibre (mm)	Peso básico (g/m ²)	SCT - CD (KN/m ¹)	SCT-MD (KN/m ¹)	RCT-MD (KN/m ¹)
10	SCM	127	CM	0,20	124,0	2,85	5,05	1,39
10	WTL	205	L2	0,24	198,4	3,49	6,10	2,13
11	KLB	205	L1	0,27	206,7	3,81	6,70	2,39
11	SCM	127	CM	0,21	132,3	2,74	5,14	1,26
11	WTL	205	L2	0,24	201,5	3,41	6,70	2,08
12	KLB	205	L1	0,29	202,5	3,90	7,09	2,34
12	SCM	127	CM	0,21	127,1	2,73	4,98	1,26
12	KLB	186	L2	0,24	185,0	3,79	6,52	2,44
13	KLB	205	L1	0,26	195,3	3,67	7,08	2,39
13	SCM	127	CM	0,20	129,2	2,77	5,03	1,31
13	KLB	186	L2	0,25	183,9	3,63	6,18	2,33
14	KLB	205	L1	0,26	200,5	3,77	7,17	2,40
14	SCM	127	CM	0,21	127,1	2,83	5,15	1,30
14	WTL	205	L2	0,24	204,6	3,45	7,11	2,08
16	KLB	205	L1	0,31	203,6	3,89	6,65	2,28
16	SCM	127	CM	0,18	119,9	2,53	5,01	1,32
16	KLB	205	L2	0,31	205,6	3,61	7,17	2,28
17	KLB	205	L1	0,29	199,4	3,64	6,67	2,29
17	SCM	127	CM	0,20	124,0	2,76	5,01	1,32
17	KLB	205	L2	0,29	206,7	3,66	6,67	2,29
18	KLB	205	L1	0,29	205,6	3,78	7,08	2,35
18	SCM	127	CM	0,20	126,1	2,71	5,15	1,30
18	KLB	205	L2	0,30	197,4	3,70	6,75	2,34
19	KLB	205	L1	0,34	199,4	3,59	7,05	2,23
19	SCM	146	CM	0,25	142,6	2,63	4,13	1,29
19	KLB	205	L2	0,34	199,4	3,49	6,85	2,14
20	KLB	205	L1	0,32	201,5	3,69	7,35	2,36
20	SCM	146	CM	0,23	149,8	3,02	4,69	1,58
20	WTL	205	L2	0,25	201,5	3,53	6,67	2,22
21	KLB	205	L1	0,33	200,5	3,78	6,98	2,34
21	SCM	146	CM	0,23	155,0	2,93	4,70	1,48
21	KLB	205	L2	0,32	202,5	3,80	7,71	2,43
22	KLB	205	L1	0,28	205,6	3,73	6,93	2,33
22	SCM	127	CM	0,21	129,2	2,71	5,14	1,28
22	KLB	205	L2	0,31	210,8	3,94	7,10	2,35
23	KLB	205	L1	0,30	201,5	3,60	6,92	2,28
23	SCM	146	CM	0,23	152,9	2,96	4,86	1,43
23	KLB	205	L2	0,34	205,6	4,10	6,34	2,41
24	KLB	205	L1	0,30	212,9	3,92	7,17	2,42
24	SCM	146	CM	0,23	149,8	2,84	5,02	1,47
24	KLB	205	L2	0,29	211,8	4,22	6,62	2,64
25	KLB	205	L1	0,28	202,5	4,02	6,93	2,28

Muestra	Acabado	Gramaje (g/m ²)	Tipo de papel	Calibre (mm)	Peso básico (g/m ²)	SCT - CD (KN/m ¹)	SCT-MD (KN/m ¹)	RCT-MD (KN/m ¹)
25	SCM	127	CM	0,20	129,2	2,70	5,01	1,33
25	KLB	205	L2	0,29	206,7	3,88	6,77	2,43
27	KLB	205	L1	0,30	208,7	4,03	7,19	2,53
27	SCM	127	CM	0,21	131,2	2,93	5,02	1,38
27	WTL	205	L2	0,22	197,4	3,41	6,18	1,67

Tabla 7. Datos de la medición del SCT y ECT por cada unidad de prueba.

Muestra	Combinación	SCT, L1 (lbf/in)	SCT, CM (lbf/in)	SCT, L2 (lbf/in)	ECT, calc (lbf/in)	ECT, real (lbf/in)
1	205-127-205	22,6	16,4	22,6	68,8	49,3
2	205-127-205WTL	21,7	16,5	19,5	64,9	46,0
3	205-127-205	21,3	16,1	21,5	65,9	47,0
4	205-127-205	22,0	15,7	21,7	66,2	47,0
8	205-127-205	20,4	15,5	22,2	64,8	46,0
9	205-127-205	21,2	16,9	19,7	65,2	46,3
10	205-127-205WTL	21,9	16,2	19,9	65,2	46,3
11	205-127-205WTL	21,8	15,6	19,5	63,7	45,3
12	205-127-186	22,2	15,6	21,6	66,2	47,0
13	205-127-186	21,0	15,8	20,7	64,4	45,7
14	205-127-205WTL	21,5	16,2	19,7	64,5	45,7
16	205-127-205	22,2	14,4	20,6	63,5	45,0
17	205-127-205	20,8	15,8	20,9	64,3	45,7
19	205-146-205	20,5	15,0	19,9	62,0	43,7
20	205-146-205WTL	21,1	17,3	20,2	66,0	46,7
21	205-146-205	21,6	16,7	21,7	67,4	48,0
22	205-127-205	21,3	15,5	22,5	66,0	46,3
24	205-146-205	22,4	16,2	24,1	69,8	49,7
25	205-127-205	22,9	15,4	22,1	67,2	48,0
27	205-127-205WTL	23,0	16,7	19,5	66,5	47,2

Tabla 8. Comparación entre los métodos de medición de la resistencia a la compresión del papel.

Muestra	Tipo de papel	Acabado	Gramaje (g/m ²)	SCT (lbf/in)	RCT (lbf/in)
1	CM	SCM	127	16,4	7,6
1	L2	KLB	205	22,6	14,1
1	L1	KLB	205	22,6	14,3
2	CM	SCM	127	16,5	8,2
2	L2	WTL	205	19,5	12,1
2	L1	KLB	205	21,7	13,9
3	CM	SCM	127	16,1	7,8
3	L1	KLB	205	21,3	12,7

Muestra	Tipo de papel	Acabado	Gramaje (g/m²)	SCT (lbf/in)	RCT (lbf/in)
3	L2	KLB	205	21,5	13,9
4	CM	SCM	127	15,7	7,3
8	CM	SCM	127	15,5	7,6
8	L1	KLB	205	20,4	11,9
9	L2	KLB	205	19,7	11,4
9	L1	KLB	205	21,2	13,0
10	CM	SCM	127	16,2	7,9
10	L2	WTL	205	19,9	12,2
10	L1	KLB	205	21,9	13,3
11	CM	SCM	127	15,6	7,2
11	L2	WTL	205	19,5	11,9
11	L1	KLB	205	21,8	13,6
12	CM	SCM	127	15,6	7,2
12	L2	KLB	186	21,6	13,9
13	CM	SCM	127	15,8	7,5
13	L2	KLB	186	20,7	13,3
14	CM	SCM	127	16,2	7,4
14	L2	WTL	205	19,7	11,9
14	L1	KLB	205	21,5	13,7
16	L2	KLB	205	20,6	13,0
17	CM	SCM	127	15,8	7,5
17	L2	KLB	205	20,9	13,1
17	L1	KLB	205	20,8	13,1
19	CM	SCM	146	15,0	7,4
19	L2	KLB	205	19,9	12,2
19	L1	KLB	205	20,5	12,7
20	CM	SCM	146	17,3	9,0
20	L2	WTL	205	20,2	12,7
20	L1	KLB	205	21,1	13,5
21	CM	SCM	146	16,7	8,4
21	L1	KLB	205	21,6	13,4
21	L2	KLB	205	21,7	13,8
22	CM	SCM	127	15,5	7,3
22	L1	KLB	205	21,3	13,3
24	CM	SCM	146	16,2	8,4
24	L1	KLB	205	22,4	13,8
25	CM	SCM	127	15,4	7,6
25	L2	KLB	205	22,1	13,9
27	CM	SCM	127	16,7	7,9
27	L1	KLB	205	23,0	14,5

Nota: en la tabla 7 y 8 se muestran los valores de SCT en dirección transversal a las fibras.