

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES
BACHILLERATO EN INGENIERÍA DE LOS MATERIALES CON ÉNFASIS EN MICROELECTRÓNICA
PRÁCTICA DIRIGIDA

BOSTON SCIENTIFIC

COMPORTAMIENTO MECÁNICO, TÉRMICO Y VIBRACIONAL DE CAJAS DE
DISPOSITIVOS MÉDICOS PARA LA ESTIBACION MÁS ALTA

REALIZADO POR:	Estephanie Gómez Ramírez
PROFESOR GUIA:	Dr. Ingeniero Bruno Chiné Polito
PROFESOR LECTOR:	MSc. Ingeniero Ricardo Esquivel Isern
ASESOR INDUSTRIAL:	MSc. Ingeniera Lady Calvo Quirós

JUNIO 2015

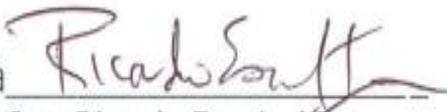
ACTA DE ENTREGA DEL INFORME FINAL DE LA PRÁCTICA DIRIGIDA

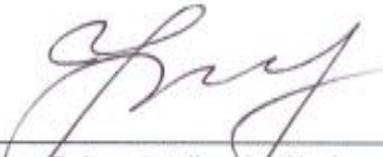
Se certifica que se ha recibido el Informe Final de la Práctica Dirigida, realizada por la estudiante Estephanie Gómez Ramírez, carné 200969457, la cual se titula: "Comportamiento mecánico, térmico y vibracional de las cajas de dispositivos médicos para la estibación más alta" y que se realizó en Boston Scientific en el I Semestre de 2015.

La Práctica Dirigida es un requisito académico del Programa de Bachillerato en Ciencia e Ingeniería en Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

firma 
Dr. Ing. Bruno Chiné Polito
Profesor Guía

firma 
Estephanie Gómez Ramírez
Estudiante

firma 
MSc. Ing. Ricardo Esquivel Isern
Profesor Lector

firma 
MSc. Ing. Galina Pridbaylo Chekan
Director Escuela de Ciencia e
Ingeniería de los Materiales

Cartago, 23 de Junio de 2015

Agradecimientos

Profesores de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por sus asesorías en el proyecto.

Empresa Boston Scientific por permitirme colaborar en el proyecto "100 Inches Pallet", con el cual desarrollé mi práctica profesional.

Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el préstamo del equipo y al técnico Ángel Navarro encargado de las pruebas realizadas.

Índice General

Acta de aprobación o de Defensa Pública.....	ii
Agradecimientos	iii
Índice General	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
I. Introducción	9
A. Empresa.....	9
B. Descripción del Proyecto.....	9
C. Justificación.....	10
D. Objetivos.....	10
E. Alcances y limitaciones	11
II. Marco Teórico.....	12
A. Generalidades del cartón corrugado.....	12
B. Resistencia de materiales aplicado al cartón corrugado.....	16
C. Modelación y Simulación.....	26
III. Metodología	28
A. Pruebas de Compresión	28
B. Modelación y Simulación.....	30
C. Modelo analítico.....	31
IV. Análisis de Resultados.....	38
A. Pruebas Experimentales de compresión.....	38
B. Resultados del modelo analítico.....	41
C. Análisis de fallas observados en las pruebas	42
D. Modelaciones y Simulaciones.....	45
IV. Conclusiones.....	50
V. Recomendaciones	52
Vi. Referencias Bibliográficas	53
VII. Anexos.....	56
A. Cálculo de Módulo de Young	56
B. Cálculo de compresión. Temperatura y vibraciones	61
C. Pruebas Experimentales de compresión.....	62

Índice de Tablas

Tabla 1 Grosos de flauta según norma ASTM D4727.....	13
Tabla 2 Mediciones de parámetros elásticos.....	19
Tabla 3 Factor de corrección de la humedad.....	15
Tabla 4 Medición de espesores de la caja.....	135
Tabla 5 Área de sección transversal.....	14
Tabla 6 Factores de amortiguación por caja	15
Tabla 7 Resumen de la fuerza máxima obtenida por caja.....	39
Tabla 8 Valores de fuerza máxima y módulo de Young	141
Tabla 9 Resultados del método analítico	41
Tabla 10 Valores de esfuerzo y deformación caja 1	57
Tabla 11 Valores de esfuerzo y deformación caja 2	14
Tabla 12 Valores de esfuerzo y deformación caja 3	159
Tabla 13 Masa por cajas y cantidad de niveles aumentados por estiba.....	13
Tabla 14 Valores numéricos del factor térmico	14
Tabla 15 Términos de la ecuación del estado vibracional	62
Tabla 16 Constantes utilizadas en la modelación de compresión.....	15

Índice de Figuras

Figura 1. Tipos de cartón corrugado según su geometría.	13
Figura 2. Proceso de fabricación de cartón corrugado	14
Figura 3. Proceso de adherencia entre la flauta y la pared.	15
Figura 4. Geometría del cartón corrugado	16
Figura 5. Curva de esfuerzo (tensión) y deformación.	18
Figura 6. Coeficiente de Poisson,	18
Figura 7. Criterio de falla Tsai-Wu;	20
Figura 8. Efecto de las vibraciones en las cajas	22
Figura 9. Comportamiento de un resorte para oscilación armónica.	23
Figura 10. Gráfica del movimiento oscilatorio subamortiguado.....	24
Figura 11. Partes del amortiguador de un sistema de transporte	24
Figura 12. Tabla de Grados de viscosidad respecto a la temperatura.	25
Figura 13. Coeficiente IRI dependiente del estado de las carreteras.	26
Figura 14. Resultados del parámetro IRI por provincia.....	26
Figura 15: Porción del cartón corrugado y mallado del mismo	27
Figura 16: Fenómenos considerados en el estudio	28
Figura 17. Equipo utilizado en las pruebas de compresión.....	28
Figura 18. Tipos de cajas utilizadas en el análisis.....	29
Figura 19. Dirección del Eje Z para el modelo analítico.....	34
Figura 20. Área de sección transversal.....	34
Figura 21: Muestra del estado de carreteras	35
Figura 22: Vehículo de transporte.....	36
Figura 23. Especificaciones de las llantas comerciales	37
Figura 24: Curvas de Fuerza y Posición, caja 1	38
Figura 25. Curvas de Fuerza y Posición, caja 2	39
Figura 26. Curvas de Fuerza y Posición, caja 3	39
Figura 27. Daños presentados en las cajas, posterior a las pruebas	43
Figura 28. Tapas de las cajas selladas	43
Figura 29. Espacio entre las tapas de las cajas	44
Figura 30. Daño entre flauta y las capas	44
Figura 31. Campo Vectorial de la Compresión.....	45
Figura 32. Distribución de las deformaciones en dirección y	45
Figura 33. Falla de caja en las pruebas de compresión.....	46
Figura 34. Distribución de la temperatura en la caja 1	46
Figura 35. Distribución de la fuerza en la caja 2	47
Figura 36. Deformaciones en el eje Y	47
Figura 37. Gradiente de temperatura en la caja 2	48
Figura 38. Vista lateral de la caja 3 sin deformar	49
Figura 39. Deformaciones de la caja 3 en el plano XY	49
Figura 40. Gráfico de Esfuerzo y Deformación, caja 1	55
Figura 41. Gráfico de Esfuerzo y Deformación, caja 2	56
Figura 42. Gráfico de Esfuerzo y Deformación, caja 3	56
Figura 43. Interfaz gráfica de la modelación de compresión.	63
Figura 44. Interfaz de la modelación térmica en solid works.....	64

Resumen

El siguiente proyecto fue desarrollado en la empresa Boston Scientific en su planta del Coyol de Alajuela, propuesto por el departamento de empaque y etiquetado.

Consiste en la estibación más alta de cajas, con el fin de producir mayor cantidad de productos terminados y empacados hacia la esterilización, además, de aprovechar el espacio de las cámaras que llevan a cabo el proceso.

El departamento de empaque y etiquetado, realizó un estudio de las ganancias que el proyecto podría generar, se estima un ahorro anual de aproximadamente un millón de dólares anuales. No obstante, se requiere definir si las cajas soportan la carga adicional debido a la estiba más alta.

Se realizaron pruebas experimentales de compresión a tres cajas del producto snares de la unidad de producción Polypectomy and Special Devices, se resolvió un modelo analítico considerando cuatro variables: la temperatura, humedad, peso y transporte. Además de una modelación en el software educacional de Solidworks.

Se concluyó que las cajas resisten el peso con un factor de 2 para la tercer caja, de 4 para la primera caja y de 6 para la segunda caja. Además, se encontraron problemas de diseño y de adherencia entre las cajas. El análisis de modelación en esfuerzo compresivo comprobó los resultados experimentales obtenidos por las pruebas realizadas.

Abstract

This project was developed in the company of Boston Scientific Coyol plant, proposed by the Department of packaging and labeling manufacturing engineering. It consists of the highest stowage boxes to produce more finished and packed into sterilization in order to approach the maximum quantity of the space in sterilization chambers that perform the process products.

The economically studies of savings were performed by industrial engineers in packaging and labeling department, this project has savings of approximately one million dollars annually. However, it is required to define if the boxes support the additional load due to the higher stowage.

Three boxes of snares product from Polypectomy and Special Devices were performed an experimental compression tests were performed, an analytical model considering four phenomena, temperature, humidity, weight and transportation she resolved. Besides a computer modeling in SolidWorks.

It was concluded that boxes resist the overweight with a safety factor of 2 for third box, 4 in the case of the first box and 6 for second box. In addition, it was found some problems in boxes design and bonding between the layers of the material. In the analytical model forces due to temperature and vibrations were almost negligible. The modelation of compressive stress had proved the results obtained by experimental testing, it showed the zones with more danger of failure.

I. INTRODUCCIÓN

A. Empresa

Boston Scientific es una empresa privada que se dedica a la manufactura de dispositivos médicos, su misión se define como *"La transformación de vidas mediante soluciones médicas innovadoras que mejoran la salud de los pacientes alrededor del mundo"*. Se instaló en Costa Rica desde el año 2004, en Heredia. En el 2009 abre su segunda planta en Coyol. Actualmente, la empresa se audita todos los años con el fin de mantener y mejorar sus estándares de calidad, recientemente, ha sido reconocida con medalla de Bronce Shingo a la excelencia operativa. Como parte de la política de calidad de la empresa se desarrollan proyectos tanto de mejora de producción, calidad, reducción de costos, mejoras de diseño, entre otros.

B. Descripción del problema

El proyecto está enfocado en el área de empaque, se pretende estibar una mayor cantidad de cajas para aprovechar el espacio que las cámaras de esterilización del proceso posterior, disminuir costos y con ello que se incremente la cantidad de dispositivos terminados para ser entregados al cliente.

En la primera etapa de la investigación, se escogieron trece diferentes configuraciones geométricas de cajas que pertenecen a tres familias de productos Gastroenterology Biopsy Forceps (GBF), Snares y Guidewires (GW). Se realizó un estudio de factibilidad económica y determinaron que estibar una cantidad mayor de cajas verticalmente representa un ahorro aproximado de un millón de dólares anuales.

Por consiguiente, para desarrollar el proyecto se requiere determinar si el material de las cajas de cartón corrugado resiste el peso adicional, sin que se

comprometa la calidad del dispositivo médico que resguardan, ya que esa es la prioridad de la empresa es el paciente y la calidad de su producto.

C. Justificación

Actualmente, la cantidad de niveles de cajas estibadas tiene una altura que desaprovecha el espacio en la cámara de esterilización, al apilar la mayor cantidad de cajas posibles se esteriliza más producto en cada ciclo del proceso, de esta manera aumenta la productividad, pues se tienen mayor cantidad de productos terminados en el mismo proceso de esterilización. En consecuencia, se genera un aumento del producto termina que repercute positivamente en la eficiencia del proceso.

La empresa que se encarga del proceso de esterilización obtiene sus ganancias a partir de la cantidad de procesos que tenga que realizar y no de la cantidad de unidades en la cámara, por lo tanto, esto representa un ahorro económico importante para Boston Scientific.

D. Objetivos del Estudio

Objetivo General

- Identificar el comportamiento del material ante la compresión, vibración y temperatura que soportan los empaques durante el proceso de transporte, esto relacionado con el tiempo de exposición y la geometría del material.

Objetivos Específicos

- Documentar las medidas reales de los empaques, la configuración geométrica así como el peso de la carga.
- Estimar mediante pruebas experimentales de compresión, el máximo valor de esfuerzo que las cajas de cartón corrugado soportan.

- Elaborar una simulación que permita conocer cómo se distribuyen dichos fenómenos físicos en el material y cómo pueden influir en la deformación del empaque.
- Establecer mediante los resultados obtenidos de la simulación, si es factible estibar dichos empaques sin que comprometa la calidad del producto que contienen.

E. Alcances y limitaciones

Las proyecciones económicas futuras del proyecto representan un ahorro para la empresa, si el material soporta el peso adicional generado a partir de la estibación, se procede a realizar la validación del material, que posteriormente el departamento de investigación y desarrollo, evalúa y comprueba que los resultados sean confiables para continuar con la siguiente etapa del proceso.

Paralelamente, los resultados teóricos de las simulaciones pueden ser comparados con las pruebas experimentales de compresión lo que ofrece un valor agregado al proyecto, ya que se puede comparar la diferencia entre ambas aproximaciones. Mediante la modelación, se pueden considerar otros factores como los cambios de temperatura y las vibraciones causadas por el transporte, esto representa un escenario que considera las variables más importantes que pueden sensibilizar el material, lo que genera mayor nivel de confianza en los resultados que se obtengan.

Debido al sistema de evaluación que Boston Scientific utiliza para este tipo de proyectos, la implementación de un cambio en la estibación de cajas, no es un proceso a corto plazo. Al determinar si la caja resiste el peso adicional; se continúa con la validación del proceso de esterilización, ya que al ingresar mayor cantidad de empaques a la cámara implica un incremento en el tiempo de esterilización. Por lo tanto, este proyecto no va a ser implementado a penas concluya.

Además, debido al tiempo otorgado para la práctica profesional, no es posible realizar el estudio para las 13 configuraciones geométricas, sino únicamente para tres cajas del producto Snares.

II. Marco Teórico

A. Generalidades del cartón Corrugado

1. Cartón Corrugado

El cartón corrugado se puede definir según la Norma ASTM D966 "Material más pesado y grueso que el papel, el cual contiene mejores propiedades mecánicas como resistencia al desgarro y mayor rigidez", esta misma norma establece que el grosor mínimo a considerar para un cartón corrugado es de 0.25mm. Según Emblem (2012), su origen data del siglo XIX en Estados Unidos, con pequeñas empresas que fabricaban el material con principalmente agua, lo que generaba grandes retrasos en la producción, debido al secado. No obstante, el primer avance se realiza en 1937 cuando se introduce el método Stein Hall, que consiste en agregar un adhesivo proveniente del almidón que aglutinaba la mezcla, lo que permitía un secado más rápido y mayor productividad.

La materia prima del cartón es el papel kraft, de acuerdo con McGuire (2008) en la primera etapa del proceso se obtienen las fibras de la madera conocidas como ligninas. Las cuales se llevan a temperatura entre (300-360) °C y presiones de (1000-1200) kPa en condiciones ácidas con un pH de 2 a 4, que se logra mediante el uso de un medio sulfatos, dentro de un digestor.

1.1 Tipos de cartón corrugado

De acuerdo con la figura 1, se puede observar dos tipos de cartón corrugado, el de pared simple (1.a) y la doble pared (1.b), en algunos casos dependiendo de los requerimientos cliente se fabrican corrugados hasta triple pared.

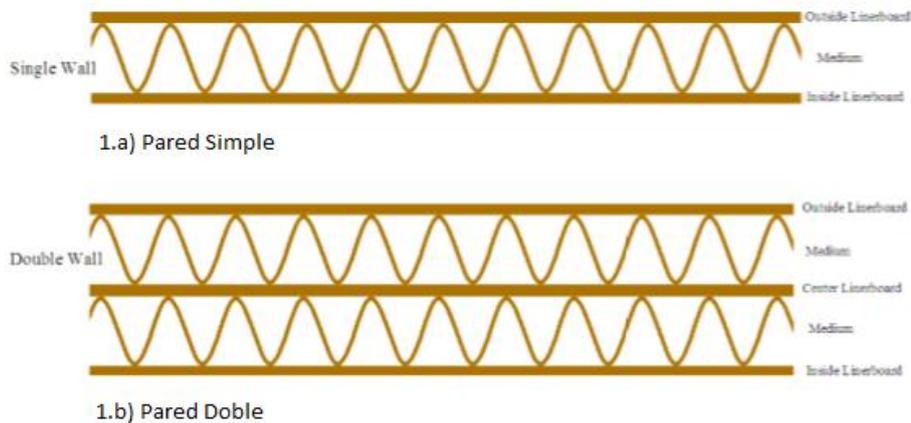


Figura 1. Tipos de cartón corrugado según su geometría.

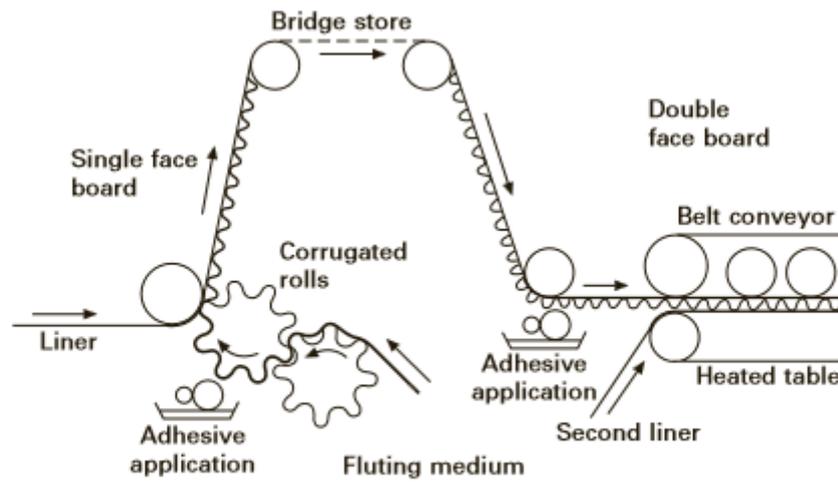
Independientemente de la cantidad de paredes que tenga, el cartón corrugado tiene tres partes principales “outside linerboard” o línea exterior, una “inside liner” un línea interior y una flauta que es el material corrugado que está en medio de las dos capas.

De acuerdo con la norma ASTM D4727 el cartón corrugado puede dividirse por la clase según la función que cumpla; resistente al clima, doméstico, y resistente al agua y el vapor de agua. Además, se puede clasificar según la variedad, sea pared simple, doble pared y triple pared. No obstante, por las partes que conforman las cajas, la división más importante es la que tiene relación con las flautas, la cantidad de flautas por metro y la altura de las mismas, las cuales se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Grosos de Flauta según norma ASTM D4727

Flauta	Flautas/metro	Altura de flauta (mm)
A	98-128	4.00-5.61
B	147-174	2.00-2.80
C	115-148	3.30-4.00
E	229-324	1.13-1.40

1.2 Proceso Industrial del cartón corrugado



11.2 Corrugating machine.

Figura 2. Proceso de fabricación de cartón corrugado

A partir de la figura 2, se muestra un diagrama del proceso y sus partes principales. Se inicia con una lámina lisa de papel kraft cuyas dimensiones pueden variar dependiendo del tamaño de la caja que se requiera. La lámina del centro que es la flauta, generalmente, está conformada por una parte de papel reciclado, con el fin de que el material sea más suave y maleable. En la primera etapa, se ingresa la lámina por una especie de engranajes que se le conocen como corrugadores, de esta manera, la lámina obtiene su aspecto ondulado, luego se le agrega un adhesivo que va a permitir que se junte con las paredes.

El adhesivo más utilizado en los cartones corrugados son aquellos con base en almidón y agua. Cuando la flauta está lista, se le agrega el adhesivo; en la línea del proceso se le agrega una lámina lisa y un rodillo aplica presión para que se unan. Es común, que se aumente la temperatura para provocar el adhesivo tenga un secado más rápido. Para la segunda pared, se realiza el mismo procedimiento, la diferencia es que se utilizan más cilindros en un "belt conveyor" que es como un transportador con correas que por dentro tiene los cilindros que aplican

presión. En la figura 3 se muestra el proceso de adherencia entre la flauta y la pared.

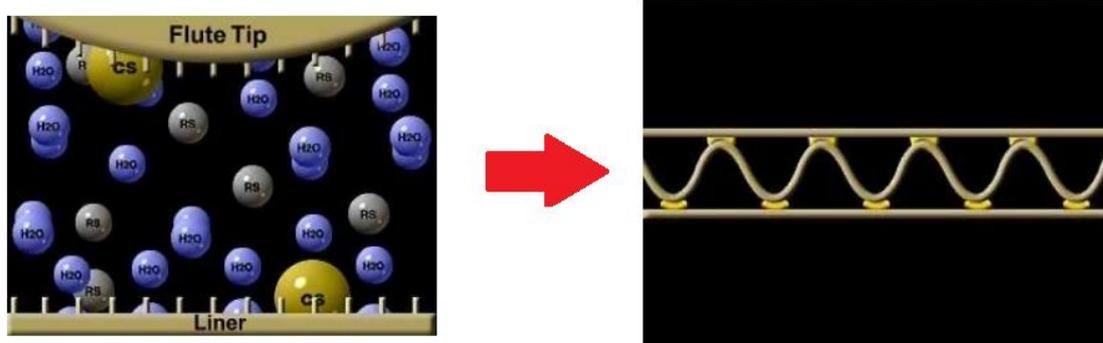


Figura 3. Proceso de adherencia entre la flauta y la pared.

Se debe mencionar la importancia del adhesivo y las variables que involucra en el proceso. La temperatura a la cual se calienta el adhesivo debe permitir una uniformidad en la unión; otro factor es la viscosidad si es muy alta no introduciría el papel, o por el contrario si la viscosidad sea muy baja puede humedecer el papel más de lo que se debe. Además, se debe controlar la humedad relativa en la que se realiza el proceso, ya que existe la posibilidad de que residan burbujas atrapadas que comprometan la estructura del cartón corrugado. Marquin Word United (2011).

1.3 Propiedades y geometría del material

La característica principal del cartón corrugado es que es un material ortotrópico, es decir, las propiedades mecánicas varían según sea la dirección perpendicular que se esté analizando. Las paredes lisas le otorgan resistencia a la flexión, mientras que la flauta le provee cierta rigidez al esfuerzo cortante. Aboura (2004).

En la figura 4, se muestra una sección geométrica cartón. La dirección MD corresponde a "Machine Direction" que es la dirección del corrugado y CD "Cross Direction" es la dirección transversal. El término λ_{core} es la longitud de onda de la flauta y h_{core} es la altura de la flauta, el grosor de la flauta se denomina $d_{fluting}$.

Por su parte d_{liner} es el grosor de las capas y el grosor total del cartón viene dado por la ecuación 1. Niskanen (2011).

$$d_{corr} = 2d_{liner} + h_{core} \text{ (Ec. 1)}$$

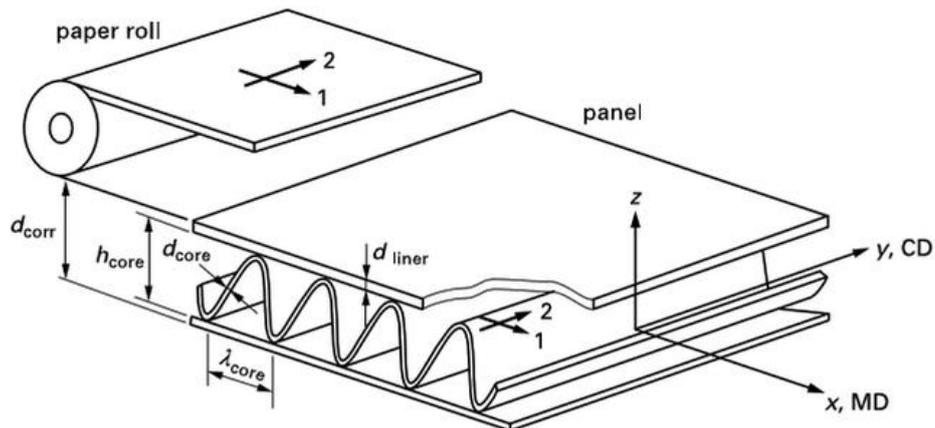


Figura 4. Geometría del cartón corrugado

B. Resistencia de materiales aplicados al cartón corrugado

El cartón corrugado tiene la función de proteger y transportar el producto que contiene hacia el cliente, como tal está expuesto continuamente a fenómenos físicos que prueban la capacidad del material a resistir el daño.

Debido a que el material es ortotrópico es de esperarse que el material soporte mayor esfuerzo en una dirección en comparación con las otras dos. Por lo tanto, su módulo de elasticidad así como su coeficiente de Poisson son determinados por la dirección en la que se aplica la fuerza.

2.1 Compresión

La fuerza que actúa perpendicularmente al área se denomina fuerza normal, la cual se debe a fuerzas externas ya sea que empujan (compresión) o jalan el

cuerpo (tensión). Al tener una fuerza aplicada que comprime el material y si esta fuerza se divide entre el área transversal, se obtiene el esfuerzo como se ve en la ecuación 2. Hibbeler (2006).

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ (Ec. 2)}$$

La deformación de un material ocurre cuando la fuerza aplicada sobre él, es lo suficientemente grande para que el material falle, entonces corresponde a una relación entre la longitud que el material tiene inicialmente y la longitud que tiene al final después de la aplicación de la fuerza; esto se observa en la ecuación 3.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \text{ (Ec. 3)}$$

De acuerdo con la ecuación 3, la deformación es una cantidad adimensional donde se divide el cambio de la longitud antes y después de la aplicación de la fuerza entre la longitud inicial.

El material se comporta linealmente, cuando se cumple que a mayor cantidad de esfuerzo, existe mayor deformación; como muestra la ecuación 4.

$$\sigma = E\epsilon \text{ (Ec. 4)}$$

La constante de proporcionalidad E, se conoce como módulo de elasticidad o módulo de Young, viene dado en unidades de MPa y se obtiene como el valor de la pendiente lineal de la función obtenida al relacionar el esfuerzo aplicado con la deformación, según la figura 5. La constante se puede definir como la pendiente de la función lineal entre esfuerzo y deformación, en el rango elástico del material, en el cual si la fuerza aplicada se eliminara el material vuelve a su estado inicial. Matemáticamente, se infiere que a un mayor valor numérico del módulo de Young, el material es más rígido lo que significa que tiene menor deformación. Callister (2002).



Figura 5. Curva de esfuerzo (tensión) y deformación.

El coeficiente de Poisson es otra característica que se debe definir al estudiar la compresión ya que se define como una constante elástica, que relaciona la deformación transversal entre la deformación axial. Según la figura 6, es un grado de estrechamiento al aplicar una fuerza. Vélez (2005).

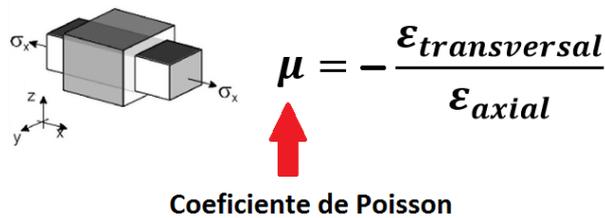


Figura 6. Coeficiente de Poisson,

El coeficiente es adimensional, pues es la división de dos deformaciones una transversal y la otra axial, si el coeficiente de Poisson es cercano a 1, significa que la deformación transversal es más representativa que la axial; por el contrario, si la deformación axial es muy alta, entonces el coeficiente tiende a cero. Al tener un material ortotrópico, existe un coeficiente de Poisson para cada dirección de deformación. No obstante, se obtiene igualdades matemáticas en ciertas direcciones, como se observa en la ecuación 6.

$$\frac{\mu_{yx}}{E_y} = \frac{\mu_{xy}}{E_x}; \frac{\mu_{zx}}{E_z} = \frac{\mu_{xz}}{E_x}; \frac{\mu_{yz}}{E_y} = \frac{\mu_{zy}}{E_z} \quad (Ec. 5)$$

También, es necesario definir el módulo de cizallamiento que se denota con la letra G y cuyas unidades son de presión. Consta en la relación entre el esfuerzo y la deformación de corte, como se observa en la ecuación 5. Colliou (1997).

$$G = \frac{\text{Tensión tagencial}}{\text{deformación de corte}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Según investigaciones previas, se han obtenido constantes elásticas, que se resumen en la tabla 2. El paperboard corresponde a la materia prima de la cual están hechas cajas y el cartón se refiere a la cajas como tal. Niskanen (2012)

Tabla 2. Mediciones de parámetros elásticos a partir de esfuerzos tensiles

Propiedad	Paperboard (Persson, 1991)	Carton (Baum, 1987)
Densidad (kg/m ³)	640	780
MD, módulo E _x (MPa)	5420	7440
CD, módulo E _y (MPa)	1900	3470
Coefficiente Poisson μ _{xy}	0.38	0.15
Coefficiente Poisson μ _{xz}	-2.2*	0.008
Coefficiente Poisson μ _{yz}	0.54	0.21
Módulo de cizalladura G _{xy} (MPa)	1230	2040
Módulo de cizalladura G _{xz} (MPa)	8.8	137
Módulo de cizalladura G _{yz} (MPa)	8.0	99

**Nota: Cuando el coeficiente de Poisson es negativo es porque el material en vez de contraerse se expande, se les denomina materiales auxéticos.*

Según Norstrand (2003), las esquinas de la caja se comportan rígidamente, en un esfuerzo de compresión lo que tiende a fallar son las paredes mientras que las esquinas se mantienen. El autor mediante el criterio Tsai-Wu, que es una predicción de falla por compresión para materiales ortotrópicos con geometrías huecas o "shells", esto considera la energía que se necesita para provocar una

distorsión en el material. Los resultados se obtuvieron por modelación, resolviendo el problema con el método de elementos finitos.

En la figura 7, se muestra la esquina de una caja y se observa que la tendencia de fallo se concentra más hacia las paredes, cabe destacar, que el mallado fue de 144 elementos, el autor consideró que si se utilizara un mallado con más nodos los resultados iban a ser más precisos y las deformaciones se concentrarían aún más en estas zonas.

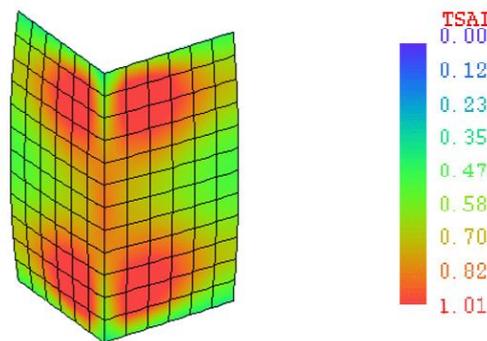


Figura 7. Criterio de falla Tsai-Wu;

2.2 Temperatura y Humedad

Según (Emblem 2012), tanto la temperatura como la humedad aunque se definen de forma diferente ambas deben analizarse conjuntamente, entre mayor sea la temperatura del aire, mayor humedad existe, incluso sin la evidencia de una condensación dentro del empaque. Desde un punto de vista microscópico, el papel como tal, está compuesto por celulosa cuando hay humedad en el ambiente, las fibras comienzan a expandirse afectando las propiedades mecánicas del material. La situación se vuelve crítica cuando el material se expone a humedades relativas que van del 40% hasta el 90%.

De acuerdo con estudios en el área de empaque de alimentos, existe un parámetro llamado permeabilidad, el cual se define como la capacidad de un material para permitir fluido pasando a través de él. Aunque el estudio se remonta a empaque de dispositivos médicos, la vida útil de la caja depende de

la permeabilidad de la misma, y el ingreso del oxígeno a través de sus paredes, lo que lo convierte en un factor crítico. La ecuación 7, calcula ese tiempo de vida útil a partir de la permeabilidad Q , el grosor del material x , la diferencia entre las presiones parciales ΔP del oxígeno dentro y fuera de la caja, el área transversal A , y la presión de vapor del agua a la temperatura de la caja P . Fellows (2009).

$$t_s = \frac{Qx}{PA\Delta P} \text{ (Ec. 7)}$$

Por su parte, los cambios de temperatura pueden originar expansión y contracciones en el material, esto viene dado por el coeficiente de expansión térmica en la ecuación 8.

$$L_f - L_i = \alpha L_i (T_f - T_i) \text{ (Ec. 8)}$$

De lo anterior, se tiene que el cambio entre la longitud final y la longitud inicial, es proporcional al coeficiente de expansión α multiplicado por la longitud inicial y la diferencia entre la temperatura inicial y final. Groover (1997)

2.3 Vibraciones

El efecto de las vibraciones tiene relación con las oscilaciones o movimientos en un punto fijo. La distancia que se mueven las cajas depende de la amplitud y las oscilaciones por segundo, se puede observar dichos efectos en la figura 8. Emblem (2012)

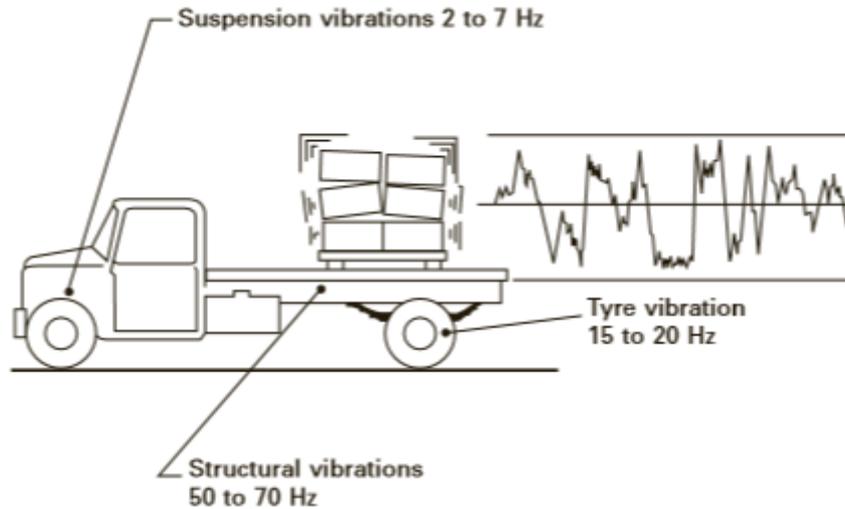


Figura 8. Efecto de las vibraciones en las cajas

Al transportar las cajas, se da un movimiento armónico amortiguado, que se debe a la resistencia del aire y la fricción. La energía se disipa en energía térmica lo que disminuye la amplitud de oscilación Giancoli (2007). Para el caso del transporte, se supone que los sistemas de suspensión deben generar un amortiguamiento crítico, en donde el equilibrio se alcanza en la mayor brevedad posible, sin embargo, en situaciones reales el sistema realiza varios balanceos antes de estabilizarse, lo que se conoce como subamortiguamiento.

La ecuación matemática que rige este fenómeno, se puede observar a partir del comportamiento de un resorte como se muestra en la figura 9, donde hay la acción de 3 fuerzas; la primera hace la masa baje, la segunda tiene relación con la constante del resorte o Ley de Hooke y la tercera es una fuerza que también se opone al movimiento, por ejemplo, una fuerza viscosa que depende de la temperatura y la presión.

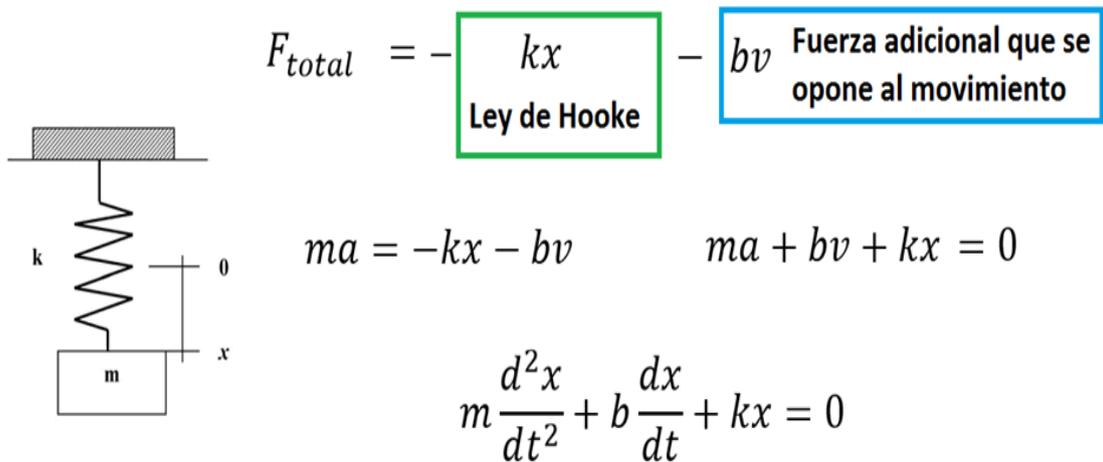


Figura 9. Comportamiento de un resorte para oscilación armónica.

Al considerar un modelo más realista del movimiento vibracional de las cajas durante el transporte; se resuelve la ecuación diferencial de la figura 9, tomando en cuenta una oscilación subamortiguada.

La ecuación 9 tiene varias constantes; A es la amplitud de la onda, γ es el factor de amortiguamiento, ω_A es la frecuencia angular, mientras que φ corresponde al ángulo de fase, y el factor cambiante es el tiempo t.

$$x(t) = Ae^{-\gamma t} \cos(\omega_A t + \varphi) \quad (Ec. 9)$$

Al graficar esa función, ocurre lo que se describió con anterioridad, al inicio del movimiento se da una oscilación grande que disminuye debido al término exponencial negativo que tiene la ecuación 9, es decir, antes que haya una estabilización completa del objeto, hay una fluctuación de oscilaciones. Ver figura 10.

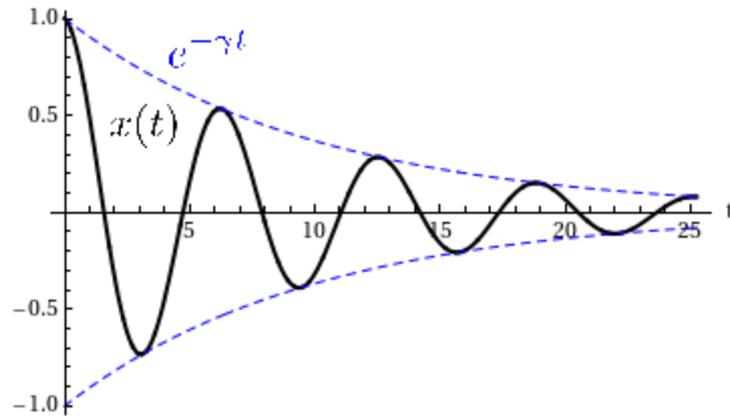


Figura 10. Gráfica del movimiento oscilatorio subamortiguado

El movimiento vibracional de las cajas depende de factores propios del transporte, por ejemplo, la frecuencia angular está relacionada con la velocidad del camión y del radio del neumático. Los tipos de llantas utilizados para el transporte de carga pesada son habitualmente las 1020 o 1022.

Los amortiguadores tienen como función absorber la energía producida por los desniveles de la carretera, reductores de velocidad, huecos, que son fluctuaciones de las cuales el amortiguador intenta que el auto se estabilice lo más rápido posible (Stone 2004), como muestra la figura 11.

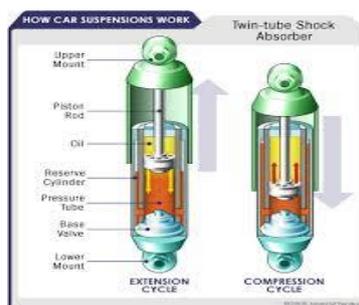


Figura 11. Partes del amortiguador de un sistema de transporte

El instituto SAE (Society of Automotive Engineers) estandariza los aceites que se utilizan para los amortiguadores, ya que la viscosidad del aceite permite frenar el movimiento producido por el rozamiento contra el pavimento, el comportamiento de la viscosidad de un fluido es dependiente de la temperatura, por ende de las condiciones ambientales, como se observa en la figura 12. SAE estratifica los

aceites a partir de grados, los que tienen agregado un W son aquellos que se utilizan en condiciones de invierno, para ambientes tropicales el aceite utilizado es de grado 50.

SAE J300 (1999) Motor Oil Grades- Low Temperature Specifications				
Grade Designation	dynamic viscosity (mPa·s)			
	Cranking Maximum	Temperature (°C)	Pumping Maximum	Temperature (°C)
0W	6,200	-35	60,000	-40
5W	6,600	-30	60,000	-35
10W	7,000	-25	60,000	-30
15W	7,000	-20	60,000	-25
20W	9,500	-15	60,000	-20
25W	13,000	-10	60,000	-15
SAE J300 (1999) Motor Oil Grades - High Temperature Specifications				
Grade Designation	kinematic viscosity (cSt)		dynamic viscosity (mPa·s)	
	low shear rate at 100 °C		high shear rate at 150 °C	
20	5.6 - 9.3		>2.6	
30	9.3 - 12.5		>2.9	
40	12.5 - 16.3		>2.9 ¹	
40	12.5 - 16.3		>3.7 ²	
50	16.3 - 21.9		>3.7	
60	21.9 - 26.1		>3.7	
¹ 0W-40, 5W-40, 10W-40				
² 15W-40, 20W-40, 25W-40				
Source: Society of Automotive Engineers (SAE), December 1999				

Figura 12. Tabla de Grados de viscosidad respecto a la temperatura.

Además, la amplitud de la onda A depende del estado de las carreteras donde circula el transporte, como la profundidad de los hundimientos o cavidades en la carretera. El laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme) realizó un estudio en el año 2008. En el cual se midió la regularidad o rugosidad de las carreteras por unidad de longitud, lo cual viene dado por el coeficiente IRI (International Roughness Index). Ver Figura 13.

En terrenos escarpados el IRI aumenta, lo que implica que los sistemas amortiguados deben absorber de manera más eficiente la energía del choque generada por las irregularidades del camino.

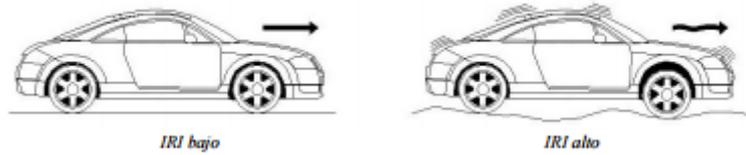


Figura 13. Coeficiente IRI dependiente del estado de las carreteras.

Fuente. Lanname, Proyecto de Evaluación Vial 2008

Los resultados del estudio se muestran en la figura 14, donde se grafica el parámetro IRI por provincia, el color rojo representa el índice de IRI más alto, Alajuela contiene mayor longitud de red vial y precisamente las carreteras con mayores irregularidades, no obstante, en la provincia de Limón presenta el menor índice IRI.

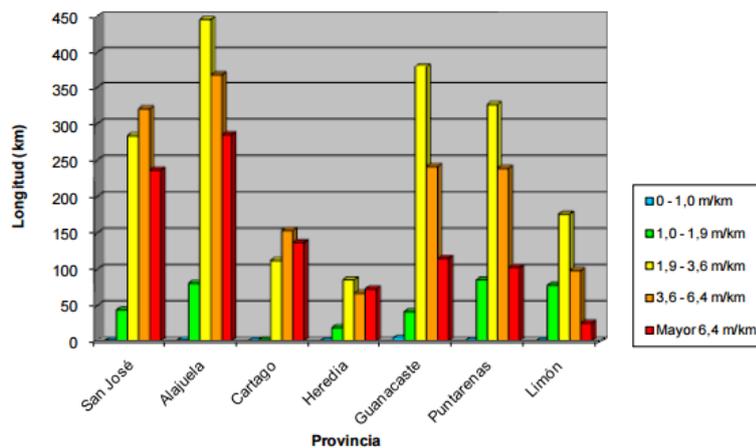


Figura 14. Resultados del parámetro IRI por provincia.

Fuente. Lanname, Proyecto de Evaluación Vial 2008

C. Modelación y Simulación

La modelación y simulación consiste en estudiar los fenómenos físicos que afectan una determinada pieza u objeto mediante métodos numéricos y resolución de ecuaciones diferenciales.

El requisito vital al realizar una modelación, es la comprensión de los fenómenos físicos involucrados; en este caso; se analiza la compresión, cambios de

temperatura y vibraciones. Para ello, es necesario definir cuáles son las variables que se requieren evaluar en el modelo y cuales factores son constantes e incluso despreciables. Asimismo, definir el tipo de estudio, si es estacionario o por el contrario, si el estudio requiere un análisis con variabilidad en el tiempo. Todo lo anterior, requiere un planteamiento de hipótesis que tiene como función delimitar el modelo que se quiere analizar.

Los resultados numéricos del modelo se obtienen mediante el método de aproximación de elementos finitos, el cual realiza un mallado sobre la superficie geométrica de la caja y para cada nodo que lo conforma resuelve la ecuación matemática del modelo, como se observa en la figura 15. Entre mayor sea la cantidad de nodos a analizar el modelo se vuelve cada vez más exacto.

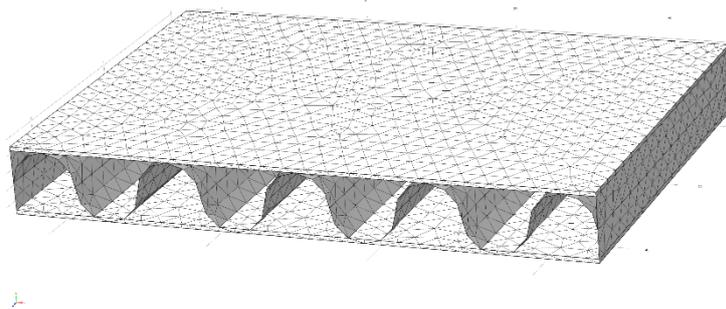


Figura 15: Porción del cartón corrugado y mallado del mismo

Para complementar la modelación se puede plantear un método analítico, en el cual se utilicen las fórmulas matemáticas de compresión, esfuerzo térmico y vibraciones, las ecuaciones no se resuelven utilizando métodos de aproximación como los elementos finitos, sino que se obtienen datos resolviendo la ecuación directamente.

Los fenómenos que se identifican en la figura 16, son los que se consideran en modelo matemático, debido son los factores con mayor posibilidad de producir un fallo estructural en el funcionamiento de las cajas.



Figura 16: Fenómenos considerados en el estudio

III. Metodología

A. Pruebas de Compresión

La norma ASTM D642, rige las condiciones de las pruebas de compresión para cajas. El equipo consiste en dos placas planas una de ellas es rígida y la otra se mueve hacia abajo. Como muestra la figura 17. El procedimiento especifica que se debe dar una precarga de 222 N para cajas de pared simple, se debe aplicar la fuerza en un movimiento continuo a una velocidad de (12.7 ± 2.5) mm/min.

El equipo utilizado es la maquina universal de ensayos de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica. La cual fue acondicionada para las pruebas, la precarga utilizada fue de 99.23 N.



Figura 17. Equipo utilizado en las pruebas de compresión.

Se realizaron las pruebas a 12 cajas, divididas en grupos de 4 las cuales corresponden a tres tipos de cajas. Ver Figura 18. Las tres cajas tienen diferente geometría, sin embargo, comparten la mismo tipo de flauta C.

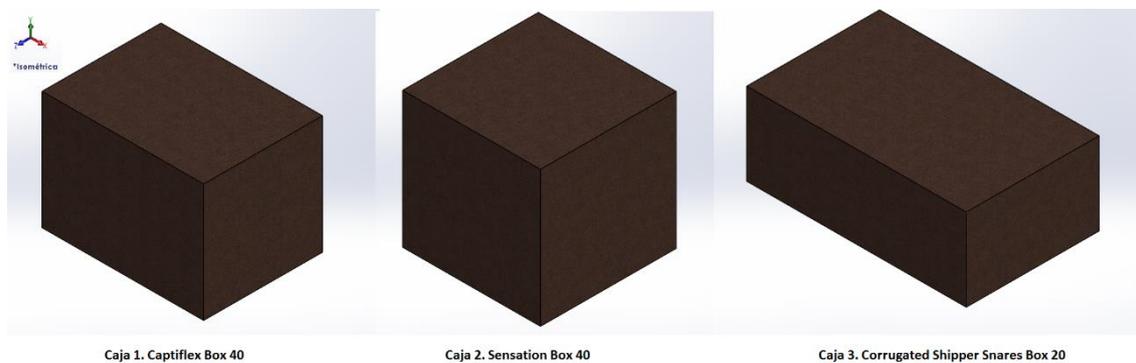


Figura 18. Tipos de cajas utilizadas en el análisis

Para tomar en cuenta la humedad, existe un factor de corrección que se multiplica por el valor de compresión encontrado experimentalmente, estos factores se muestra en la tabla 3.

Tabla 3: Factor de Corrección de Humedad.

Condición Ambiental	Factor (multiplicador)
Humedad Relativa 50%	1.0
Humedad Relativa 60%	0.9
Humedad Relativa 70%	0.8
Humedad Relativa 80%	0.68
Humedad Relativa 90%	0.48

Fuente: Goodwing 2011

B. Modelación y Simulación

Para esta etapa se utiliza el software de Solid Works, licencia educacional del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Tanto para la realización del diseño geométrico como para la modelación de las cargas.

Hipótesis del modelo

- La carga sobre las cajas es distribuida, ya que las dimensiones de los empaques son determinadas para que dentro de estos, haya una cantidad exacta de dispositivos médicos apilados de manera que no existan errores, de manera que se empaque una cantidad exacta de producto.
- Las constantes del módulo de Young se obtiene a partir de las pruebas experimentales de compresión.
- La temperatura inicial es de 30°C y la final es de 10°C, esto con el fin de asumir una situación de un cambio extremo en temperaturas, desde el transporte de las cajas desde que sale a Costa Rica a Estados Unidos donde se realiza la esterilización. Aunque se esperaría que los cambios de temperaturas sean más graduales, ya que se estima que el traslado por barco toma dos semanas aproximadamente.
- La humedad se encuentra contenida en el factor de corrección en el valor del módulo de Young experimental.
- En cuanto a las esquinas y bordes de las cajas se toman como puntos rígidos
- La geometría es tridimensional.
- Con la modelación se pretende comparar los resultados de compresión obtenidos con las pruebas experimentales.

C. Modelo Analítico

Primeramente, se definen las siguientes hipótesis del modelo. A partir de lo anterior, se resuelve las fuerzas que actúan sobre la caja a partir de la sumatoria de las variables, que se presentan en la ecuación 14.

$$F_{total} = F_{compresión} + F_{térmica} + F_{vibraciones} \quad Ec.14$$

Hipótesis

- La fuerza de compresión actúa únicamente en el eje z.
- El valor constante de Módulo de Young se toma de los resultados experimentales, que a la vez contienen el factor de corrección de la humedad.
- La resolución de la ecuación no toma en cuenta las direcciones de la fuerza, sino la magnitud.
- Al final del estudio la fuerza se divide entre el área de la sección transversal para obtener el esfuerzo y así comparar con los otros métodos.
- El transporte y las vibraciones que provocan se toma como un modelo de oscilación amortiguado.
- Las constantes son: la masa total, el coeficiente de expansión térmica, la frecuencia angular, ángulo de fase, amplitud, el módulo de Young y el factor de amortiguación.

La ecuación 14 plantea la suma de los tres factores o variables que inciden en las cajas, de ahí que corresponde encontrar la expresión matemática para cada factor: fuerza de compresión, térmica y vibracional.

Fuerza de Compresión

La fuerza de compresión se obtiene por la segunda ley de Newton donde la fuerza equivale a la masa multiplicada por la aceleración. Al estar las cajas estibadas verticalmente, la aceleración se convierte en la gravedad (9.8m/s^2)

$$F_{\text{compresión}} = \text{masa}_{\text{total}} * g \text{ [N] } \quad \text{Ec. 15}$$

Fuerza Térmica

Para este caso, es importante considerar que las cajas experimentan cambios de temperatura, por lo tanto, hay una deformación asociada que viene dado por la ecuación 16. Donde α es el coeficiente de expansión térmica, según el Handbook

of Physical Testing este tiene un valor numérico de $12.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. El ΔT es el cambio de temperaturas, inicialmente se asumió una temperatura de 303.15 K o 30°C considerando las condiciones climáticas tropicales en las que se encuentra Costa Rica en sus zonas costeras. Al llegar a Quincy en Estados Unidos, para el proceso de esterilización se consideró una temperatura de 283.15 K o 10°C.

$$\epsilon = \alpha \Delta T \quad \text{Ec. 16} \quad \text{Deformación Térmica}$$

Posteriormente, el material tiene una relación lineal entre el esfuerzo y deformación, es decir, a mayor esfuerzo compresivo aplicado existirá una mayor deformación en el material, esto se expresa según la ecuación 17

$$\sigma = E \epsilon \quad \text{Ec. 17} \quad \text{Relación Lineal entre el esfuerzo y Deformación}$$

De acuerdo con la ecuación 8, el cambio de longitud con la temperatura. La ecuación 18 es una relación entre el cambio de longitud ΔL , el módulo de Young E y el esfuerzo σ .

$$\sigma = E \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Ec. 18}$$

Posteriormente, si el esfuerzo se define como una fuerza dividida entre el área transversal, según la ecuación 2. Y la deformación se puede escribir como la ecuación 16 y a su vez representa un cambio de longitud dividida entre la longitud inicial, según la ecuación 3. Entonces se obtiene la ecuación 19.

$$\frac{F}{A} = E \frac{\alpha L \Delta T}{L} \quad \text{Ec. 19}$$

Al despejar F , se obtiene la ecuación 20 que relaciona el área transversal, el módulo de Young, el coeficiente de expansión térmica y el cambio de temperatura, dicha fuerza esta dimensionalmente dada en N.

$$F_{t\acute{e}rmica} = EA\alpha\Delta T [N] \text{ Ec. 20}$$

Fuerzas Vibracionales

El transporte de las cajas somete a las mismas a vibraciones causadas por la irregularidad superficial de las carreteras del país, que se contrarresta con los sistemas de amortiguación y suspensión de los vehículos de transporte pesado. Para desarrollar matemáticamente la expresión, se considera la ecuación 9, que es el desplazamiento, en el eje z.

$$z(t) = Ae^{-\gamma t} \cos(\omega_A t + \varphi) \text{ Ec. 9}$$

Al derivar dos veces la ecuación la ecuación de la posición o desplazamiento se obtiene la aceleración, dada por la ecuación 21.

$$a(t) = Ae^{-\gamma t} [\gamma^2 \cos \omega_A t + 2\gamma\omega \sin \omega_A t - \omega_A^2 \cos \omega_A t] \text{ Ec. 21}$$

La aceleración que genera el movimiento vibracional multiplicado por la masa total, cumple la segunda ley de Newton. Por lo tanto, la fuerza vibracional en N se rige a partir de la ecuación 22.

$$F_{vib.} = m_{total} * Ae^{-\gamma t} [\gamma^2 \cos \omega_A t + 2\gamma\omega \sin \omega_A t - \omega_A^2 \cos \omega_A t] [N] \text{ Ec. 22}$$

A partir de las ecuaciones 15, 20 y 22, cada término se sustituye en la ecuación 14. Obteniendo así la ecuación 23.

$$F_{tot} = m_{tot} * a + EA\alpha\Delta T + m_{tot.} * Ae^{-\gamma t} [\gamma^2 \cos \omega_A t + 2\gamma\omega \sin \omega_A t - \omega_A^2 \cos \omega_A t] \text{ Ec. 23}$$

Es importante aclarar que las ecuación 23 se utiliza para una sola dirección de la fuerza. Para el modelo analítico es la dirección Z del eje. La que comprende el peso de arriba que influye en la caja del fondo. Como se ve en la figura 19.



Figura 19. Dirección del Eje Z para el modelo analítico

Definición de Constantes

Área de la sección transversal

Como se muestra en la figura 20 para obtener el área de la sección transversal, el corrugado se separó de las dos capas que lo rodean, con el fin de obtener una relación matemática entre la medición corrugada y la extendida, así como el espesor de capa. Se realizaron 7 mediciones a las cajas de flauta C, cuyos resultados se muestran en la tabla 4.

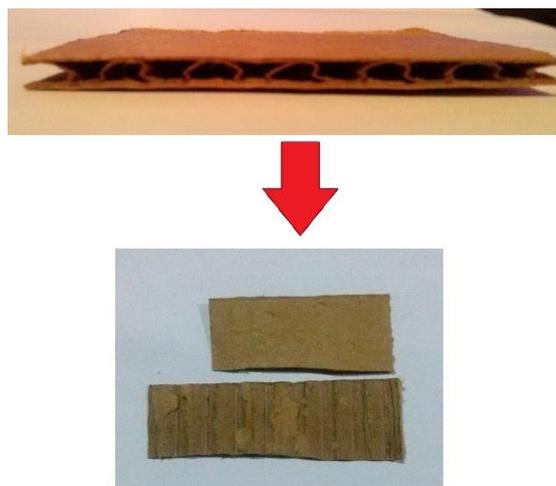


Figura 20. Área de sección transversal.

Tabla 4. Medición de espesores de las cajas

Medición	Corrugado (±1)mm	Extendido (±1)mm	Espesor corrugado (±0.01)mm	Espesor tapas (±0.01)mm	Espesor total (±0.01)mm
1	50	66	0.51	0.97	3.95
2	50	68	0.54	1.01	3.89
3	50	69	0.49	0.95	4.10
4	50	65	0.49	0.98	3.88
5	50	68	0.51	0.97	4.01
6	50	65	0.50	0.99	3.84
7	50	69	0.47	0.95	3.85

Para obtener el área de sección transversal se obtuvo el promedio de los espesores. La tabla 5 muestra el dato final de acuerdo al número de caja y su código.

Tabla 5. Áreas de sección transversal

Código	Número de caja	Longitud (mm)	Área Transversal (m ²)
90028619-01	1	397.9333	1.0433×10^{-3}
90028599-01	2	336.55	8.974×10^{-4}
90661240-01	3	418	1.0949×10^{-3}

Amplitud

Este valor depende del índice IRI que define el grado de irregularidad que tiene una carretera. Para el método analítico se toma una amplitud de 0.4 metros, que viene a representar la profundidad de un hueco o la altitud de un reductor de velocidad como muestra la figura 21.



Figura 21: Muestra del estado de carreteras

Coefficiente de Amortiguación

Se obtiene a partir de la ecuación 24, donde b es la viscosidad del fluido que llevan los amortiguadores y m es la masa que debe resistir la caja en el primer nivel, esto se resume en la tabla 6.

$$\gamma = \frac{b}{2m} \text{ (Ec. 24)}$$

El coeficiente de amortiguación γ es mayor conforme la masa sea menor y la viscosidad del fluido sea alta. Según la figura 12 el valor de b es mayor a 0.37 mPas para un aceite SAE 50.

Además, además el coeficiente se multiplica por la cantidad de amortiguadores que tenga el camión, el cual corresponde a 12. Como se ve en la figura 22, las llantas traseras están acomodadas en pares que tienen un amortiguador y las llantas delanteras también tienen amortiguadores uno por cada neumático.



Figura 22: Vehículo de transporte

Tabla 6. Factores de amortiguación por caja

Caja	Factor de Amortiguación
Caja 1	0.000513
Caja 2	0.0009
Caja 3	0.000513

IV. Análisis de Resultados

A. Pruebas experimentales de Compresión

Los figuras 24, 25 y 26 muestran gráficos del comportamiento del material ante la fuerza aplicada y la posición de cambio para cada una de las 4 muestras. La caja 1 es la que tiene mejor comportamiento ante la compresión, mientras que la caja 2 tiene los valores inferiores del estudio lo cual concuerda con la teoría debido a que tiene menor área transversal.

No obstante, la caja 3 tiene valores inferiores a la caja 1 aunque los cálculos demuestran que tiene mayor área transversal, esto puede deberse a un problema de diseño de la caja, pues en la figura 29 se ve un gap o una distancia de aproximadamente 5mm entre las tapas, lo cual reduce el área transversal para que la carga se distribuya, por consiguiente, puede afectar el comportamiento del material ante esfuerzos de compresión.

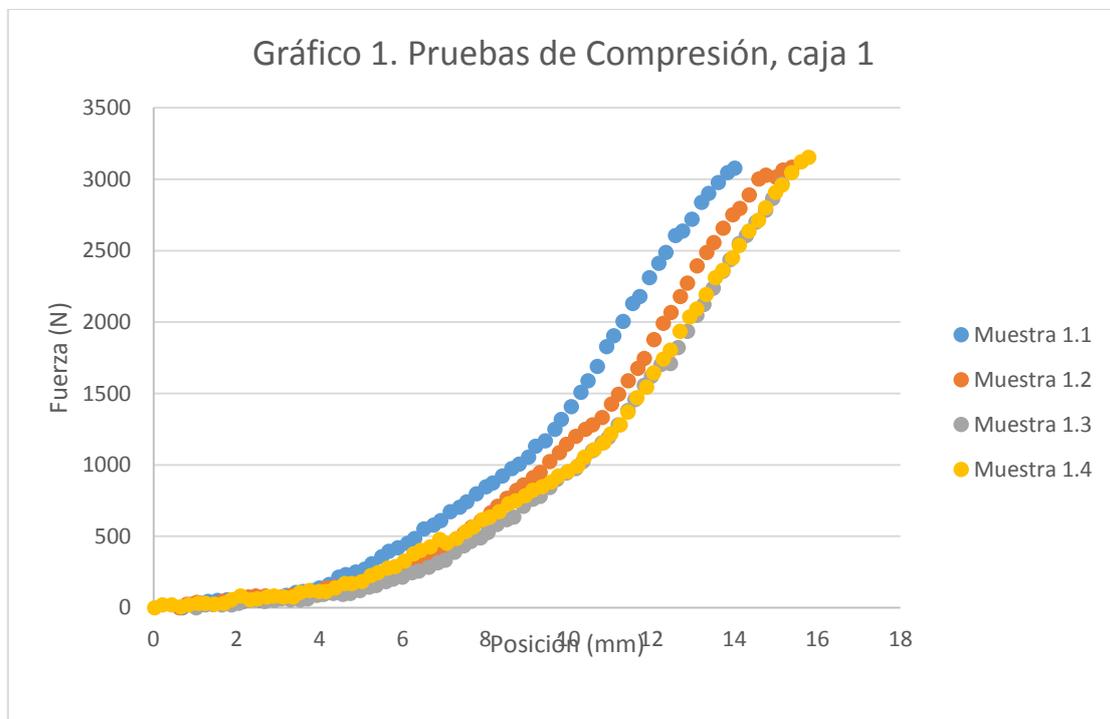


Figura 24: Curvas de Fuerza y Posición, caja 1

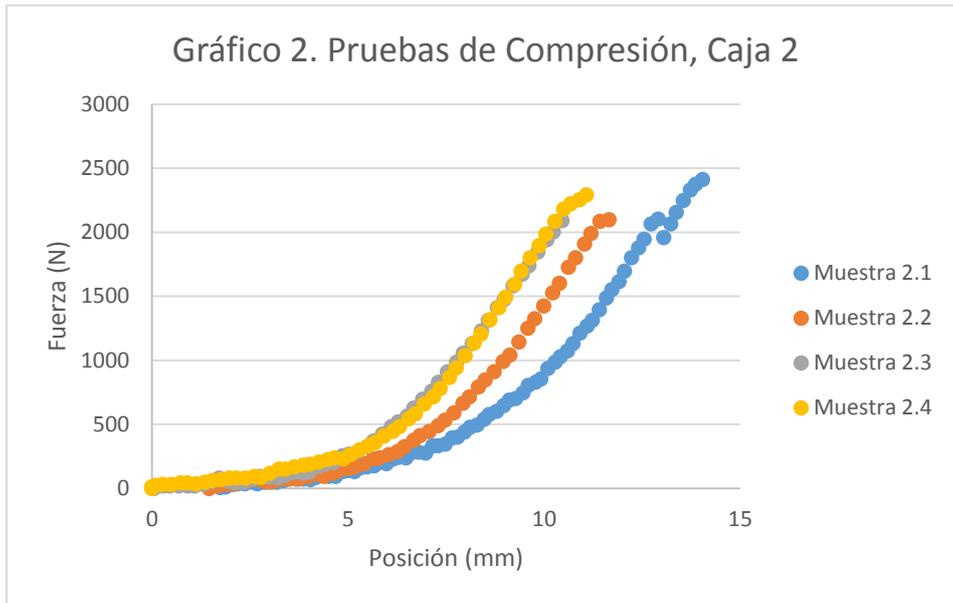


Figura 25. Curvas de Fuerza y Posición, caja 2

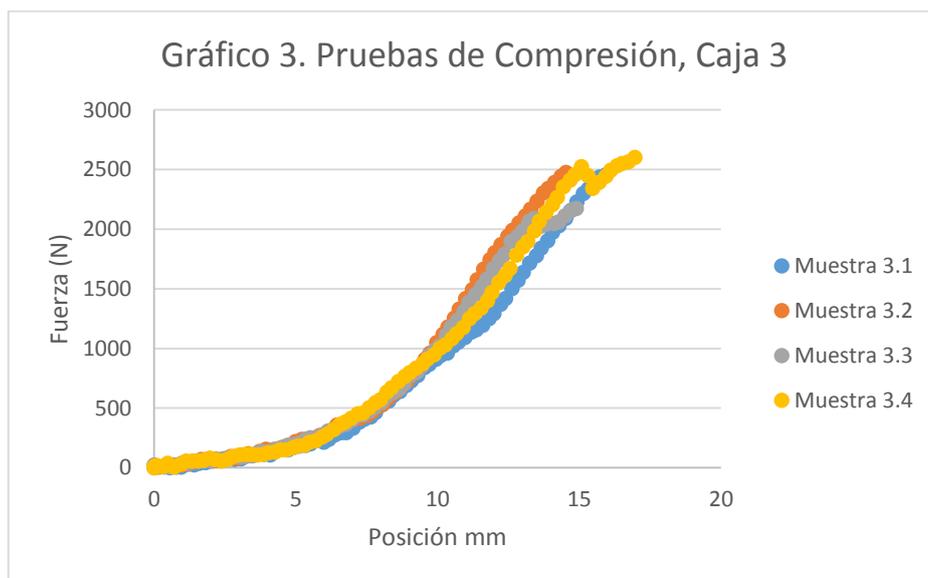


Figura 26. Curvas de Fuerza y Posición, caja 3

La tabla 7 muestra un resumen de la fuerza máxima que alcanzaron las cajas, multiplicadas por el factor de corrección de la humedad al 90%. Además, se toma el promedio del valor de fuerza máxima. En la caja 3 hay un valor de 1159N el cual difiere aproximadamente en 200N de los valores del orden de los 1300 N, este tipo de datos pueden obtenerse debido a problemas en el momento de la experimentación, por ejemplo, un mal acomodo de la caja en la plataforma.

Tabla 7. Resumen de la fuerza máxima obtenida por caja, a una humedad del 90%

Número de Caja	Muestra	Fuerza Máxima (N)
1	1.1	1641.9869
	1.2	1645.3333
	1.3	1581.6470
	1.4	1682.1961
	Promedio	1637.7980
2	2.1	1286.7451
	2.2	1119.2157
	2.3	1142.6928
	2.4	1223.1111
	Promedio	1192.9412
3	3.1	1310.2222
	3.2	1320.2614
	3.3	1159.4248
	3.4	1387.2941
	Promedio	1294.3001

De los resultados anteriores, es importante destacar que la caja 1 es la que soporta mayor fuerza debido a que tiene mayor área de sección transversal donde los esfuerzos puedan distribuirse. La caja que presenta menor resistencia es la numero 2, no obstante, se observa que los datos entre si muestran una variabilidad bastante alta. Por último, la caja 3 la cual debería resistir más posee una resistencia intermedia. Los datos promediados de la fuerza se encuentran en la tabla 8, a los cuales se les adicionan los valores obtenidos mediante el método analítico.

Módulo de Young

Se define el módulo de Young en materiales lineales, a partir del rango elástico del material. Para obtener este valor, se requiere las curvas obtenidas en las pruebas de compresión, no obstante, que se encuentren en términos de esfuerzo

y deformación, es decir, aplicando las ecuaciones 2 y 3. Para ver dichas curvas y como se obtienen los valores del módulo de Young referirse al anexo. Los valores resumidos se ven en la tabla 8.

Tabla 8. Valores de Fuerza Máxima y Módulo de Young

Código de caja	Número de Caja	Fuerza Máxima (N)	Módulo de Young (N/m ²)
90028619-01	1	1637.7980	7.69x10 ⁴
90028599-01	2	1192.9412	1.67x10 ⁵
90661240-01	3	1294.3001	9.18 x10 ⁴

B. Resultados del Método Analítico

La tabla 8, muestra que la caja 1 soportó la mayor cantidad de fuerza. No obstante, tiene menor área transversal que la caja 3 según la tabla 5. Teóricamente, la caja que tenga mayor área transversal es la que tiene más espacio para distribuir la carga. Por otro lado, la caja 2 es la que soporta menos fuerza, ya que tiene, menor área transversal.

Los datos de la tabla 9, desglosa cada valor numérico de los factores de la ecuación 23. Cada constante fue definida, para un mayor detalle de cada cálculo en el anexo B.

Tabla 9. Resultados del método analítico, a una humedad del 90%

Caja	Fuerza Máxima (N)	Peso (N)	Fuerza Térmico (N)	Fuerza Vibracional (N)	Total (N)	Factor de Seguridad
1	1637.7908	352.8	0.0194	0.3585	353.1779	4.63
2	1192.9412	196.0	0.0363	0.4433	198.0920	6.02
3	1294.3006	617.4	0.0243	0.3585	617.7828	2.09

Se define el factor de seguridad como el cociente de la capacidad máxima del material entre la capacidad real del mismo. La caja 1 tiene un factor de seguridad de 4, la caja 2 tiene un factor de 6 y la caja 3 tiene un factor de 2. Industrialmente, se acepta que el material soporte 3 veces el peso. Por lo tanto, la caja 3 no cumple el estándar industrial para condiciones de soporte estructural. Mientras que la caja 2 es la que mayor factor de seguridad tiene y con la cual puede estibarse los otros dos niveles adicionales que el proyecto pretende.

El valor de la fuerza máxima obtenida se multiplica por el factor de humedad relativa al 90% con el fin de considerar un escenario climático adverso. No obstante, en la práctica es posible no llegar a una humedad tal alta, debido a que la prioridad es la calidad del producto, es necesario manejar el extremo más desfavorable para las cajas. En segundo lugar, las pruebas de compresión se realizaron con las cajas vacías, esto influyó en que las cajas soportaran menos peso.

A partir del modelo analítico, la definición de las hipótesis, las ecuaciones y las constantes, se puede precisar como las variables compresivas, térmicas y vibracionales podrían afectar el material. La caja número 2 tiene mayor probabilidad de soportar mejor todas estas variables, porque es la que soporta menos peso de las 3.

C. Análisis de fallas observadas en las pruebas

Posterior a las pruebas de compresión, se denotaron problemas en el material que dependen de factores externos, como la fabricación de las cajas, el sellado y el diseño.

En la figura 27, se muestra una caja cuya esquina presenta un doblez, lo cual teóricamente no debe suceder. No obstante, se observa que el fallo se debió a que el adhesivo que se coloca entre las capas se desprendió.



Figura 27. Daños presentados en las cajas, posterior a las pruebas

Además, existe otra variable que se da en el proceso de sellado de cajas en la cual el operario tiende a pegar las tapas en posiciones que provocan tensión en ciertas zonas, ya que se tiende a unir una capa por encima o por debajo de la otra. Ver figura 28.



Figura 28. Tapas de las cajas selladas

La muestra 3 presenta un problema de diseño, debido a que las tapas no llegan a toparse quedando un espacio entre ellas, el adhesivo que las sella queda expuesto. Esto representa un problema porque en la cinta pueden depositarse partículas de suciedad, incluso humedad de tal manera que el material pierde su capacidad de adherir. En el posterior proceso de esterilización debe asegurarse que el dispositivo médico quede libre de bacterias que comprometan la vida del paciente afectando la calidad. En la figura 29 se muestra este espacio entre las capas o gap.

Se realizó una medición del gap el cual supero los 3.5 mm de espaciamiento, que en toda la caja representa una disminución del área transversal, el cartón corrugado material es ortotrópico y el gap se presenta justamente en la dirección de la fuerza aplicada por lo tanto, es perjudicial para la capacidad de la caja para soportar la carga.

También, la caja 3 soporta la mayor cantidad de masa de 7kg. Por lo tanto, es la más exigida estructuralmente de las tres cajas estudiadas.



Figura 29. Espacio entre las tapas de las cajas

De igual manera, entre la flauta y la capa se presentaban desprendimientos, lo que afecta la capacidad de la caja en resistir el esfuerzo de compresión, como se muestra en la figura 30.



Figura 30. Daño entre flauta y las capas

D. Modelaciones y Simulaciones

Para esta parte de la investigación se utilizó el software educativo de Solid Works, se modeló la compresión y temperatura. Se utilizó un estudio estacionario con el tiempo, es decir, no se consideró, vibraciones en el estudio. Con la modelación se pretende conocer si el comportamiento real de las cajas ante las pruebas de compresión son similares a las obtenidas mediante el software.

La figura 31 muestra el campo vectorial de la fuerza en la caja. Las partes rígidas en color verde, las cuales son los bordes y la tapa de abajo. La fuerza está en la dirección Y denotada por las flechas moradas.

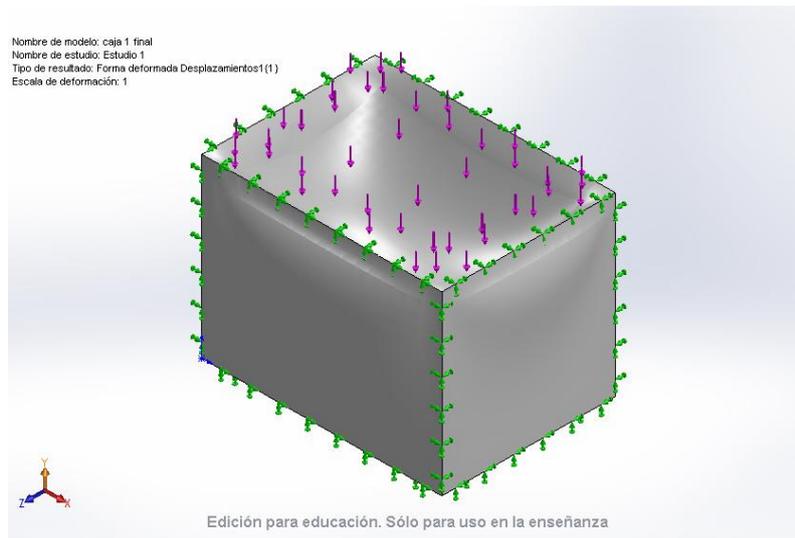


Figura 31. Campo Vectorial de la Compresión

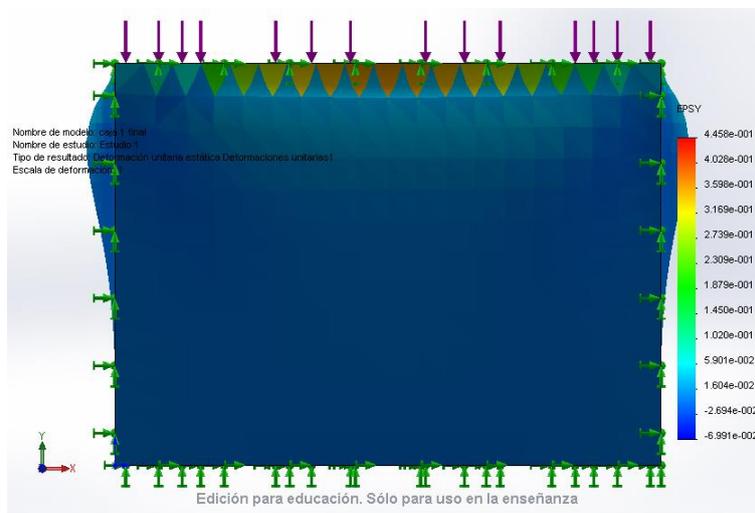


Figura 32. Distribución de las deformaciones en dirección y

En la figura 32, se tiene una vista lateral de la caja al ser sometida a la fuerza y se observa la deformación unitaria en el eje y, que según la leyenda el valor de la deformación fluctúa entre 1.60×10^{-2} . Así como abultamientos en las zonas donde la caja tiende a deformarse. La figura 33 muestra una falla de la caja que tuvo resultados muy similares y la deformación ocurrió en las mismas zonas que la modelación está comprobando.



Figura 33. Falla de caja en las pruebas de compresión

Las condiciones térmicas se pueden observar en la figura 34, donde se modelo un cambio de temperatura de 30°C hasta los 10°C , mediante convección ya que los cambios provocados por la temperatura se debe a la influencia del ambiente, por lo tanto, no hay una temperatura fija incidiendo sobre la caja si no una corriente convectiva que actúa sobre esta. La zona que más resiente los cambios de calor son las esquinas, pues son rígidas y tienen una función estructural y de soporte.

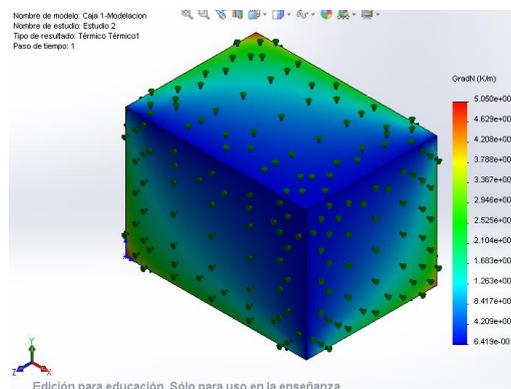


Figura 34. Distribución de la temperatura en la caja 1

La figura 35, muestra la distribución de la fuerza, la caja al tener un espesor delgado va a tener cierta tendencia a hundirse en la tapa superior, en estas modelaciones no se dibujó cada tapa ni el adhesivo que las une. Las cajas se dibujaron como un continuo con un espesor definido, esto es una aproximación al diseño geométrico de las cajas pero no cumple exactamente con la forma en que las cajas se ve. Por ello, en la figura 35 se muestra una concentración del esfuerzo en el centro de la tapa superior.

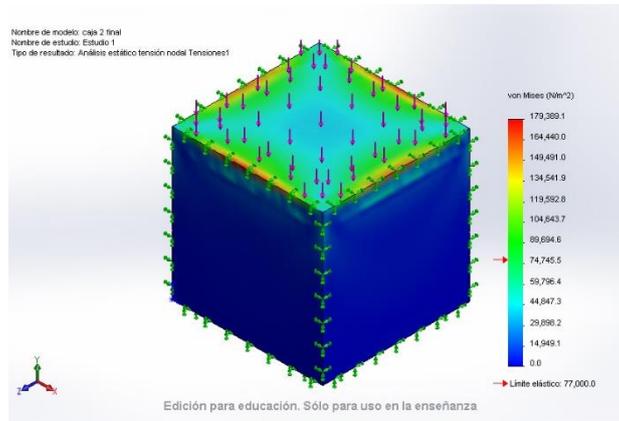


Figura 35. Distribución de la fuerza en la caja 2

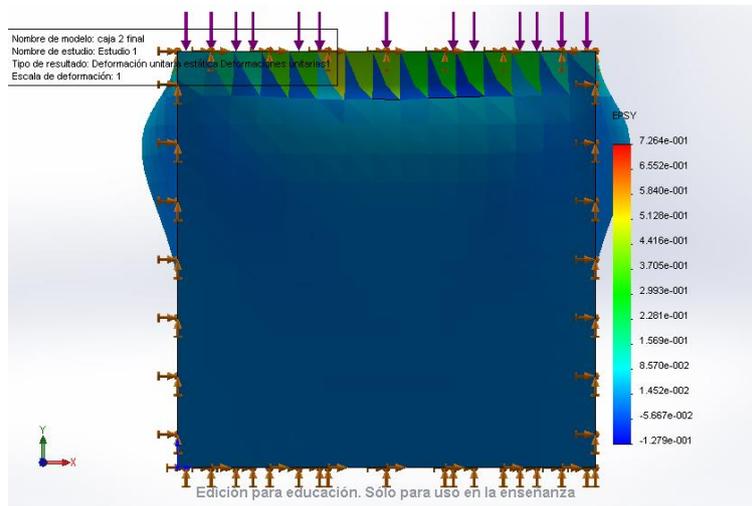


Figura 36. Deformaciones en el eje Y

Según la figura 36 la caja 2 tiende a tener menor deformación que la caja 1 con un aproximado de 8.52×10^{-2} . Por que la caja 2 tiene menor cantidad de niveles de estiba y además soporta menor cantidad de peso.

Para el estudio de temperatura de la caja 2 se modeló una situación hipotética en la cual una de las caras de las cajas estuviera expuesta a 10°C y la otras caras a 30°C, esto no aplica al fenómeno como tal, ya que un cambio de temperatura en el proceso de transporte no sería inmediato. Con el propósito de tomar un panorama extremo se realizó un estudio de este tipo.

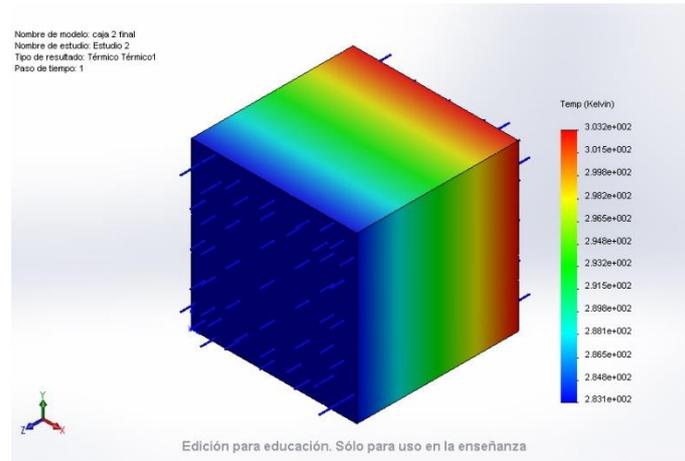


Figura 37. Gradiente de temperatura en la caja 2

De la figura 37, se observa un gradiente de la temperatura que se da a lo largo del eje z en la caja. Se escogieron dos extremos de las cajas y se le aplicó la temperatura. Por la conductividad térmica del cartón corrugado 0.21 W/mK (según R. L. Earle) al ser tan baja el gradiente de temperatura tiende a diseminarse en todo el material, en un estudio estacionario.

Por último, se realizó un estudio a la caja 3. La cual se muestra en las figuras y 38. El comportamiento mecánico es similar a las otras dos cajas. La diferencia entre las cajas es dimensional y al soportar diferente peso el límite elástico y el módulo de Young es diferente para cada caja.

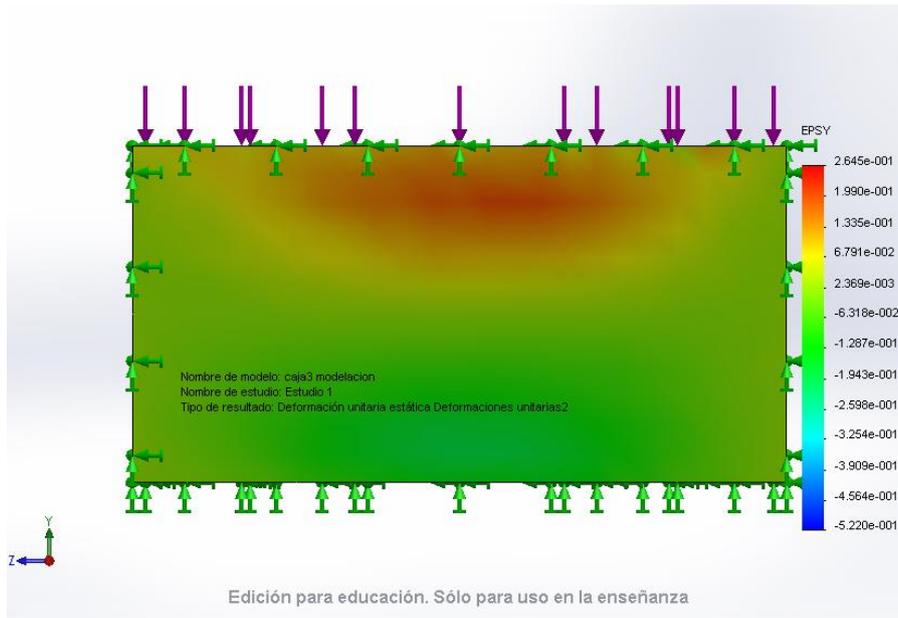


Figura 38. Vista lateral de la caja 3 sin deformar

En la figura 38, se denota como se distribuye el esfuerzo en el eje y antes de que aplicación de la fuerza deforme el material, la mayor concentración de esfuerzo se da en las zonas más rojizas.

En la figura 39 se observa la deformación en Y pero luego de la aplicación de la fuerza, en un estudio estacionario, la caja tiene de a abultarse en la zona esperada. No obstante, el valor de la deformación se encuentra en un valor promedio de 1.943×10^{-1} , esto implica que tiene la mayor deformación de las tres.

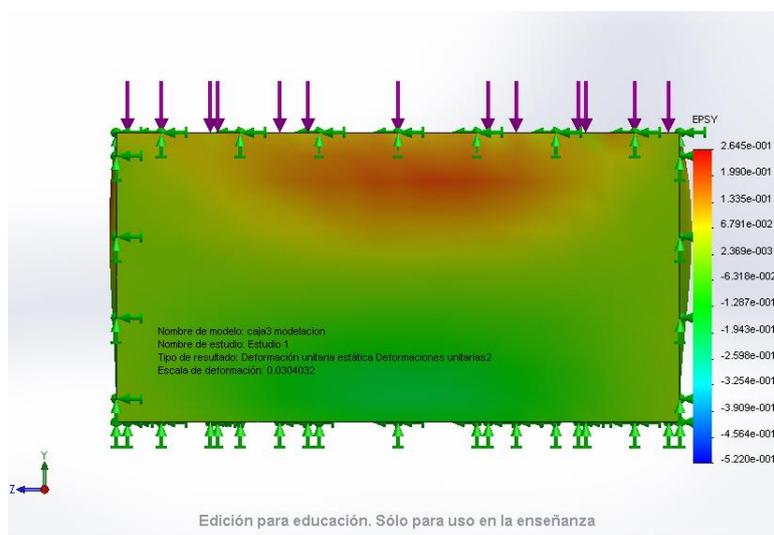


Figura 39. Deformaciones de la caja 3 en el plano XY

Al analizar los tres valores de deformaciones en el eje y, la que menos se deforma es la caja 2 con 8.52×10^{-2} , esto debido a que soporta una masa por caja de estiba de tan solo 4 kg, respecto al eje y, esta caja tiene una longitud mayor en esa coordenada que las otras por lo tanto, mayor posibilidad de que se disipe el esfuerzo. Respecto al eje y la caja que menos se deforma es la 2, es importante recordar que el material es ortotópico así que escogiendo otra dirección de compresión, los resultados den diferentes.

Entre la caja 1 y 3 la que presenta mayor deformación es la 3, que experimentalmente, resistió menos aplicación de la fuerza con respecto a la caja 1. Aunque la caja 1 tuvo la mayor cantidad de fuerza máxima resistida, esta se deforma más que la caja 2, debido a que tiene que resistir mayor peso.

También, los datos obtenidos por modelación comprueban el valor del factor de seguridad calculado, donde la que tiene mayor posibilidad de resistir la estiba es la caja 2, luego la 1 y la 3.

V. Conclusiones

Respecto a la primera etapa de experimentación, los resultados de las cajas son similares entre sí. Excepto en la caja 3 que mostró un dato muy alejado de las otras 3 muestras del mismo tipo. Además, debido al equipo no se cumplió con el valor de precarga que la norma ASTM indica.

Los cálculos de área transversal sugieren que la caja 3 debe mostrar mejor comportamiento ante la compresión. No obstante, el problema de diseño relacionado al gap entre las capas sugiere una pérdida de área transversal que afecta su resistencia a la compresión.

El modelo analítico, demuestra que la temperatura y la vibración son valores casi despreciables, la mayor influencia en la falla de la caja se debe a la carga estática ejercida por el peso de los dispositivos médicos. También, en el proceso de

empaques, las cajas tienen flejes y van envueltas en wraps o plástico adhesivo que no permite movilidad entre estas.

Las vibraciones que puedan afectar las cajas, se ven reducidas por los pocos grados de libertad que tiene para moverse, en los sistemas de suspensión y amortiguación del transporte.

En cuanto a las modelaciones, la deformación debido a las cargas estáticas es reducida. El efecto de la temperatura tampoco es preponderante en la resistencia del material. No obstante, no se analizó el efecto de las vibraciones. El comportamiento de las cajas ante las cargas estáticas es semejante entre sí, el cambio se debe a las diferencias dimensionales y la carga que soportan.

Por su parte, los modos de falla de las cajas demuestran problemas en el adhesivo de las cajas, lo cual va relacionado con el proceso de fabricación de las cajas. De acuerdo con la tabla 4 se observó que el espesor no es constante en toda la caja, sin embargo, estas diferencias son de esperarse, por el mismo proceso de fabricación, además, las cajas tienen como propósito transportar producto, no tiene una exigencia dimensional preponderante.

En cuanto a valores numéricos, la caja 1 soporta mejor la compresión que las cajas 2 y la 3 respectivamente. Los datos finales de fuerza máxima se multiplicaron por el factor de humedad relativa del 90% para reproducir el peor escenario de exposición. Esto disminuyó aproximadamente la mitad de la fuerza máxima obtenida en los datos propiamente de la prueba de compresión.

Con base en el factor de seguridad, los valores por caja 1, 2, 3 son de 4, 6 y 2 respectivamente, industrialmente, se acepta un factor de seguridad 3 o mayor. No obstante, no se debe rechazar la caja 3 debido a que tiene un valor de compresión fuera del rango y un problema de diseño.

VI. Recomendaciones

Realizar mayor cantidad de pruebas de compresión a las cajas, para que el estudio sea representativo probabilísticamente. De la misma manera, poder controlar las condiciones del experimento para que se apegue de la mejor forma a la norma ASTM.

Encontrar el factor de seguridad aceptado para el rendimiento de las cajas, ya que se puede exigir un factor de 3 cuando realmente puede disminuirse a 1 y de esta manera no rechazar el cambio de estiba para la caja 3.

Estudiar la afectación que pueda ocurrir en la esterilización, al colocar más cajas en las cámaras, puesto que el tiempo de este proceso puede aumentar.

Controlar en lo posible, el diseño de las cajas para que no queden gaps que afecten la capacidad de respuesta del material ante esfuerzos compresivos.

VII. Referencias Bibliográficas

Aboura Z.; Talbi N; Allaoui S; Benzeggagh M. (2004) *Elastic Behavior of corrugated cardboard: experiments and modeling*. Composite Structures, Elsevier, pp.53-62 online version at: HAL archives-ouvertes

Borch J, Lyne Bruce M, Mark E; Habbeger C. (2002) *Handbook of Physical Testing of Paper and Paperboard, Volume 2*. Marcel Dekker AG.

Callister W. (2002) *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Volumen 1*. Editorial Reverté, España.

Collieu A.M.; Powney D.J. (1977). *Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales*. Editorial Reverté, España.

Campbell A. (2010) *The use of A-Flute, B-Flute, AC-Flute and BC-Flute corrugated paperboard as a cushioning material*. Clemson University online versión: http://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1916&context=all_theses

Departamento de Física Aplicada, Movimiento Oscilatorio, Universidad de Sevilla, recuperado desde: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Movimiento_oscilatorio

Earle RL (1981) *Unit Operations in food Processing* 2nd Edition. Pergamon Press, British Library, Page 81.

Emblem Anne; Emblem Henry. (2012). *Packaging Technology - Fundamentals, Materials and Processes*. Elsevier. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPTFMP001/packaging-technology/packaging-technology>

Fellows, P. J. (2009). *Food Processing Technology - Principles and Practice (3rd Edition) - 25*. Packaging. Woodhead Publishing. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt006LN9N5/food-processing-technology/packaging>

Giancoli Douglas (2007) *Física Volumen 2: Principios y Aplicaciones*. Editorial Pearson Education, México.

Goodwing Daniel; Young Dennis (2011) *Protective Packaging for distribution design and development*. Editorial DEStech Publications Inc.

Groover Mikell (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna: materiales, procesos y sistemas*. Editorial Pearson, Prentice Hall, México.

Hibbeler R.C. (2006) *Mecánica de Materiales*, Sexta Edición, Editorial Pearson Education, México.

The independent packaging association (2011) Sistema de corrugación y adherencia, Marquip War United, Barry-Whemiller company, recuperado desde: http://www.aiccbox.org/region/meeting_data/Mexico/2011/Granados_SPA.pdf

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (2008) *Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica*. Unidad de Gestión de Infraestructura Vial, recuperado desde: <http://www.asamblea.go.cr/Lanamme%20UCR/Informes%202008/2008/LM-GI>

McGuire, Michael F. (2008). *Stainless Steels for Design Engineers - 24.3 Paper-Making Processes*. ASM International. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008GRVA2/stainless-steels-design/paper-making-processes>

Niskanen Karlo; Berglund Lars (2011). *Mechanics of Paper Products*. Editorial Walter de Gruyter. Online version available at: ProQuest, e-brary <http://ezproxy.itcr.ac.cr:2053/lib/itcr/detail.action?docID=10527881>

Norstrand T; Blackenfeldt M; Renman M. (2003) A Strength Prediction Method for Corrugated Board Containers, Div. Structural Mechanics, Lund University Sweden.

López Vázquez L. (2010) *Temas de Física* Editorial Club Universitario, Escuela de Obras Públicas de Madrid.

Vélez Moreno L.M. (2008). *Materiales Industriales Teoría y Aplicaciones*. Editorial Medellín, Instituto Tecnológico Metropolitano.

Stone, Richard Ball, Jeffrey K. (2004). *Automotive Engineering Fundamentals - 8.4.2 Dampers (Shock Absorbers)*. SAE International. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt006NSD82/automotive-engineering/dampers-shock-absorbers>

American Society of Testing Materials (2010) ASTM D642-00 Standard Test Method for Determining Compressive Resistance of Shipping Containers, Components and Unit Loads. ASTM International United States

American Society of Testing Materials (2012) ASTM D4727-12 Standard Specification for Corrugated and Solid Fiberboard Sheet (Container Grade) and Cut Shapes. ASTM International United States.

VIII. Anexos

A. Cálculo del Módulo de Young

De las 4 cajas a las cuales se les realizó la prueba se escogió la muestra que estuviera más cerca al promedio de la fuerza, de la tabla 7. Para la caja 1 se escogió la muestra 1.1. Para la caja 2 fue la muestra 2.2 y por último para la caja 3 se eligió la muestra 3.2. Se obtuvo el esfuerzo y deformación a partir de los datos experimentales. Se debe recordar que el módulo de Young se obtiene en rango elástico del material, que está debidamente definido en los gráficos 5, 6 y 7.

El cartón no se comporta idealmente, apenas es observable el límite de elasticidad, en la figura 38, marcado en rojo, los puntos por debajo de este se encuentran en el comportamiento elástico del material. En este intervalo en el cual el material puede volver a su estado original es donde se obtiene el módulo de Young. Para el análisis, el módulo de Young se obtuvo dividiendo el esfuerzo entre la deformación, justamente en el valor del límite de elasticidad.



Figura 40. Gráfico de Esfuerzo y Deformación, caja 1

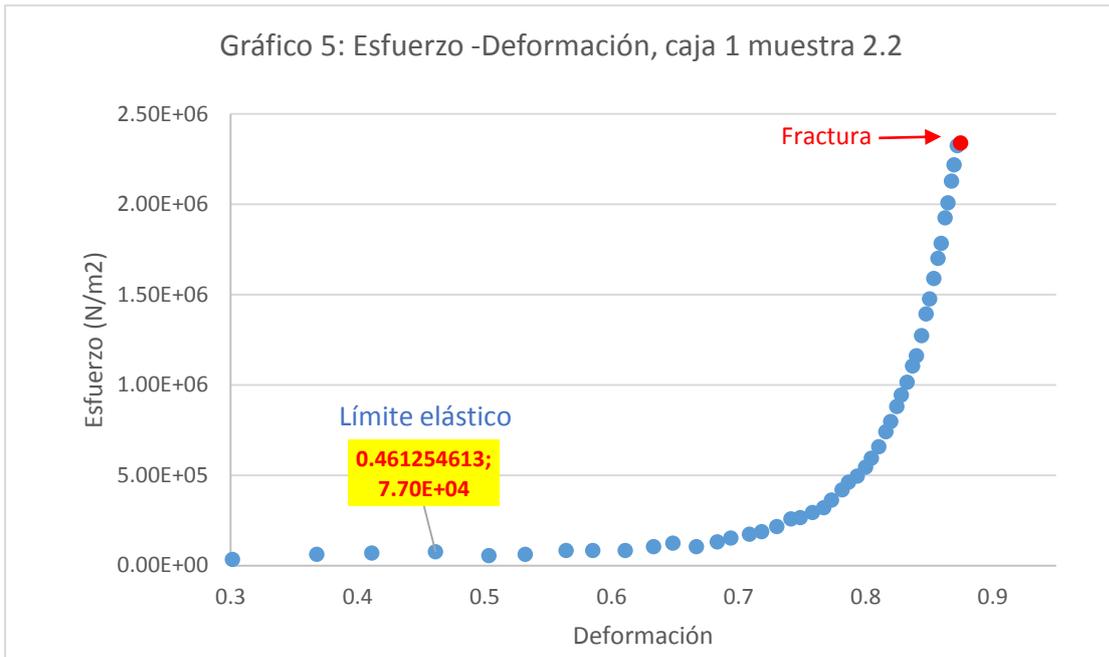


Figura 41. Gráfico de Esfuerzo y Deformación, caja 2

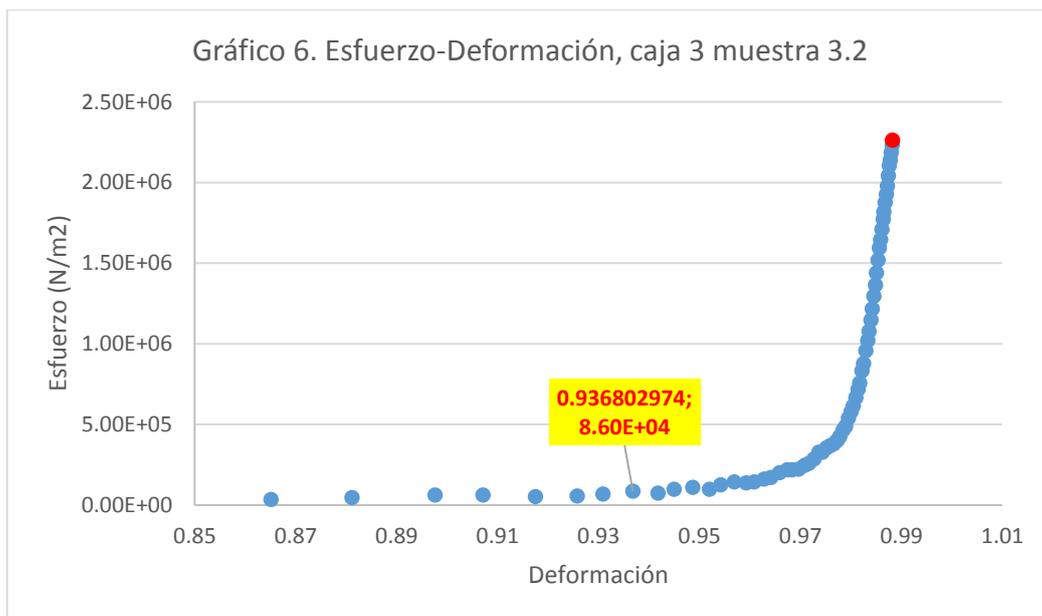


Figura 42. Gráfico de Esfuerzo y Deformación, caja 3

Los puntos que vienen en marcados en la gráfica de amarillo con rojo son el límite elástico del material, para encontrarlos se analizaron las tablas 10, 11 y 12, en las cuales se encontraron punto de esfuerzo alto y luego una disminución en el esfuerzo en el siguiente dato. Es decir, llega al límite elástico ese esfuerzo y de ahí el esfuerzo disminuye y luego vuelve a aumentar hasta que se da la falla.

Tabla 10. Valores de Esfuerzo y Deformación de la caja 1

Caja 1, Muestra 1.1			
Posición (mm)	Fuerza N	Deformación	Esfuerzo (N/m ²)
0.69	0	0	0.00E+00
0.91	25.09803922	0.241758242	2.41E+04
1.14	31.37254902	0.394736842	3.01E+04
1.31	44.01960784	0.473282443	4.22E+04
1.54	50.29411765	0.551948052	4.82E+04
1.77	56.56862745	0.610169492	5.42E+04
1.94	56.56862745	0.644329897	5.42E+04
2.17	44.01960784	0.68202765	4.22E+04
2.34	56.56862745	0.705128205	5.42E+04
2.57	50.29411765	0.73151751	4.82E+04
2.8	69.11764706	0.753571429	6.62E+04
2.97	69.11764706	0.767676768	6.62E+04
3.2	87.94117647	0.784375	8.43E+04
3.43	106.7647059	0.798833819	1.02E+05
3.6	113.1372549	0.808333333	1.08E+05
3.83	119.4117647	0.819843342	1.14E+05
4	138.2352941	0.8275	1.32E+05
4.23	163.3333333	0.836879433	1.57E+05
4.46	213.627451	0.84529148	2.05E+05
4.63	232.4509804	0.850971922	2.23E+05
4.87	251.2745098	0.858316222	2.41E+05
5.09	270.1960784	0.864440079	2.59E+05
5.26	307.8431373	0.868821293	2.95E+05
5.5	358.1372549	0.874545455	3.43E+05
5.67	395.7843137	0.878306878	3.79E+05
5.89	420.9803922	0.882852292	4.04E+05
6.12	452.3529412	0.887254902	4.34E+05
6.29	483.8235294	0.890302067	4.64E+05
6.52	552.9411765	0.894171779	5.30E+05
6.75	578.0392157	0.897777778	5.54E+05
6.92	609.4117647	0.900289017	5.84E+05
7.15	672.254902	0.903496503	6.44E+05
7.38	703.7254902	0.906504065	6.75E+05
7.55	741.372549	0.908609272	7.11E+05
7.78	797.9411765	0.911311054	7.65E+05
8.01	848.2352941	0.913857678	8.13E+05
8.18	873.3333333	0.915647922	8.37E+05
8.41	923.627451	0.917954816	8.85E+05
8.63	973.8235294	0.92004635	9.33E+05
8.81	1005.294118	0.921679909	9.64E+05
9.04	1055.588235	0.923672566	1.01E+06
9.21	1130.980392	0.925081433	1.08E+06

9.44	1168.627451	0.92690678	1.12E+06
9.67	1250.294118	0.928645295	1.20E+06
9.83	1319.411765	0.929806714	1.26E+06
10.07	1407.352941	0.931479643	1.35E+06
10.3	1507.941176	0.933009709	1.45E+06
10.47	1589.607843	0.934097421	1.52E+06
10.7	1690.098039	0.935514019	1.62E+06
10.92	1828.333333	0.936813187	1.75E+06
11.09	1903.72549	0.937781785	1.82E+06
11.32	2004.313725	0.939045936	1.92E+06
11.55	2129.901961	0.94025974	2.04E+06
11.72	2180.196078	0.94112628	2.09E+06
11.95	2312.156863	0.942259414	2.22E+06
12.18	2412.647059	0.943349754	2.31E+06
12.35	2488.039216	0.944129555	2.38E+06
12.58	2607.45098	0.945151033	2.50E+06
12.75	2638.921569	0.945882353	2.53E+06
12.98	2720.588235	0.946841294	2.61E+06
13.21	2839.901961	0.947766843	2.72E+06
13.38	2902.745098	0.948430493	2.78E+06
13.61	2978.137255	0.949301984	2.85E+06
13.84	3047.254902	0.950144509	2.92E+06
14.01	3078.72549	0.950749465	2.95E+06

Tabla 11. Valores de Esfuerzo y Deformación de la caja 2

Caja 2, Muestra 2.2			
Posición (mm)	Fuerza (N)	Deformación	Esfuerzo (N/m ²)
1.46	0	0	0.00E+00
1.68	18.8235294	0.13095238	2.10E+04
1.86	31.372549	0.21505376	3.50E+04
2.09	31.372549	0.30143541	3.50E+04
2.31	56.5686275	0.36796537	6.30E+04
2.48	62.8431373	0.41129032	7.00E+04
2.71	69.1176471	0.46125461	7.70E+04
2.94	50.2941176	0.50340136	5.60E+04
3.12	56.5686275	0.53205128	6.30E+04
3.35	75.3921569	0.5641791	8.40E+04
3.52	75.3921569	0.58522727	8.40E+04
3.75	75.3921569	0.61066667	8.40E+04
3.98	94.2156863	0.63316583	1.05E+05
4.15	113.137255	0.64819277	1.26E+05
4.38	94.2156863	0.66666667	1.05E+05
4.61	119.411765	0.68329718	1.33E+05
4.77	138.235294	0.69392034	1.54E+05

5.01	157.058824	0.70858283	1.75E+05
5.18	169.607843	0.71814672	1.89E+05
5.41	194.803922	0.73012939	2.17E+05
5.64	232.45098	0.74113475	2.59E+05
5.81	238.72549	0.74870912	2.66E+05
6.04	263.921569	0.75827815	2.94E+05
6.27	289.019608	0.76714514	3.22E+05
6.44	326.764706	0.77329193	3.64E+05
6.68	376.960784	0.78143713	4.20E+05
6.84	414.705882	0.78654971	4.62E+05
7.07	446.078431	0.79349364	4.97E+05
7.3	490.098039	0.8	5.46E+05
7.47	534.019608	0.80455154	5.95E+05
7.7	590.588235	0.81038961	6.58E+05
7.93	665.980392	0.81588903	7.42E+05
8.1	716.27451	0.81975309	7.98E+05
8.33	791.666667	0.82472989	8.82E+05
8.5	848.235294	0.82823529	9.45E+05
8.73	911.078431	0.8327606	1.02E+06
8.96	992.745098	0.83705357	1.11E+06
9.13	1042.94118	0.84008762	1.16E+06
9.36	1143.52941	0.84401709	1.27E+06
9.59	1250.29412	0.84775808	1.39E+06
9.76	1325.68627	0.85040984	1.48E+06
9.99	1426.27451	0.85385385	1.59E+06
10.22	1526.76471	0.85714286	1.70E+06
10.39	1602.15686	0.85948027	1.79E+06
10.62	1727.84314	0.86252354	1.93E+06
10.8	1803.23529	0.86481481	2.01E+06
11.03	1910	0.86763373	2.13E+06
11.2	1991.76471	0.86964286	2.22E+06
11.43	2085.98039	0.87226597	2.32E+06
11.66	2098.52941	0.87478559	2.34E+06

Tabla 12. Valores de Esfuerzo y Deformación de la caja 3

Posición (mm)	Fuerza (N)	Deformación	Esfuerzo (N/m ²)
0.17	6.2745098	0.4845323	1.50E+04
0.41	18.8235294	0.585365854	1.72E+04
0.64	25.0980392	0.734375	2.29E+04
0.8	18.8235294	0.7875	1.72E+04
1.03	25.0980392	0.834951456	2.29E+04
1.26	37.745098	0.865079365	3.45E+04
1.43	50.2941176	0.881118881	4.59E+04
1.66	69.1176471	0.897590361	6.31E+04

1.83	69.1176471	0.907103825	6.31E+04
2.06	56.5686275	0.917475728	5.17E+04
2.29	62.8431373	0.925764192	5.74E+04
2.46	75.3921569	0.930894309	6.89E+04
2.69	94.2156863	0.936802974	8.60E+04
2.92	81.6666667	0.941780822	7.46E+04
3.09	106.764706	0.944983819	9.75E+04
3.31	119.411765	0.948640483	1.09E+05
3.54	106.764706	0.951977401	9.75E+04
3.71	138.235294	0.954177898	1.26E+05
3.94	157.058824	0.956852792	1.43E+05
4.17	150.784314	0.959232614	1.38E+05
4.34	157.058824	0.960829493	1.43E+05
4.57	175.882353	0.962800875	1.61E+05
4.74	188.529412	0.964135021	1.72E+05
4.98	219.901961	0.965863454	2.01E+05
5.21	238.72549	0.967370441	2.18E+05
5.37	238.72549	0.968342644	2.18E+05
5.6	245	0.969642857	2.24E+05
5.83	270.196078	0.97084048	2.47E+05
6	282.745098	0.971666667	2.58E+05
6.23	314.117647	0.972712681	2.87E+05
6.45	358.137255	0.973643411	3.27E+05
6.62	358.137255	0.974320242	3.27E+05
6.85	389.509804	0.975182482	3.56E+05
7.03	402.156863	0.975817923	3.67E+05
7.26	414.705882	0.976584022	3.79E+05
7.49	439.803922	0.977303071	4.02E+05
7.66	464.901961	0.977806789	4.25E+05
7.89	508.921569	0.978453739	4.65E+05
8.07	534.019608	0.978934325	4.88E+05
8.29	590.588235	0.979493366	5.39E+05
8.52	634.607843	0.980046948	5.80E+05
8.69	672.254902	0.980437284	6.14E+05
8.93	728.823529	0.980963046	6.66E+05
9.15	785.392157	0.981420765	7.17E+05
9.32	829.313725	0.981759657	7.57E+05
9.56	911.078431	0.982217573	8.32E+05
9.73	961.27451	0.982528263	8.78E+05
9.96	1049.31373	0.982931727	9.58E+05
10.19	1118.33333	0.983316977	1.02E+06
10.36	1181.17647	0.983590734	1.08E+06
10.59	1256.56863	0.98394712	1.15E+06
10.76	1331.96078	0.984200743	1.22E+06
10.99	1420	0.984531392	1.30E+06

11.22	1495.39216	0.984848485	1.37E+06
11.39	1577.05882	0.985074627	1.44E+06
11.62	1665	0.985370052	1.52E+06
11.85	1746.66667	0.985654008	1.60E+06
12.02	1803.23529	0.985856905	1.65E+06
12.24	1872.35294	0.986111111	1.71E+06
12.47	1941.47059	0.986367281	1.77E+06
12.64	1991.76471	0.986550633	1.82E+06
12.87	2054.5098	0.986790987	1.88E+06
13.1	2111.07843	0.987022901	1.93E+06
13.28	2167.64706	0.987198795	1.98E+06
13.51	2236.76471	0.987416728	2.04E+06
13.73	2305.88235	0.987618354	2.11E+06
13.9	2343.52941	0.987769784	2.14E+06
14.13	2393.82353	0.987968861	2.19E+06
14.36	2444.11765	0.98816156	2.23E+06
14.53	2475.4902	0.988300069	2.26E+06

Con los valores del límite elástico se obtuvo el valor del módulo de Young que se muestra en la tabla 8.

B. Cálculo de compresión, temperatura y vibraciones

Los valores de peso se obtuvieron de las tabla 13, esta información fue recolectada por los ingenieros industriales a cargo del proyecto.

Tabla 13. Peso por cajas y cantidad de niveles aumentados por estiba

Producto	Código	Cantidad de cajas por nivel de estiba	Número de niveles por pallet	Incremento en la cantidad de cajas estibadas	Masa por caja (kg)
Snares	90028619-01	5	8	2	4
	90028599-01	9	4	2	4
	90661240-01	4	8	2	7

En la tabla 14, se resumen los términos que definen la ecuación 20, sobre el factor térmico.

Tabla 14. Valores numéricos del factor térmico, según ecuación 20.

Caja	Módulo de Young (N/m ²)	Coefficiente de dilatación térmica (K ⁻¹)	Área Transversal (m ²)	Cambio de temperatura (K)
1	7.69x10 ⁴	12.1 x10 ⁻⁶	1.043 x10 ⁻³	20
2	1.67 x10 ⁵	12.1 x10 ⁻⁶	8.974x10 ⁻⁴	20
3	9.18 x10 ⁴	12.1 x10 ⁻⁶	1.095 x10 ⁻³	20

Por último, los valores de la ecuación 22, correspondientes a la fuerza vibracional, se encuentran en la tabla 15. Se asume un valor de t=1 segundo pues es el tiempo inmediato al golpe o al choque, en el cual la amortiguación se ve mayormente obligada a dispersar la energía producida.

$$F_{vib.} = m_{total} * Ae^{-\gamma t} [\gamma^2 \cos \omega_A t + 2\gamma\omega \sin \omega_A t - \omega_A^2 \cos \omega_a t] \text{ Ec. 23}$$

Tabla 15. Términos de la ecuación del estado vibracional

Términos de la ecuación	Caja 1	Caja 2	Caja 3
Masa total (kg)	36	20	63
$Ae^{-\gamma t}$	0.3998	0.3996	0.3998
$\gamma^2 \cos \omega_A t$	2.0518x10 ⁻⁷	6.3153x10 ⁻⁷	2.0518x10 ⁻⁷
$2\gamma\omega \sin \omega_A t$	0.02491	0.0437	0.02491
$\omega_A^2 \cos \omega_a t$	1171.92*	1171.92*	1171.92*

Nota: Los valores con * se convierten en un término negativo, en el momento en que el transporte cae en un hueco de la carretera, inmediatamente el sistema se frena, al igual que si el transportista tuviera que pasar por un reductor de velocidad, entonces en esos casos la velocidad angular va a disminuir en el primer segundo en que ocurre el fenómeno, por ende, se asume que este valor tiende a cero.

C. Modelación de las cajas

Modelación de Compresión

Para esta sección, la interfaz requiere definir los siguientes valores; limite elástico, módulo de Young y coeficiente de Poisson como se observa en la figura 41.

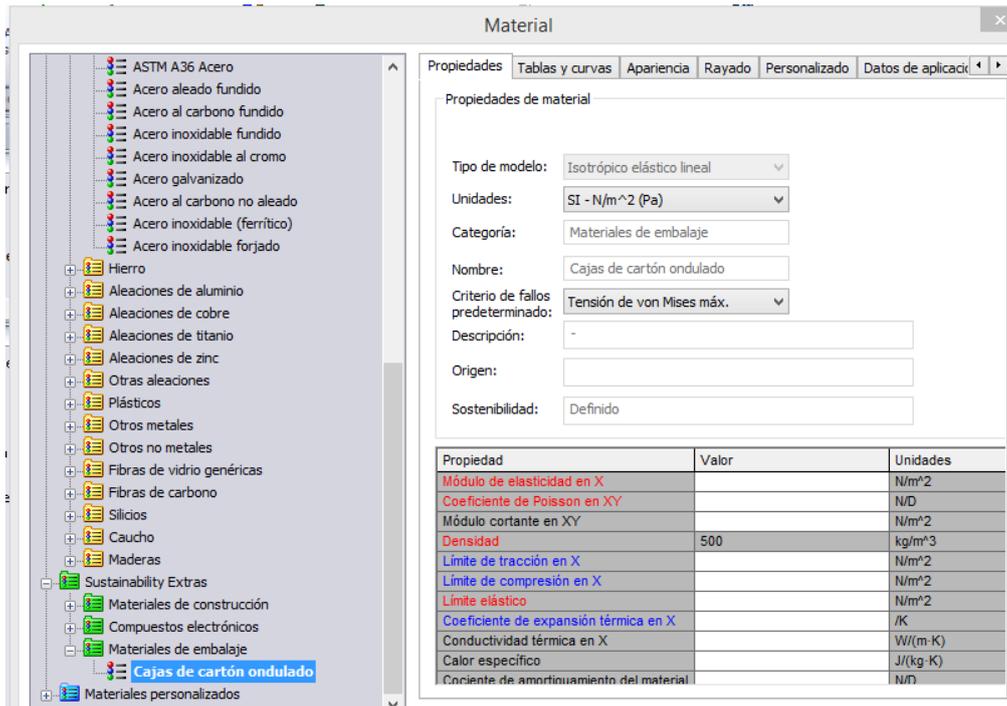


Figura 43. Interfaz gráfica de la modelación de compresión.

En la tabla 16, se resumen el valor de las constantes utilizadas para cada caja, en la modelación de compresión en Solid Works. El valor del coeficiente de Poisson se tomó de la tabla 2.

Tabla 16. Constantes utilizadas en la modelación de compresión

Constante	Caja 1	Caja 2	Caja 3
Módulo de Elasticidad (N/m ²)	7.69x10 ⁴	1.67 x10 ⁵	9.18 x10 ⁴
Coefficiente de Poisson	0.15	0.15	0.15
Límite elástico (N/m ²)	5.42 x10 ⁴	7.70 x10 ⁴	8.60 x10 ⁴
Fuerza	353.1779	198.0920	617.7828

Modelación de Temperatura

De acuerdo con la figura 43 el software requiere, el valor de conductividad térmica el cual es de 0.21W/m²K, obtenido teóricamente del libro de R.L. Earle.

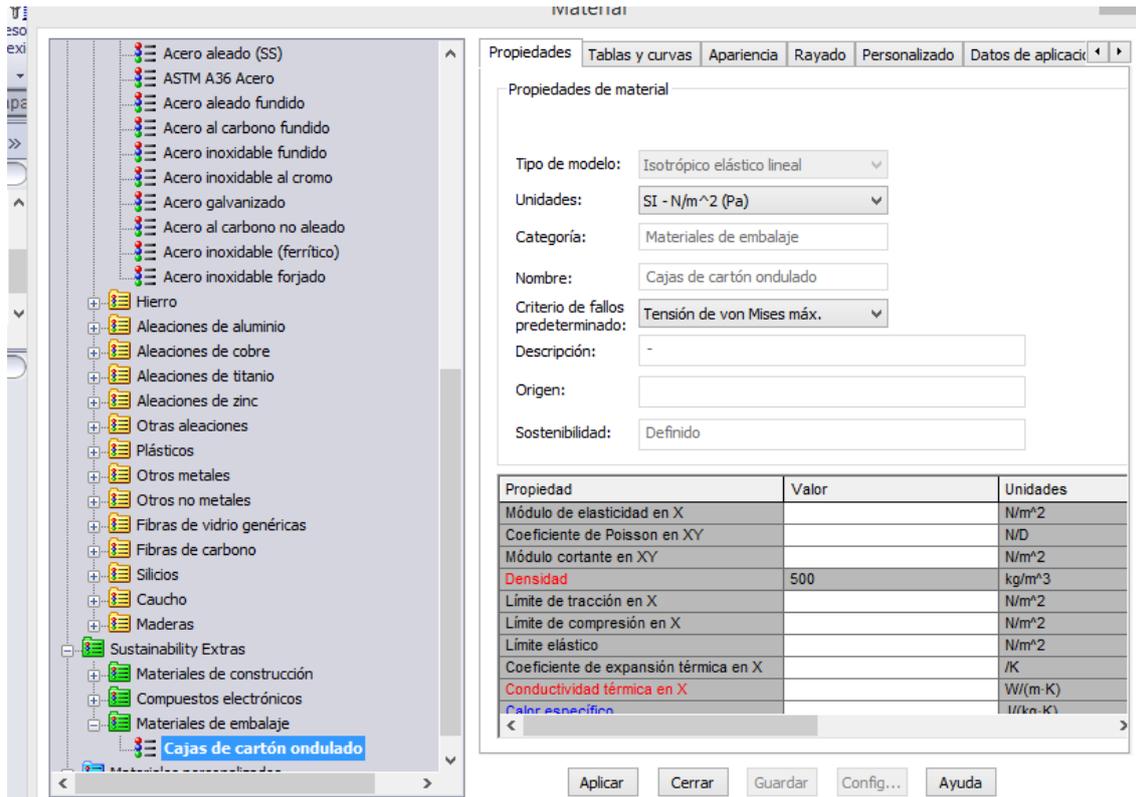


Figura 44. Interfaz de la modelación térmica en solid works