



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Grado de Tecnologías Industriales

Descripción y optimización del uso del cartón en
envase y embalaje

*Description and optimization of the use of carton in
packaging*

Autor:

Sergio Ginés Cosín

Director:

Juan Francisco Vidal Artal

Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación

Diciembre 2017

ÍNDICE

1. OBJETIVO Y METODOLOGÍA	1
2. LA INDUSTRIA DEL CARTÓN	3
2.1 LA EVOLUCIÓN INDUSTRIAL DEL CARTÓN	3
2.2 ENVASE Y EMBALAJE EN ESPAÑA	4
2.3 PRINCIPALES EMPRESAS ESPAÑOLAS DEL SECTOR	6
3. EL CARTÓN COMO MATERIAL	8
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	8
3.2 TIPOS DE PAPEL Y CARTÓN	9
3.2.1 TIPOS DE CARTÓN SEGÚN SU COMPOSICIÓN	9
3.2.2 TIPOS DE CARTÓN SEGÚN SU ESTRUCTURA	10
3.3 PROPIEDADES DEL CARTÓN	12
3.3.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL PAPEL PARA ONDULAR	12
3.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAPEL PARA ONDULAR	13
3.3.3 PROPIEDADES DEL CARTÓN ONDULADO	14
3.4 FABRICACIÓN Y PACKAGING	15
3.5 CÓDIGO INTERNACIONAL DE CAJAS DE CARTÓN	19
3.6 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	22
4. NUESTRO PRODUCTO	23
4.1 DESCRIPCIÓN	23
4.2 DS SMITH ANDORRA	23
4.2.1 LOCALIZACIÓN	23
4.2.2 INSTALACIONES Y MAQUINARIA	24
4.3 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	25
4.3.1 DISEÑO	25
4.3.2 DIMENSIONES	26
4.3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS	29
4.3.4 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS	33
5. CONCLUSIONES	45
6. GLOSARIO DE TÉRMINOS	47
7. BIBLIOGRAFÍA	48
8. ANEXOS	50
I. PLANO DEL TROQUEL	50
II. PLANO CAJA	52
III. VISTAS CAJA	53
IV. CALCULO DEL MÓDULO DE YOUNG	54
V. OTROS DATOS DE INTERÉS DE INVENTOR	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ROBERT GAIR.....	3
FIGURA 2. PRODUCCIÓN DE CARTÓN ONDULADO EN ESPAÑA EN LA ÚLTIMA DÉCADA.....	4
FIGURA 3. CANTIDAD DE PAPEL CONSUMIDO EN LAS ONDULADORES ESPAÑOLAS.....	4
FIGURA 4. CONSUMO CARTÓN POR SECTORES EN ESPAÑA.....	5
FIGURA 5. DATOS DEL SECTOR DEL CARTÓN EN ESPAÑA.....	6
FIGURA 6. LOGOTIPO SMURFIT KAPPA.....	6
FIGURA 7. LOGOTIPO SAICA PACK S.L.....	7
FIGURA 8. LOGOTIPO CARTONAJES LA PLANA S.L.....	7
FIGURA 9. LOGOTIPO DS SMITH.....	7
FIGURA 10. COMPOSICIÓN CARTÓN SOLIDO BLANQUEADO.....	9
FIGURA 11. COMPOSICIÓN CARTÓN DE FIBRAS RECICLADAS.....	10
FIGURA 12. TIPOS DE ONDAS DEL CARTÓN.....	11
FIGURA 13. CORRUGADORA.....	16
FIGURA 14. ALMACÉN DE BOBINAS.....	16
FIGURA 15. ENCOLADO Y PEGADO.....	16
FIGURA 16. PINZAS SEPARADORAS.....	16
FIGURA 17. TROQUELADORA.....	17
FIGURA 18: TROQUEL ROTATORIO.....	17
FIGURA 19. PROCESO DE PLEGADO.....	18
FIGURA 20. APILADORA.....	18
FIGURA 21. REFERENCIAS CÓDIGO INTERNACIONAL.....	20
FIGURA 22. ROLLOS Y PLANCHAS COMERCIALES.....	20
FIGURA 23. CAJAS CON SOLAPAS.....	21
FIGURA 24. CAJAS TELESCÓPICAS.....	21
FIGURA 25. CAJAS PLEGABLES Y BANDEJAS.....	21
FIGURA 26. CAJAS DESLIZANTES.....	21
FIGURA 27. CAJAS RÍGIDAS.....	21
FIGURA 28. CAJAS DE ENCOLADO RÁPIDO.....	22
FIGURA 29. ACONDICIONAMIENTOS INTERIORES.....	22
FIGURA 30. CONEXIONES DS SMITH.....	23
FIGURA 31. VISTA AÉREA FABRICA DS SMITH.....	24
FIGURA 32. TROQUELADORA ROTATORIA DS SMITH.....	24
FIGURA 33. DETALLES DE LA CAJA DISEÑADA.....	25
FIGURA 34. PALÉ EUROPEO.....	26
FIGURA 35. PAPELTIZADO ÓPTIMO.....	28
FIGURA 36. DESARROLLO CARTÓN.....	29
FIGURA 37. FACTOR DE CORRECCIÓN POR ENTRELAZAMIENTO.....	32
FIGURA 38. GRÁFICO TENSIÓN-DEFORMACIÓN (ENSAYO REALIZADO EN ANEXO IV).....	33
FIGURA 39. APLICACIÓN DE LA FUERZA EN SOLAPA SUPERIOR.....	35
FIGURA 40. APLICACIÓN FUERZA SOLAPA INFERIOR.....	36
FIGURA 41. RESTRICCIÓN FIJA.....	36
FIGURA 42. TENSIÓN DE VON MISSES.....	37
FIGURA 43. TENSIÓN DE VON MISSES EN DETALLE DE LA SOLAPA.....	38
FIGURA 44. PRIMERA TENSIÓN PRINCIPAL.....	38
FIGURA 45. PRIMERA TENSIÓN PRINCIPAL EN DETALLE DE SOLAPA.....	39
FIGURA 46. TERCERA TENSIÓN PRINCIPAL.....	39
FIGURA 47. DESPLAZAMIENTOS EJE X.....	40
FIGURA 48. DESPLAZAMIENTO EJE X VISTA SUPERIOR.....	41
FIGURA 49. DESPLAZAMIENTO EJE X DETALLE SOLAPA.....	41
FIGURA 50. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Y.....	42
FIGURA 51. DESPLAZAMIENTO EJE Y DETALLE DE SOLAPA.....	42
FIGURA 52. DESPLAZAMIENTO EJE Z.....	43
FIGURA 53. DESPLAZAMIENTO EJE Z VISTA SUPERIOR.....	43

FIGURA 54. PLANO DEL TROQUEL.....	50
FIGURA 55. PLANO DE CAJA.....	52
FIGURA 56. VISTAS DE LA CAJA.....	53
FIGURA 57. ENSAYO TENSIÓN-DEFORMACIÓN.....	54
FIGURA 58. PRIMERA DEFORMACIÓN PRINCIPAL.....	57
FIGURA 59. TERCERA DEFORMACIÓN PRINCIPAL.....	57
FIGURA 60. DEFORMACIÓN XX.....	58
FIGURA 61. DEFORMACIÓN XY.....	58
FIGURA 62. DEFORMACIÓN XZ.....	59
FIGURA 63. DEFORMACIÓN YY.....	59
FIGURA 64. DEFORMACIÓN YZ.....	60
FIGURA 65. DEFORMACIÓN ZZ.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PERFILES DE ONDULADO.....	11
TABLA 2. DISTRIBUCIÓN EN PALÉ DE LAS CAJAS SEGÚN SUS DIMENSIONES.....	27
TABLA 3. ÍNDICES ECT DE LA ESCALA AFCO.....	30
TABLA 4. FACTOR DE REDUCCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA.....	31
TABLA 5. FACTOR DE REDUCCIÓN SEGÚN DÍAS EN STOCK.....	31
TABLA 6. PROPIEDADES DEL MATERIAL PARA SIMULACIÓN.....	33
TABLA 7. MODULOS DE CIZALLADURA PARA CARTÓN ORTÓTROPO.....	34
TABLA 8. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	44
TABLA 9. VALORES NUMÉRICOS DEL ENSAYO TENSIÓN-DEFORMACIÓN.....	55
TABLA 10. RESULTADOS SIMULACIÓN INVENTOR.....	56

1. Objetivo y metodología

El objetivo de este Trabajo Final de Grado es diseñar un envase de cartón adecuado para una empresa especializada en el sector de cajas de cartón ondulado. En una primera fase se va a analizar el estado del arte específico del sector en España y las propiedades de este tipo de envases con un carácter técnico, para posteriormente, en una segunda fase abordar los términos de diseño y verificación del producto.

El diseño propuesto en el proyecto es apto para fabricar en cualquier empresa del sector. No obstante, para realizar la validación de cálculos, se han empleado datos aportados por la empresa DS Smith, situada en la localidad de Andorra, provincia de Teruel.

La finalidad del estudio es obtener un envase de cartón realizable en la fábrica andorrana, analizando sus propiedades para cumplir con los requisitos que requiere un embalaje de este tipo. Este producto no se fabrica de forma unitaria, si no que de cada plancha de cartón se producen varias cajas, optimizando el aprovechamiento de la maquinaria específica, de la materia prima y aumentando el beneficio de la empresa, al producir cajas de una forma más rápida. Por ello también se va a diseñar el troquel necesario para producir en cada plancha tres cajas iguales del envase propuesto.

Apropiado a la localización de la fábrica y su entorno, se ha decidido que el envase vaya destinado para el transporte de fruta, más concretamente para el melocotón de Calanda, debido a la proximidad con los campos y empresas recolectoras y la gran producción que demanda.

Para profundizar en los datos técnicos que la empresa DS Smith ha proporcionado, se ha realizado un análisis previo del sector industrial en España y de su evolución en los últimos años, así como un estudio detallado de todo lo relacionado con el cartón como material, su producción y las propiedades que ofrece, las cuales lo hacen un material en auge en el embalaje actualmente.

La metodología seguida consiste en un **primer apartado** donde se introducen el objetivo y el contexto del proyecto.

En el **apartado 2** se explica todo lo relacionado con la industria del cartón. Se analiza desde la invención del material hasta los productos actuales desarrollando toda su evolución, así como las empresas punteras del sector y la importancia de estas dentro de la industrial española.

El **apartado 3** incluye una descripción global del cartón, abarcando desde su proceso productivo y los tipos distintos de variedades que se pueden encontrar, hasta un enfoque técnico de las propiedades. También se hace referencia al Código Internacional de Cajas de Cartón Ondulado que normaliza los diseños de cajas.

Posteriormente, en el **apartado 4** se analiza el envase diseñado. Cuál es la finalidad de su diseño y de cada una de sus propiedades justificando la solución elegida. Se incluye un estudio de paletización para determinar sus dimensiones, cálculos teóricos para determinar sus características y una simulación por elementos finitos que corrobora que está perfectamente diseñado para un uso real.

En el **apartado 5** se incluyen las conclusiones del Trabajo Final de Grado y toda la investigación realizada y en el **apartado 6** un pequeño glosario con las palabras técnicas citadas en el documento con su correspondiente explicación.

Para finalizar el **apartado 7** ofrece las fuentes bibliográficas consultadas para la realización del trabajo y posteriormente un último **capítulo 8** con anexos de los cálculos realizados y los planos diseñados.

2. La industria del cartón

2.1 La evolución industrial del cartón

Las primeras cajas de cartón ondulado datan de 1874, patentado por *Oliver Long*. Anteriormente ya se habían usado cajas de cartón, aunque no eran muy resistentes ya que se deterioraban durante el transporte y almacenaje.

Posteriormente en EEUU fue Robert Gair, considerado el padre del cartón plegado, quien diseñó la caja con hendiduras y pegado en la solapa. También diseñó las primeras máquinas para fabricar cartón, pero producían láminas muy pequeñas (entre 30 y 45 cm) ya que inicialmente este material solo se empleaba como refuerzo interior y embalaje externo para cajas de madera o barriles.

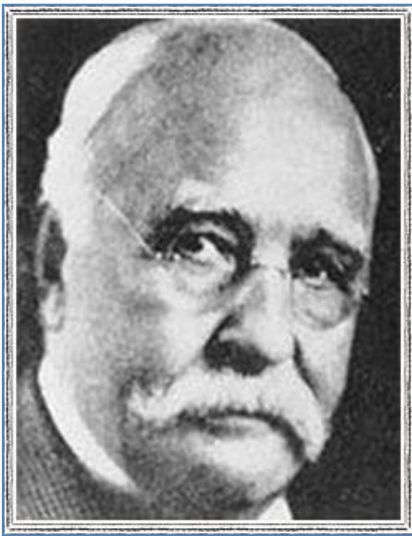


Figura 1. Robert Gair

La gran evolución de la caja ondulada se llevó a cabo en el desarrollo industrial de EEUU, a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX.

Desde entonces la evolución de la maquinaria ha sido constante y se han producido grandes progresos, como la cantidad de papel empleado en la fabricación del cartón, para aumentar su resistencia.

Hoy en día la caja de cartón es el embalaje de preferencia para el transporte de mercancías. Ya utilizado en las carretas de madera hace siglos, hasta los aviones más modernos. Actualmente con el gran *boom* que ha supuesto Internet y la compra online se ha magnificado más aun su uso.

2.2 Envase y embalaje en España

La industria del cartón española se ha consolidado como la cuarta en el ranking de producción en Europa (tras Alemania, Italia y Francia).

En 2016 la facturación de forma directa e indirecta del sector en España alcanzó los 4.476 millones de euros y generó casi 22.000 puestos de trabajo.

A continuación se observan la evolución en los últimos diez años de la producción de cartón ondulado en millones de metros cuadrados.

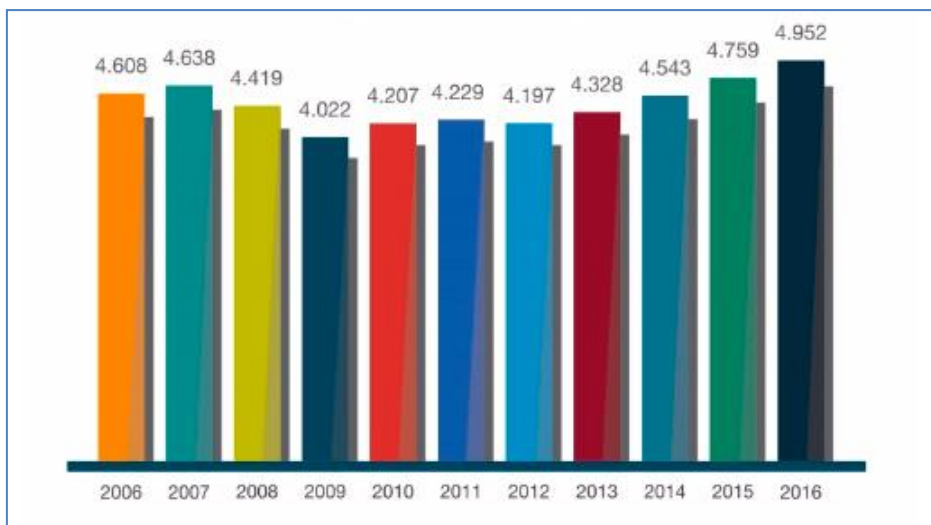


Figura 2. Producción de cartón ondulado en España en la última década

Esto repercute en las fábricas productoras. Se puede observar la cantidad de papel consumido en las onduladoras nacionales a lo largo de los últimos diez años, expresado en miles de toneladas.

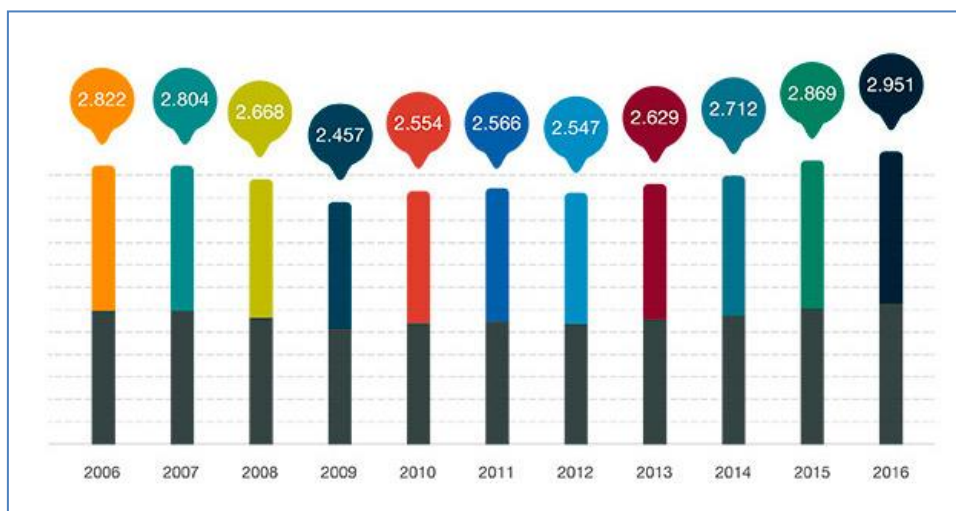


Figura 3. Cantidad de papel consumido en las onduladoras españolas.

Estas voluminosas cifras son principalmente por sus grandes prestaciones y su buena relación calidad-precio.

Su uso como se observa a continuación es muy variado, interviniendo en la mayor parte de los ámbitos. Como primer gran sector consumidor de cartón ondulado está el sector agrícola y los productos alimenticios, pero también podemos encontrar este material en la industria química, perfumería, producciones de cerámica y vidrio entre otros. Cabe destacar que el 30% de las personas adultas son fumadores en nuestro país y cada una consume una media de 2.481 cigarrillos al año, lo que implica unas 124 cajetillas de tabaco. Pese a esta gran cifra de consumo únicamente en este sector, esto representa el 1.6% de la producción total en España, con lo que se puede hacer una idea de los volúmenes que mueve dicho material.

La media de consumo en España de cartón ondulado en kg por habitante y año es aproximadamente de 57,26 kg.

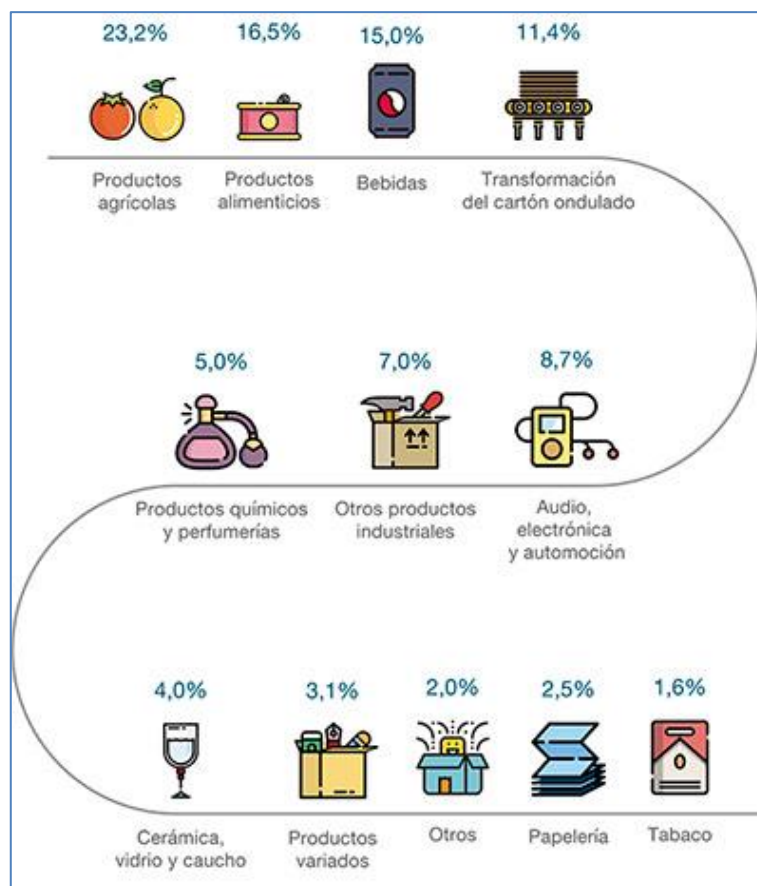


Figura 4. Consumo cartón por sectores en España

Posteriormente se pueden observar varios datos relevantes del sector en nuestro país:



Figura 5. Datos del sector del cartón en España

2.3 Principales empresas españolas del sector

Como referencia en el sector dentro de España se encuentra **Smurfit Kappa S.A** que cuenta con 370 fábricas distribuidas en 34 países distintos. Cuenta con más de 45.000 empleados entre todas sus plantas.

Entre España y Portugal poseen 22 fábricas encargadas de la fabricación propia de papel y embalajes de cartón ondulado, todas ellas con la certificación de calidad ISO 9001:2008. Producen unos 4 millones de cajas al día únicamente en estas 22 plantas generando una facturación de más de 560 millones de euros anuales.



Figura 6. Logotipo Smurfit Kappa

Otra de las empresas referentes es **Saica Pack S.L** cuya oficina central se encuentra en Zaragoza.



Figura 7. Logotipo Saica Pack S.L

De entre las 45 plantas de fabricación que tiene cabe destacar la de Zaragoza, que cuenta con más de 9000 empleados (1.170 en Aragón), factura anualmente unos 2.500 millones de euros.

Una de las iniciativas más emblemáticas de la empresa en los últimos años ha sido la puesta en funcionamiento la planta de valorización energética de El Burgo de Ebro donde se pueden procesar las 500.000 toneladas de residuos industriales que provienen de sus fábricas de papel de Zaragoza y El Burgo aprovechando el vapor de agua producido con estos residuos para generar electricidad.

En Castellón encontramos otra gran empresa: **Cartonajes la Plana S.L.**, líderes en el embalaje industrial cerámico mediante cartón corrugado. Poseen 3 plantas de producción, 13 de montaje y unos 40 puntos comerciales repartidos por toda la península con una capacidad productiva de unos 2 millones de cajas diarios.



Figura 8. Logotipo Cartonajes la Plana S.L.

Sin duda otra empresa referente mundial es **DS Smith**, multinacional británica



Figura 9. Logotipo DS Smith

implantada en 37 países con aproximadamente 26.000 operarios a su servicio. Cabe destacar dentro de nuestra comunidad la empresa localizada en Andorra, Teruel, con una facturación anual de unos 40 millones de euros. Cuenta con más de 200 empleados que generan aproximadamente 75 millones de metros cuadrados anuales abasteciendo a 700 clientes como Nestle o General Mills.

3. El cartón como material

3.1 Descripción general

El cartón ondulado es un material utilizado habitualmente para la fabricación de envases y embalajes.

Para entender que es el cartón, primero debemos analizar el material del que está compuesto, el papel.

El papel es un material compuesto por pulpa de celulosa (pasta de fibras vegetales molidas suspendidas en agua) entrelazadas irregularmente, pero fuertemente adheridas entre sí.

El cartón se produce por superposición de papeles en múltiples formas, creando la gran amplia gama de cartones que encontramos en el mercado actualmente.

El cartón más utilizado actualmente en *packaging* es el cartón ondulado, compuesto por una estructura mecánica formada por la unión de varios papeles equidistantes por uno o varios papeles en forma de onda.

El cartón posee una gran ventaja medioambiental que no tienen la mayoría de los materiales ya que se fabrica con recursos sostenibles y renovables, principalmente pinos y abetos de rápido crecimiento. Además, es un material biodegradable y reciclable hasta que las fibras de celulosa que proporcionan la resistencia se deterioran debido al continuo procesamiento.

3.2 Tipos de papel y cartón

Cabe mencionar con anterioridad a la clasificación una serie de aspectos a tener en cuenta. Todos los tipos de cartón se fabrican utilizando una estructura multicapa y las diferencias entre los cuatro tipos de cartón básicos vienen condicionadas por el material con el que está realizada cada una de ellas. Algunos utilizan solo pasta virgen, otros fibras recuperadas y otros la combinación entre ambos.

Además hay muchas variantes adaptadas según el uso al que vaya destinado. Se le puede añadir aditivos para hacerlo resistente a agua y humedad para envases del sector de alimentos congelados; o añadir una capa de plástico mediante extrusión para protegerla de líquidos o grasas, para el embalaje de comida para animales.

3.2.1 Tipos de cartón según su composición

Cartón sólido blanqueado SBB/SBS/GZ:

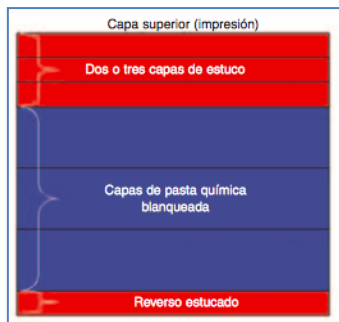


Figura 10. Composición cartón sólido blanqueado

Compuesto exclusivamente por pasta química blanqueada tanto en la parte del centro como en la cara. Consta de dos o tres capas de estuco en la cara superior u otras dos en el reverso. Utilizado principalmente en *packaging* de lujo y combinado con otros materiales para la fabricación de envases para líquidos.

Cartón sólido no blanqueado SUB/SUS:

Compuesto únicamente con pasta química no blanqueada. Posee dos o tres capas de estuco en la cara superior y en ocasiones también se le aplica otra de estuco al reverso. Su uso principal es para envases agrupadores de botellas o latas ya que no es muy resistente y puede tratarse para que sea resistente a los líquidos.

Cartón folding FBB/GC/UC:

Se fabrica con varias capas de pasta mecánica situadas entre dos de pasta química estucadas, a la que se le añade dos o tres capas de estuco en la parte superior y una en el reverso. Muy utilizado para empaquetado de todo tipo debido a su relación calidad-precio.

Cartón de fibras recicladas WLC/GD/GT/UD:



Básicamente compuesto de fibras recuperadas. Contiene muchas capas de distintos tipos de materia prima, aunque en la cara se utiliza papel recuperado blanco. Normalmente tiene tres capas de estuco en la cara superior y una en el reverso. Tiene un abanico muy amplio de aplicaciones.

Figura 11. Composición cartón de fibras




3.2.2 Tipos de cartón según su estructura

Analizando el tipo de cartón con la estructura más común el *packaging* se observan las múltiples variedades que existen de **cartón corrugado u ondulado**:

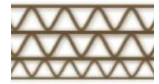
Su estructura básica se compone de una plancha interna con forma de onda, reforzada con planchas a ambos lados, denominadas cubiertas o liners. Las propiedades mecánicas que posee esta estructura es debida al trabajo conjunto de las tres láminas.

Dentro del cartón corrugado podemos clasificarlo según el número de capas por las que esté compuesto, el tipo de onda y la resistencia.

En cuanto al **número de capas**:

- Una cara (Single Face): compuesto de una plancha ondulada y un liner. Es el más frágil. Utilizado para envoltorios. 
- Sencillo (Single Wall): compuesto por una lámina ondulada y dos de liner, es el más utilizado para todo tipo de aplicaciones. 
- Doble pared (Double Wall): dos planchas onduladas y tres liner. Se usa para productos de mayor peso o más frágiles. 

- Triple pared (Triple Wall): es la composición más resistente, lo componen tres planchas onduladas y cuatro liner. Posee la mayor resistencia.



Según el **tipo de onda** se pueden definir diferentes perfiles en función del espesor del cartón:

Perfil del ondulado	Espesor del cartón mm
Onda muy grande	>5 mm
Onda grande (canal A)	5 mm
Onda mediana (canal C)	4 mm
Onda pequeña (canal B)	3 mm
Micro canal (canal E)	2 mm
Mini micro canal (canal F)	1mm

Tabla 1. Perfiles de ondulado

Las de tipo A tienen una resistencia mayor a la compresión vertical.

Las de tipo B poseen una mayor resistencia a la compresión plana utilizadas para el embalaje de frutas y verduras.

El tipo C se caracteriza por estar fabricadas con una menor cantidad de papel que las anteriores.

Otro tipo con una onda de perfil más delgado es la de tipo E que se utiliza para embalajes unitarios o destinados para la exhibición de productos.

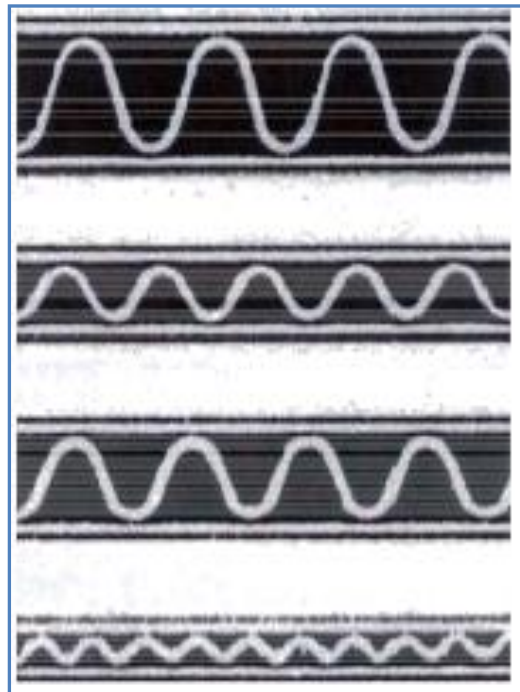


Figura 12. Tipos de ondas del cartón

3.3 Propiedades del cartón

Las propiedades del papel del que se compone el cartón separándolas en físicas, mecánicas, específicas y de uso son las siguientes:

- Propiedades físicas: referentes al aspecto del papel, su estructura y textura.
- Propiedades mecánicas: resistencia del papel y su rigidez.
- Propiedades específicas: relacionadas con la humedad y la permeabilidad.
- Propiedades de uso: propiedades que definen la aptitud del material en función del uso: ondulación, reacción al contacto con los alimentos etc.

3.3.1 Propiedades físicas del papel para ondular

Referentes al aspecto, el gramaje, espesor, humedad y permeabilidad frente a aire y líquidos.

Aspecto: la tripa del embalaje siempre tiene un color crudo ya que no es visible y así se evitan gastos innecesarios. Las caras exteriores pueden ser de un color crudo también o darle una tonalidad blanca, que se puede conseguir de varias formas: ya sea usando una pasta blanqueada o poniendo una capa de pigmento teñida de blanco.

Gramaje: propiedad fundamental para definir el material. Designa la cantidad de papel que hay por unidad de superficie, expresada en gramos por metro cuadrado.

Espesor: propiedad ligada con el tipo de onda del embalaje, expresada en milímetros.

Humedad: relación que hay entre la cantidad de agua que contiene el papel y su peso, expresada en %. Una pequeña variación de esta propiedad puede conducir a cambios dimensionales, variaciones de las propiedades mecánicas y la aparición de ciertos defectos, como pliegues o arrugas.

Permeabilidad al aire y a los líquidos: capacidad del papel que le permite no alterar su estructura interna al ser atravesado por un flujo. En la práctica se emplean varios métodos para medir esta propiedad:

- Permeabilidad Gurley: se mide el tiempo necesario para pasar 100 ml de *aire* a través de la muestra.
- Grado Cobb: ensayo que mide la cantidad de agua (en g/m²) absorbida por el papel durante 60 segundos.

3.3.2 Propiedades mecánicas del papel para ondular

Generalmente, las propiedades mecánicas del papel aumentan proporcionalmente con el gramaje.

Las propiedades mecánicas más relevantes del papel para ondular son:

- Resistencia al aplastamiento en plano: CMT (*Corrugating Medium Test*)
- Resistencia a la compresión sobre el canto: RCT (*Ring Crush Test*) y CCT (*Corrugated Crush Test*)
- Resistencia a la compresión en corto: SCT (*Short Compression Test*)
- Resistencia al estallido
- Resistencia al plegado

Resistencia al aplastamiento en plano: expresa la resistencia al aplastamiento en plano de un tipo de onda dado, se expresa en Newton y varía según el gramaje y el tipo de onda.

Resistencia a la compresión de canto: el RCT evalúa la resistencia que tiene el papel cuando se encuentra sometido a una fuerza de compresión ejercida sobre el espesor de una muestra estandarizada en forma de anillo, con una circunferencia de 152,4 mm.

La medida del CCT indica la resistencia a la compresión del canto de una muestra ondulada ejercida sobre el canto. Ambas medidas se expresan en Newton.

Resistencia a la compresión en corto: representa la resistencia a la compresión en la dirección transversal del papel entre dos mordazas separadas una distancia de 0,7 mm (esto evita la deformación de la muestra y solo se tiene en cuenta las características de las fibras).

Resistencia al estallido: define la capacidad que tiene para resistir una presión local ejercida de una manera progresiva, expresada en kilopascales.

Resistencia al plegado: determina la resistencia que tiene el papel de soportar un cierto número de plegados consecutivos sin romperse.

3.3.3 Propiedades del cartón ondulado

Una vez analizadas las propiedades del papel, se entiende más fácilmente las grandes propiedades que posee el cartón:

Se trata de un material con una **alta durabilidad**, debido a las propiedades de las fibras de papel. Esto le permite soportar una gran cantidad de peso que es la finalidad principal para la que se utiliza el cartón, el embalaje. Esto es gracias a propiedades como su rigidez, fuerte resistencia al arqueado, su resistencia a la rotura, resistencia a la compresión evitando que el embalaje se derrumbe o la fuerza de superficie que es la capacidad para resistir fuerzas en su superficie, como pueden ser tintas o adhesivos.

La **resistencia** depende de dos factores, el gramaje y la altura de onda. Esta propiedad viene definida por dos parámetros básicos del cartón: la consistencia ECT y la resistencia a la compresión vertical BCT.

Método BCT

Es un ensayo de carga puro de dirección vertical que se utiliza como regla en las cajas de cartón corrugado vacías y selladas, comprimiéndose entre superficies paralelas a una velocidad de compresión constante. La fuerza máxima admisible queda registrada como la resistencia a compresión de la caja. Este ensayo se lleva a cabo bajo una atmosfera estandarizada de 23°C y 50% de humedad relativa.

Método ECT

Ensayo que mide la resistencia a la compresión del borde. Es una de las propiedades más importantes del cartón. Se aplica una carga entre placas paralelas a una velocidad dada con la pieza de ensayo de pie sobre un borde perpendicular a las placas. Mimas condiciones de ensayo que en BCT, 23°C y 50% de humedad relativa.

Posee una **gran sustentabilidad** ya que se trata del material más reciclado, además de que la materia prima principal proviene de los árboles, una fuente renovable.

Otra propiedad fundamental para justificar su gran uso es la **adaptabilidad** ya que es fácil de satisfacer las necesidades de los consumidores, sencillo de cortar, doblar o imprimir sobre él.

También es útil en un amplio rango de temperaturas, entre -40°C a 120°C porque posee una **buena estabilidad térmica**, siendo además resistente al agua hirviendo.

Se trata a su vez de un material **aislante** ya que las fibras de madera conducen mal la energía y el calor. El cartón corrugado es aún más aislante ya que posee un aislamiento adicional debido al acanalado de aire entre sus capas.

Y si a todas estas propiedades sumamos que se trata de un material **relativamente barato**, debido a que gran parte del cartón que utilizamos se trata de cartón reciclado, hace que sea un gran material y que posea múltiples ventajas frente a otros competidores del mercado.

3.4 Fabricación y packaging

En este apartado se va a centrar en la fabricación del cartón corrugado que es una de las variedades más comercializadas actualmente.

Se divide en tres operaciones principales: proceso productivo, troquelado y doblado.

El **proceso de producción** se inicia con una gran bobina de papel (*Foto 6*) variando el ancho y la dureza según el tipo de caja que se quiera obtener. Encontramos papeles de anchuras desde 1830 mm hasta 2500 mm pasando por una amplia variedad. Dentro de los tipos de papel para las capas externas del cartón corrugado podemos elegir, entre otros, un papel *kraft* virgen que tiene un color marrón, *kraft* blanco o un papel estucado, que posee un brillo característico. Para la fabricación de las tripas podemos encontrar también una amplia gama, por ejemplo el SNA-150 que tiene una dureza mayor que el TEST-90 que se utiliza para usos que requieran prestaciones menores.



Figura 14. Almacén de bobinas



Figura 13. Corrugadora

La bobina de papel, bien orientada, alimenta a la máquina corrugadora (*Figura 14*) ya que posee una cara preparada para ser encolada y otra con un acabado más vistoso, donde se presiona con dos rodillos mientras se suministra vapor de agua a alta temperatura, que le otorga la forma de onda deseada.

Otro rodillo le aplica en una cara de la hoja corrugada cola de pegar (*Figura 15*), compuesta por agua y almidón, materiales que hacen que posteriormente no se contaminen los productos que van a empaquetar.

Posteriormente la máquina le adhiere un liner (hoja exterior) por un lado de la onda y repite el proceso por la otra cara. Según el tipo de relleno que se requiera (doble, triple...) se repite el proceso varias veces.

El cartón corrugado ya pegado pasa por unas sierras, donde se cortan los bordes irregulares, para obtener un material de perfil uniforme.



Figura 15. Encolado y pegado



Figura 16. Pinzas separadoras

Aún en la máquina corrugadora se puede llegar a cortar la plancha en nueve partes según el tamaño de caja que queremos obtener.

La última función de la corrugadora es separar las planchas de cartón utilizando unas pinzas flexibles de aluminio (*Figura 16*).

Cuando las planchas de cartón salen de la maquina corrugadora se someten a un control de calidad antes de ser enviadas a la zona de impresión.

La impresión de las cajas comienza en la “cocina” de tintas donde se realiza la mezcla de pintura, llegando a alcanzar una gama de 5000 colores distintos. Se suelen usar tintas a base de agua porque secan al instante.

La imprenta aplica la tinta a los cartones por grupo de colores en cuatro etapas consecutivas. Los avances tecnológicos de la actualidad pueden imprimir tanto dibujos o ilustraciones como fotografías si utilizamos impresión de tipo litográfica.

Posteriormente a la salida de las planchas de cartón en la zona de impresión una máquina apiladora coloca los cartones en pilas de entre 25 y 80 planchas dependiendo de su grosor para posteriormente enviar los cartones de uno en uno al siguiente procesador, a una velocidad aproximada de unos 8000 cartones por hora.

El **troquelado** de cartón sirve para cortar y perforar formas irregulares por medio de un molde-troquel, formado por pletinas de corte. Ese molde-troquel ejerce presión sobre la pletina de la troqueladora (*Figura 17*) para que el cartón quede modificado.



Figura 17. Troqueladora

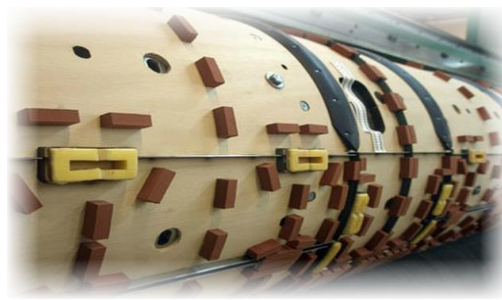


Figura 18: Troquel rotatorio

Primero mediante los troqueles se perforan los cartones para formar las asas y la tapa con unas sierras muy precisas. Procesando hasta 90 cajas por minuto.

Los recortes sobrantes se envían a una planta de papel con una capacidad de reciclado de hasta 6 veces.

Por último, el **proceso de doblado** se lleva a cabo en la máquina encoladora-dobladora de cajas compuesta por tres partes: el encolado, el pliegue y por último el apilamiento. Esta máquina tiene entorno a un promedio de velocidad de plegado de 150 piezas por minuto.

Se doblan las planchas (*Figura 19*) siguiendo las líneas marcadas por la corrugadora, a continuación se aplica cola y se pegan, para dar por terminada la caja.

Esto pasa a una maquina apiladora (*Figura 20*) donde un brazo separador traslada los paquetes a las bandejas de transporte.



Figura 19. Proceso de plegado



Figura 20. Apiladora

Por último, si es necesario, las cajas que lo requieran pasan por una máquina de recorte para las asas o tapas más complejas, las cuales no se pueden realizar mediante troqueles.

Antes de apilar las cajas y enviarlas al almacén se someten a un último proceso de inspección, para verificar que la calidad es la requerida.

Una vez paletizadas, las cajas son flejadas con plástico y enviadas al almacén donde se guardan hasta su distribución.

3.5 Código internacional de cajas de cartón

Este código ha sido desarrollado por FEFCO (*Federación Europea de Fabricantes de Cartón Ondulado*) y por ESBO (*European Solid Board Organization*) para normalizar las descripciones y diseños de las cajas de cartón ondulado, mediante sencillos símbolos de uso internacional. Únicamente estas dos organizaciones pueden modificar dicho código.

Estas referencias pueden emplearse en pedidos y especificaciones de cajas para embalaje.

Los planos de este código son siempre desde la perspectiva interior de la caja.

Dimensiones:

Si no se indica lo contrario siempre estarán en milímetros en la forma Largo (L) x Ancho (A) x Alto (H) medidas bajo condiciones climatológicas normalizadas.

Largo (L): dimensión mayor al abrir

Ancho (A): dimensión menos al abrir

Alto (H): dimensión desde el extremo de apertura a la base

En cajas de tipo telescópico la altura de la tapa (h) se indicará como una cuarta medida de la siguiente forma: L x A x H/h

En cajas con solapas exteriores que monten, la longitud del área superpuesta (o) se indicará de la misma forma: L x A x H/o

Las referencias del código son las mostradas en la siguiente imagen:



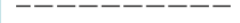






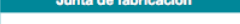







Símbolo dibujado	Código Ordenador	Descripción
Cuts, scores, slits etc.		
	CL	Contorno de cajas armadas o líneas de corte en plancha
	SC	Cortes ranurados
	CI	Líneas de hendido (plegado hacia el interior)
	CO	Líneas de hendido (plegado hacia el exterior)
	SI	Líneas de corte-hendido (plegado hacia el interior)
	SO	Líneas de corte-hendido (plegado hacia el exterior)
	DS	Líneas de doble hendido
	PL	Líneas de perforado
	SE	Líneas de corte intermitente
	TP	Perforación para desgarro
Junta de fabricación		
	SJ	Grapada
	TJ	Encintada
	GJ	Encolada
Aperturas		
	PC	handholds stripped
	UC	Asas parcialmente recortadas
	NC	Asas parcialmente recortadas
Dirección de la onda		
	FD	Indicador de la dirección de la onda

Figura 21. Referencias código internacional

En cuanto a los grupos de **modelos básicos** contenidos en el código se rigen por la siguiente estructura: XXXX-XXXX, siendo los cuatro primeros dígitos el modelo/diseño y los cuatro siguientes el número de versión para diferenciar las variaciones dentro de dicho modelo estándar. A continuación se muestran algunos ejemplos según esta codificación:

01XX-XXXX: Rollos y planchas comerciales


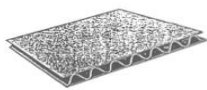
	0100
	0110

Figura 22. Rollos y planchas comerciales

02XX-XXXX: Cajas con solapas, consisten en una pieza con juntas de fabricación encoladas, cosidas o pegadas con cintas y solapas superiores e inferiores.

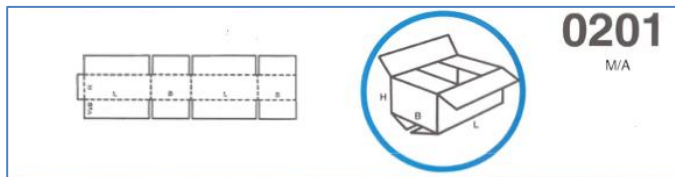


Figura 23. Cajas con solapas

*Las letras M/A indican que el montaje puede ser manual o automático.

03XX-XXXX: cajas telescópicas, fabricadas con más de una pieza, se caracterizan por que la tapa se desliza sobre el cuerpo de la caja.

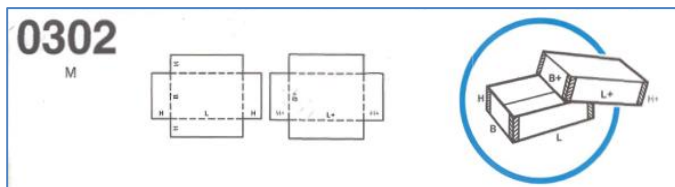


Figura 24. Cajas telescópicas

*Se puede observar que la junta se realiza mediante cinta.

04XX-XXXX: hacen referencia a las cajas plegables y bandejas, generalmente son cajas con una pieza de cartón ondulado.



Figura 25. Cajas plegables y bandejas

05XX-XXXX: cajas de tipo deslizante. Constan de varias piezas que deslizan en diferentes direcciones una dentro de otra.

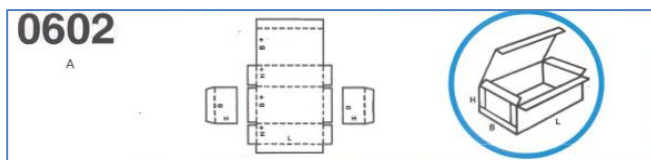


Figura 26. Cajas deslizantes

06XX-XXXX: cajas de tipo rígidas. Formadas por dos piezas separadas que requieren de un grapado u otro tipo de junta para utilizarse.

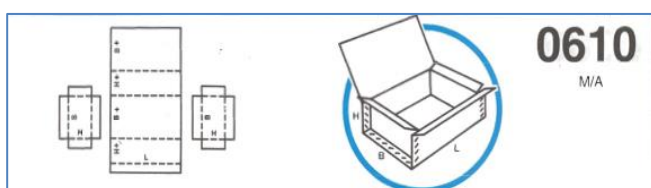


Figura 27. Cajas rígidas

07XX-XXXX: cajas de encolado rápido, generalmente de una sola pieza que se entregan extendidas en un solo plano con un fácil montaje.

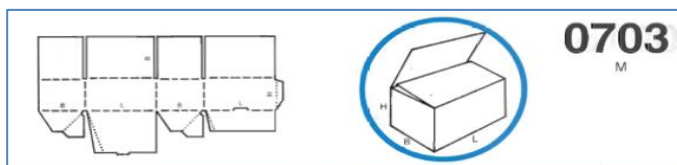


Figura 28. Cajas de encolado rápido

09XX-XXXX: hace referencia a los acondicionamientos interiores como forros, casilleros o divisores en función de las necesidades que se requieran.

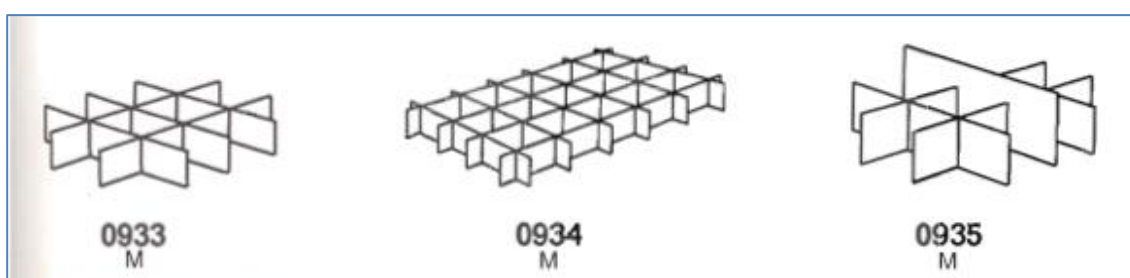


Figura 29. Acondicionamientos interiores

3.6 Impacto medioambiental

El cartón se considera uno de los materiales más respetuosos con el medioambiente que hay ya que limita las emisiones de dióxido de carbono y de petróleo hasta un 60% comparándolo con otros tipos de envases. También es 100% reciclable y biodegradable.

Los envases de cartón son los que menos dañan el medioambiente en todas las categorías por su eficiente uso de las materias primas.

El papel que no entra en el círculo de reciclaje (por estar contaminado y no ser apto) puede ser empleado como combustible al igual que la biomasa residual del proceso de fabricación.

En España la industria papelera se garantiza alrededor de un 75% de papel y cartón reciclado del total consumido, lo que hacen un total de 4,6 millones de toneladas anuales aproximadamente de material reciclado.

4. Nuestro producto

4.1 Descripción

El producto que se va a desarrollar es una **caja de cartón ondulado** destinada para el transporte de productos alimenticios.

La fábrica de producción se encuentra en Andorra, se trata de DS Smith, una referente en su sector como se ha comentado anteriormente.

La caja de cartón diseñada, debido al entorno donde se encuentra la planta de producción, va a estar destinado al transporte de frutas, más concretamente, el conocido **melocotón de Calanda**. Se trata de un producto denominación de origen, considerado una de las mejores variedades del mundo, con una producción anual de más de 20 millones de kilos.

El objetivo del trabajo es el diseño de un troquel para la maquinaria de la empresa andorrana, para producir una caja real, que ofrezca una solución para el producto seleccionado. Cumpliendo en todo caso los requisitos básicos de empaquetado para un buen transporte, capacidad de apilado y máxima protección del producto.

Aportando ensayos que verifiquen el correcto optimizado del embalaje.

4.2 DS Smith Andorra

4.2.1 Localización

Empresa localizada en Andorra, pueblo de Teruel, punto concéntrico entre las ciudades punteras de España. Se trata de un emplazamiento privilegiado con grandes vías de transporte, a apenas 100 km de la capital aragonesa y los enlaces que esto ofrece, por tren, carretera o avión.



Figura 30. Conexiones DS Smith

Esto ofrece una gran ventaja empresarial ya que se encuentra en un punto de transito de gran parte de las mercancías que se transportan cada día pudiendo generar reducciones en los costes de transporte. Esto garantiza respuestas a las necesidades específicas de cada cliente con gran rapidez y un servicio eficiente.

4.2.2 Instalaciones y maquinaria

La nave está construida en el polígono industrial de Andorra. Cuenta con una parcela de 100.000 m² con una superficie cubierta de 27.000 m² equipada con maquinaria de última tecnología.



Figura 31. Vista aérea fabrica DS Smith

La máquina principal de la empresa es la Onduladora Agnati, totalmente automática que alcanza una velocidad de fabricación de cartón de 350 m/min. Posee unos rodillos de ondular de tipo "cassette" que permite intercambiarlos con rapidez. Está

equipada con tres parafinadoras en línea para la fabricación de cartón agrícola, y una rebobinadora para la fabricación de cartón de simple cara. Permite fabricar todo tipo de canales y la combinación de estos: CB, BC, BE.

El apartado de mayor interés para el trabajo se encuentra en las máquinas

troqueladoras. Hay tres diferentes, una Martín DRO 1628 rotativa con cargador y paletizador totalmente automáticos



Figura 32. Troqueladora rotatoria DS Smith

perfecta para bandejas agrícolas. Y

dos troqueladoras planas BOBST SPO 203 adecuadas para los envasados automáticos a alta velocidad y para la fabricación de estuches y bandejas desmontables.

También cuentan con una máquina pegadora-plegadora, una montadora de platos agrícolas que trabaja a una velocidad de 1800 cajas por hora y un sistema de movimentación y paletizado totalmente automático, con múltiples posibilidades de flejado y retractilado de acuerdo a las necesidades específicas de cada cliente.

4.3 Descripción del producto

4.3.1 Diseño

El embalaje para fruta diseñado es ideal para aquellos lugares donde no se dispone de maquinaria ya que es de montaje manual. Se trata de un diseño de bandeja corrugada que facilita la correcta identificación y exposición de los productos.

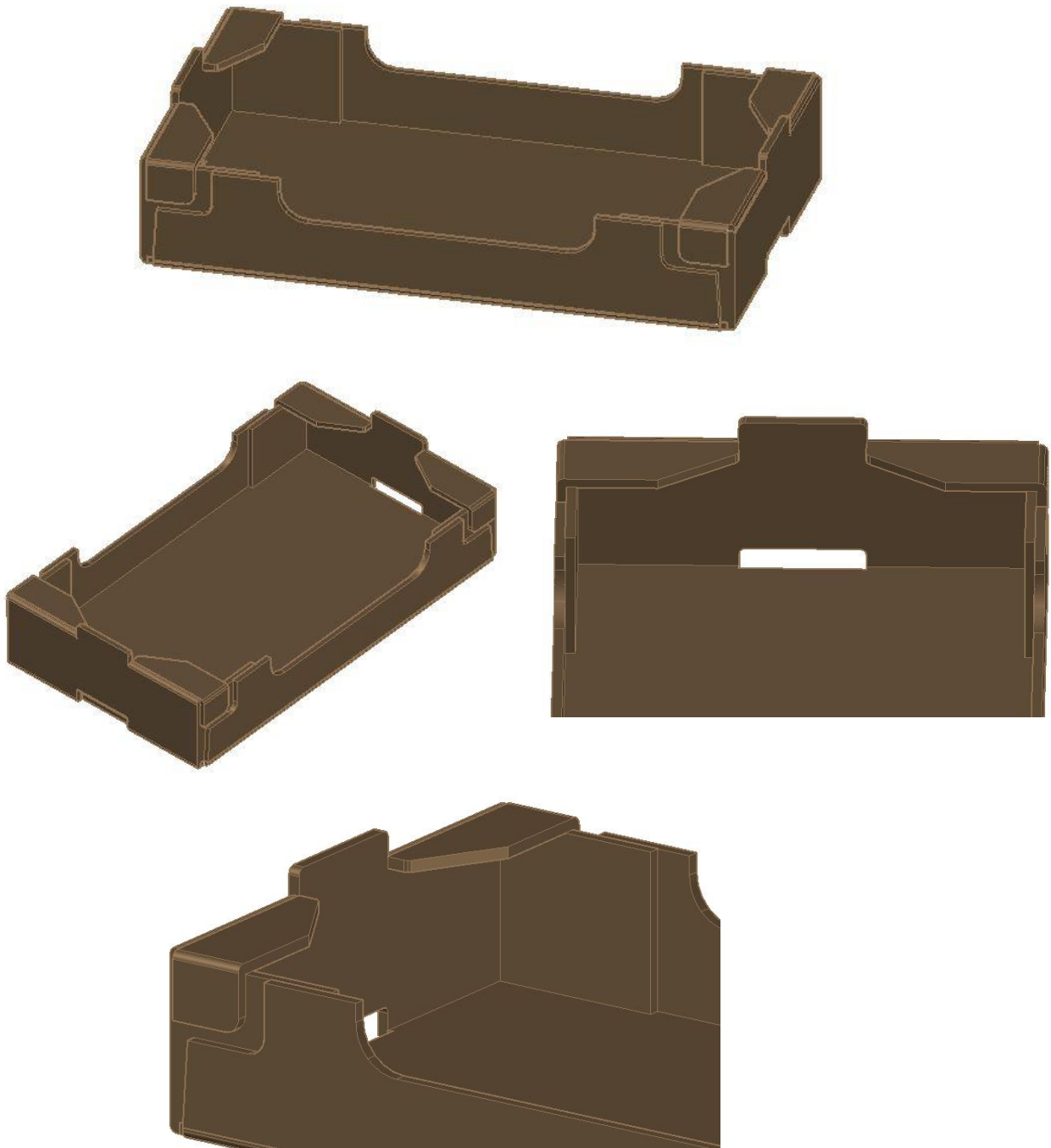


Figura 33. Detalles de la caja diseñada

4.3.2 Dimensiones

Respecto al diseño de la caja en primer lugar se han determinado sus medidas, puesto que es de suma importancia que el embalaje tenga las medidas óptimas para transportar la mayor cantidad posible de mercancía. Se tiene en cuenta que el método de transporte es mediante palé, los cuales serán transportados en camiones principalmente.



Figura 34. Palé europeo

Los palés con los que trabaja la empresa andorrana son palés europeos, son los más usados tanto en España como en Europa. Estos palés están estandarizados y sus medidas son: 1200x800x145 mm.

También hay que tener en cuenta la altura de la mercancía. El palé europeo mide 125 mm de altura. Los camiones normales miden de 2,5 a 2,6 m de altura y es necesario un pequeño margen para maniobrar la mercancía dentro de él sin que esta roce. Cuando no haya limitación de altura, se establece como criterio general una altura máxima de 1200 mm por palé, ya que esta es la altura máxima para remontar dos palés en un contenedor o camión estándar con un margen de maniobra suficiente.

Otra recomendación que hay que tener en cuenta es la norma RAL de AECOC que da una cifra de 1000 kilos como peso máximo para cargar sobre el palé europeo.

A continuación se plantean varios tamaños de cajas, siendo analizadas mediante el *software* de paletización "*Quick Pallet Maker OSx*" para determinar cuál es la opción más óptima:






	Características			Distribución en palé			
	Medidas (mm)	Kg/caja	Peso (g)	nº cajas	Pisos	Kg mercancía	%V ocupado
	290x210x91	2	170	132	11	264	72,23
	400x210x120	5	235	72	8	360	71,66
	495x295x91	10	340	66	11	660	92,13
	545x350x160	15	485	24	6	360	72,32
	600x400x200	20	555	20	5	400	79,48

Tabla 2. Distribución en palé de las cajas según sus dimensiones

Con los datos proporcionados por el programa se observa que la solución más óptima para transportar la máxima cantidad de mercancía por palé es con la caja de dimensiones 495x295x91 mm, donde se ocupa un 92,13% del volumen total posible de transporte, siendo de 660 kg, cumpliendo la normativa que indica que el peso máximo por palé son 1000 kg.

A continuación se muestra dicha distribución:

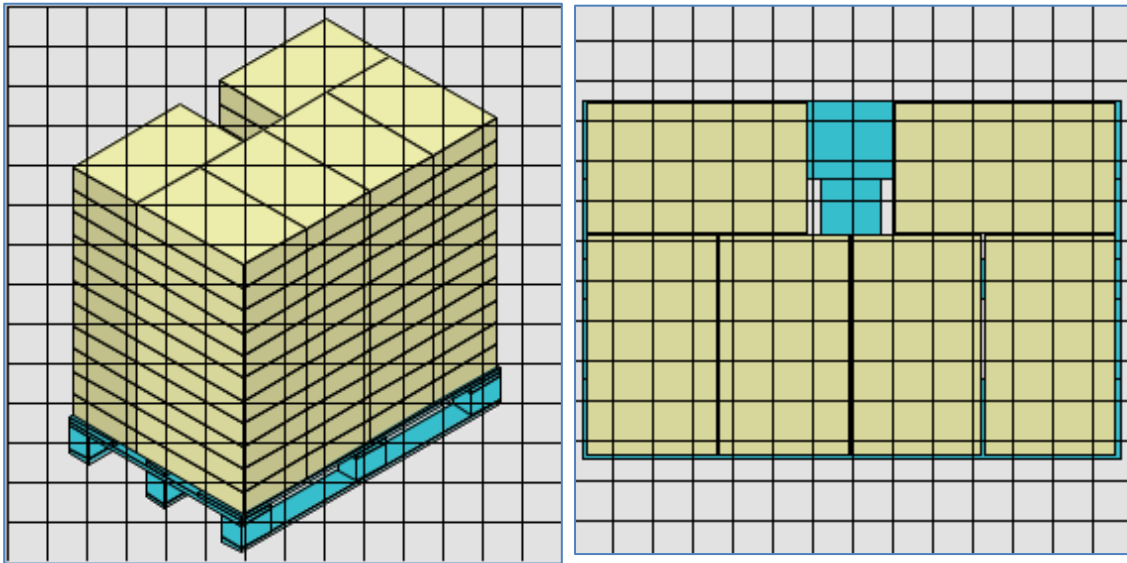


Figura 35. Papeltizado óptimo

Las 66 cajas se distribuyen en 11 pisos de 6 cajas cada uno, debido a la limitación de altura que hay que tener en cuenta como se ha nombrado con anterioridad, 1200 mm. La altura total es:
 $145 \text{ mm de palé} + (91 \text{ mm/piso} * 11 \text{ pisos}) = 1146 \text{ mm} < 1200 \text{ mm}$

Dimensiones: 495x295x91 mm

4.3.3 Propiedades mecánicas

- Gramaje

El cartón seleccionado es un cartón de doble canal BC de 6 mm de altura de onda.

El desarrollo del cartón es KE160-SNA160-K135-SI155-K186, donde se especifica el tipo de papel que compone este doble canal.

Estos papeles están normalizados y cada uno tiene unas propiedades distintas:

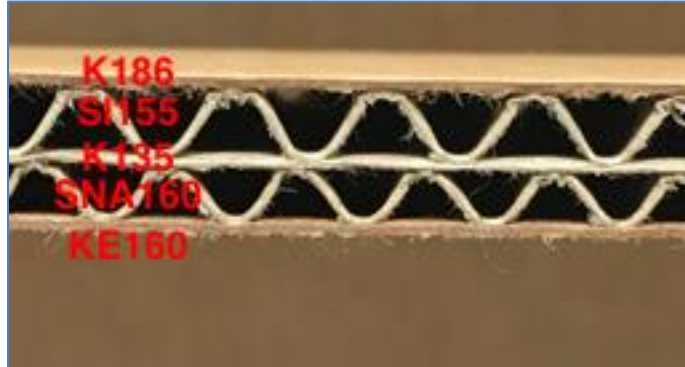


Figura 36. Desarrollo cartón

En la cara externa se encuentra un Kraftliner 186 estucado que posee un gramaje de 182 g/m² con un espesor de 223 μm, se trata de un papel fabricado principalmente con fibra virgen recubierto con una capa que contiene pigmentos de color.

Papeles tipos kraft para los liner ya que sus propiedades más importantes son su resistencia al reventamiento y resistencia a la compresión. Respecto a las ondas, son papel de tipo semiquímico, la onda B tiene un gramaje de 160 g/m² frente a la onda C que tiene 155 g/m², esto es debido a que la onda B tiene una altura menor que la C y por lo tanto genera más ondas en la misma longitud de material, y por eso tiene un gramaje ligeramente superior.

El gramaje total del cartón es 796 g/m² a lo que hay que sumarle el peso de la cola y aditivos que se le añaden para pegar y ondular los papeles, se estima en un 15% del gramaje total.


Gramaje = 915 g/m ²

- ECT

Expresa la resistencia a pandear del cartón cuando es sometido a una carga vertical.

El dato ECT viene dado en la escala AFCO, de acuerdo a la siguiente tabla:

Calidad AFCO	ECT(KN/m)		
DC1	>=3	DC7B	>=8
DC2	>=3.5	DD0	>=5
DC3A	>=4	DD1A	>=6
DC3B	>=4	DD1B	>=6
DC4A	>=5	DD2A	>=7
DC4B	>=5	DD2B	>=7
DC5A	>=6	DD3A	>=8
DC5B	>=6	DD3B	>=8
DC6A	>=7	DD4	>=10
DC6B	>=7	DD5	>=12
DC7A	>=8	DD6	>=15

DC: Cartón de simple cara 


DD: cartón de doble cara 

Tabla 3. Índices ECT de la escala AFCO

Para un cartón de doble canal (DD) con un espesor de 6 mm, nos indican que el ECT es igual o superior a 15 KN/m.

ECT = 15 KN/m

- BCT

Parámetro que expresa la resistencia de apilado vertical. Normalmente se mide en una prensa especialmente diseñada para ello, con unas condiciones medioambientales concretas.

Sin embargo hay otro método para calcular el BCT de forma teórica:

Fórmula de Mckee:

Se estima el valor utilizando el perímetro interior de la caja, el grosor del cartón y el parámetro ECT, nombrado anteriormente:

$$BCT \text{ (kg)} = 1,82 * ECT \text{ (Kn/m)} * 1,02 * \text{Grosor(mm)}^{0,508} * \text{Perímetro (cm)}^{0,492}$$

Los factores 1,82 y 1,02 son de conversión, relacionado con las unidades de las medidas, ya que Mckee en su fórmula original utilizaba libras de fuerza y pulgadas.

$$BCT=1,82*13,1*1,02*6^{0,508}*(2x49,5+2x29,5)^{0,492}=729,43 \text{ Kg}$$

Dicho resultado teórico no tiene en cuenta los factores relativos a la forma de apilado, a la humedad y a la temperatura, que hacen que el resultado del BCT en condiciones reales de almacenamiento se aleje del dado por el ensayo normalizado. Por lo que se van a tener en cuenta los más importantes:

1. Humedad relativa: dependiendo de la humedad en el almacenamiento, se aplican la siguiente relación de factores reductores:

% Humedad relativa	Factor reductor
0-35%	1,1
36-45%	1,1
46-55%	1
56-65%	0,9
66-75%	0,8
76-85%	0,7
86-100%	0,5

Tabla 4. Factor de reducción de humedad relativa

Estos factores son generales, ya que según el tipo de cartón se comporta de distinta manera, pero los utilizados en el diseño son papeles muy susceptibles a debilitarse.

2. Días en stock: las propiedades iniciales del cartón se van debilitando a medida que se encuentra sometido a esfuerzos de presión constantes en el almacén, debilitando su estructura antes de llegar a la rotura.

Días en stock	Factor reductor
0	1
1-3	0,7
4-10	0,65
11-30	0,6
31-60	0,55
61-90	0,55
91-120	0,5
+120	0,45

Tabla 5. Factor de reducción según días en stock

3. Capas entrelazadas: si las cajas no están perfectamente alineadas sobre su perímetro influye negativamente en sus resistencias a compresión, ya que las aristas son la parte más fuerte y el BCT normalizado se mide apoyando el peso sobre ellas.

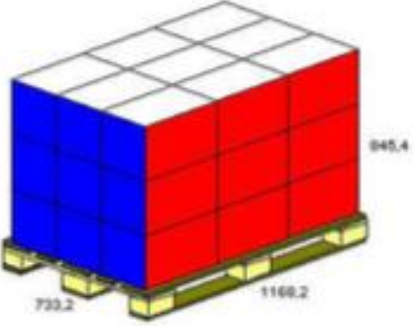
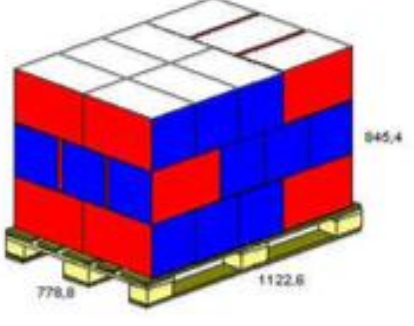
Capas entrelazadas: NO Factor reductor: 1	Capas entrelazadas: SI Factor reductor: 0,6
	

Figura 37. Factor de corrección por entrelazamiento

Los factores más adecuados para nuestro caso son:

- 1) Humedad relativa media en Andorra de 58%: $C_1=0,6$
- 2) De 11 a 30 días en stock por tratarse de productos alimentarios: $C_2=0,9$
- 3) Transporte optimizado con cajas sin entrelazar : $C_3=1$

$$BCT = 729,43 * 0,9 * 0,6 * 1 = 393,89 \text{ Kg}$$

4.3.4 Análisis por elementos finitos

Para el cálculo estructural del diseño propuesto se ha utilizado el software de CAD en 3D y análisis de elementos finitos *INVENTOR PRO 2018 Version*.

4.3.4.1 Propiedades del material

Las propiedades del material que se ha aplicado a la caja, simulando el comportamiento del cartón corrugado de canal BC del que esta compuesto son las siguientes:

General	Densidad	0,1525 g/cm ³
	Límite de elasticidad	0,7051 Pa
Tensión	Módulo de Young	7,7 kPa
	Coefficiente de Poisson	0,15
	Módulo cortante	2040 MPa

Tabla 6. Propiedades del material para simulación

La densidad se ha obtenido a partir del estudio del gramaje y del espesor de 6 mm debido al doble canal BC:

$$\rho = \frac{\text{gramaje}}{\text{espesor}} = \frac{915 \cdot \frac{1(m^2)}{10000(cm^2)}}{0,6(cm)} = 0,1525g / cm$$

Al tratar el material con un comportamiento lineal se cumple la siguiente ecuación:

$$\sigma = E\epsilon$$

Donde la constante de proporcionalidad E, se conoce como módulo de elasticidad o módulo de Young, dado en MPa. Se obtiene como el valor de la pendiente lineal de la función obtenida al relacionar el esfuerzo aplicado con la deformación como se observa en la siguiente figura:

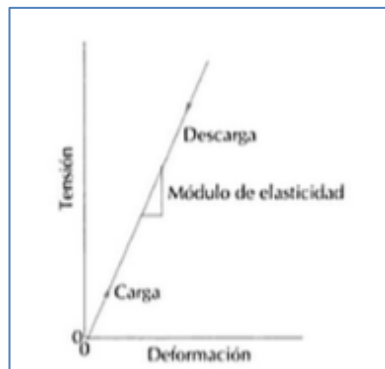


Figura 38. Gráfico tensión-deformación (Ensayo realizado en Anexo IV)

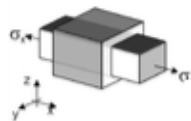
La deformación del material ϵ ocurre cuando la fuerza aplicada sobre él es lo suficientemente grande para que el material falle, correspondiendo a una relación entre la longitud que el material tiene inicialmente y la longitud que tiene después de la aplicación de la fuerza:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Respecto al esfuerzo σ , es la fuerza que actúa perpendicularmente al área debido a las fuerzas externas, dividido entre la superficie donde se aplica según la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

El coeficiente de Poisson es otra característica propia del material. Es una constante elástica que relaciona la deformación transversal con la deformación axial:



$$\mu = -\frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{axial}}$$

El cartón se trata de un material ortótropo que son los materiales en los que sus propiedades dependen en la dirección en la que estén medidas.

Esto es debido a la onda y no tiene las mismas propiedades si están dispuestas de forma vertical o horizontal a la aplicación de la fuerza. Pero para simplificar el análisis se ha tomado como valor promedio 0,15.

También es necesario definir el módulo de cizalladura o cortante, se denota con la letra G y cuyas unidades son de presión. Es la relación entre el esfuerzo y la deformación de corte:

$$G = \frac{\textit{Tensión tagencial}}{\textit{deformación de corte}}$$

Los valores del módulo de cizalladura para el análisis han sido tomados del libro de Baum, G A (1987); "Orthotropic Elastic Constants of Paper":

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

Tabla 7. Modulos de cizalladura para cartón ortótropo

Como se ha simplificado el material evitando la ortotropía de este, se selecciona el valor de $G=2040$ MPa por ser el caso más desfavorable.

4.3.4.2 Fuerzas y restricciones aplicadas

La caja va a estar sometida a una serie de fuerzas verticales que tiene que soportar para evitar el deterioro del producto.

El valor de esta fuerza a sido calculado a partir de los datos del paletizado óptimo que se han obtenido anteriormente.

Como el palé va a transportar 11 filas de cajas poniéndonos en la situación más desfavorable, es decir, la caja inferior, la cual tiene que soportar el peso de los 10 pisos superiores (mercancía y peso propio de la caja):

$$\text{Peso} = 10 \times (10 + 0,340) = 103,4 \text{ Kg} = 10,55 \text{ N}$$

Este peso se aplica sobre las solapas de la caja de forma uniforme ya que es donde se apoyan las cajas superiores. Magnitud de 15,55 N con dirección en el eje $-y$:

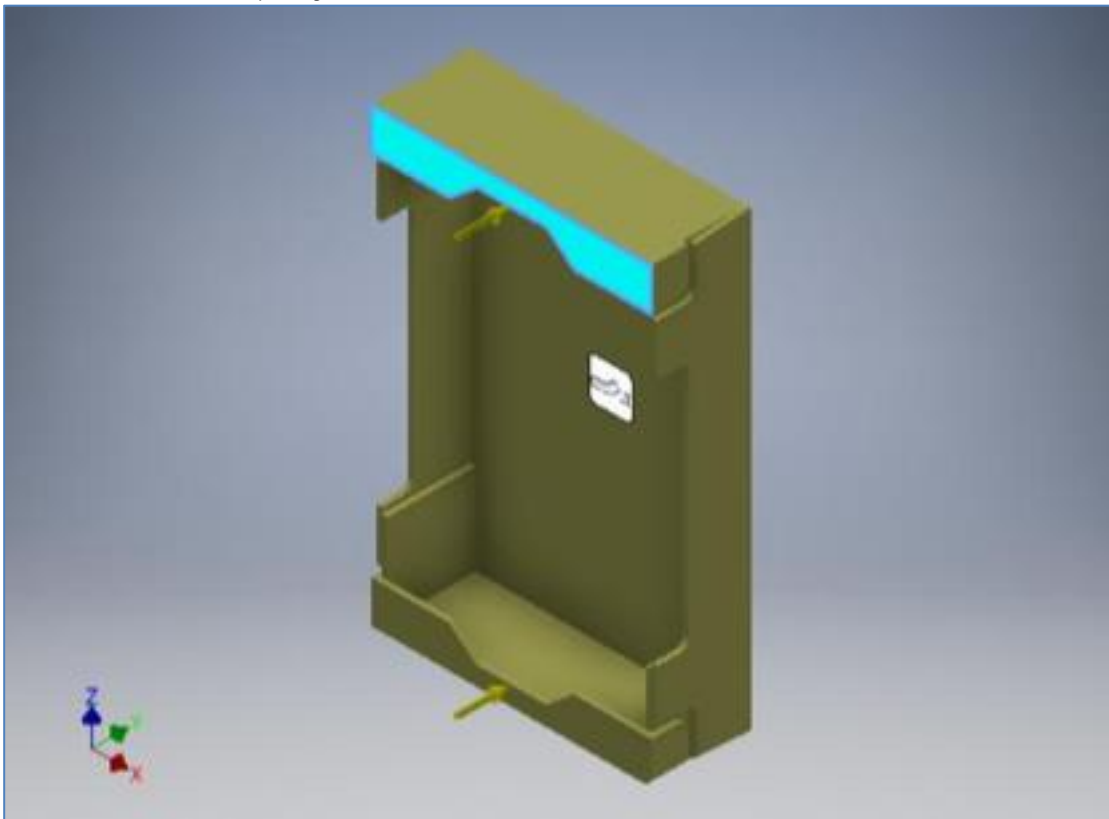


Figura 39. Aplicación de la fuerza en solapa superior

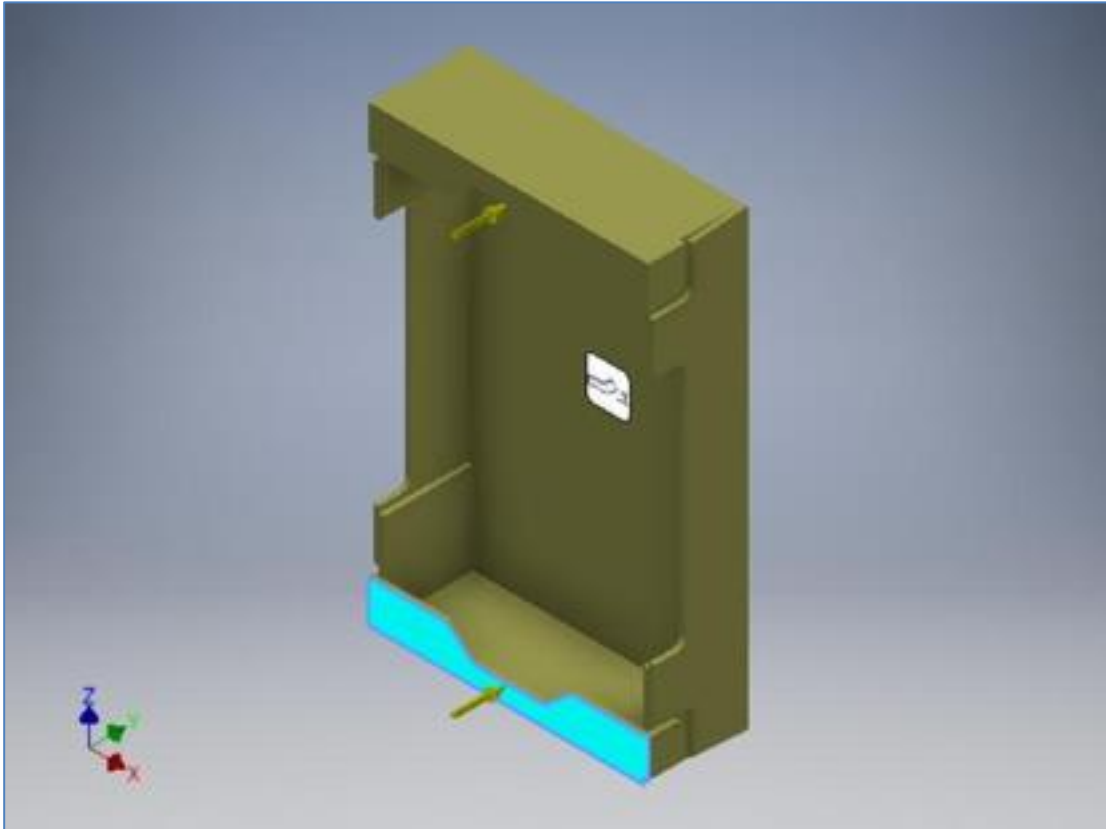


Figura 40. Aplicación fuerza solapa inferior

Respecto a las restricciones aplicadas, únicamente se ha seleccionado un apoyo fijo en la cara inferior de la caja:

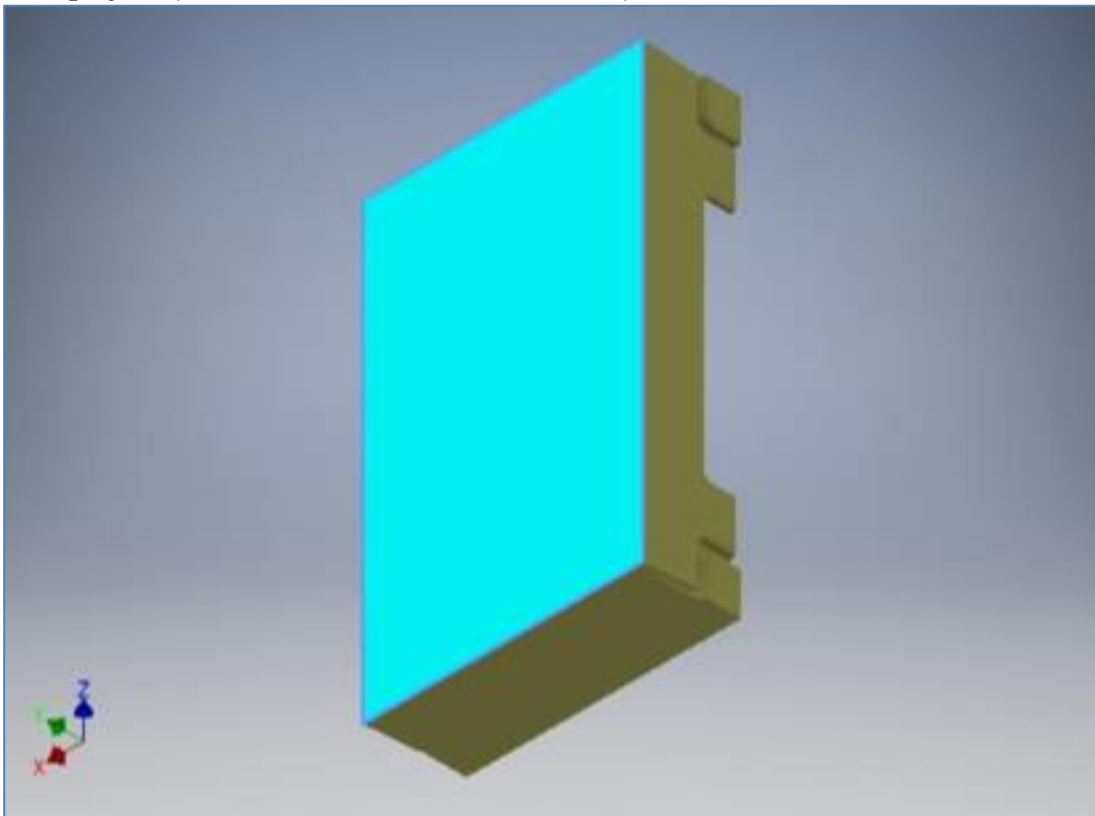


Figura 41. Restricción fija

4.3.4.3 Análisis

La malla aplicada para el análisis de elementos finitos es de un tamaño medio de 0,2 mm y un tamaño pequeño para zonas curvas de 0,1 mm.

- Tensión de Von Mises:

La teoría de Von Mises es una de las más conocidas para analizar el fallo de los materiales dúctiles. Expone que un material dúctil comienza a ceder cuando la tensión de VM es igual al límite de tensión. La fórmula teórica es la siguiente:

$$\sigma_{eq}^{vM}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

El resultado obtenido es el siguiente:

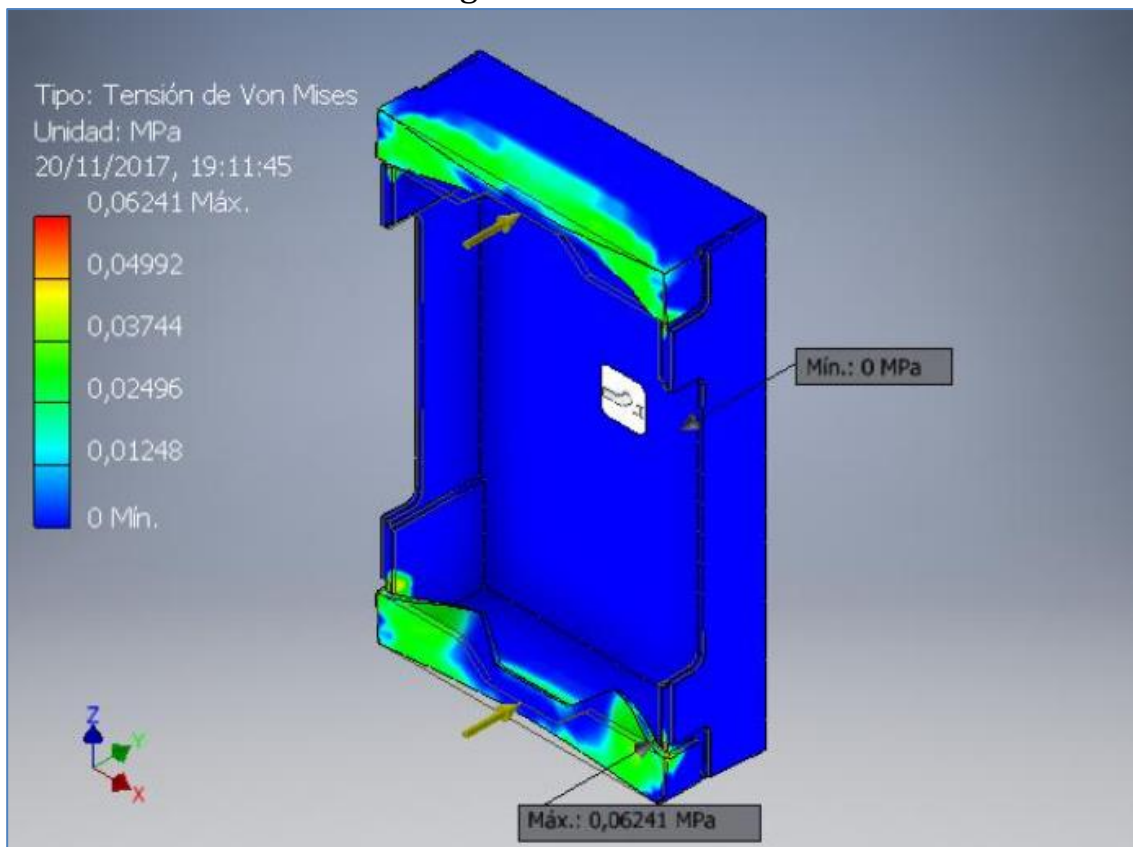


Figura 42. Tensión de Von Mises

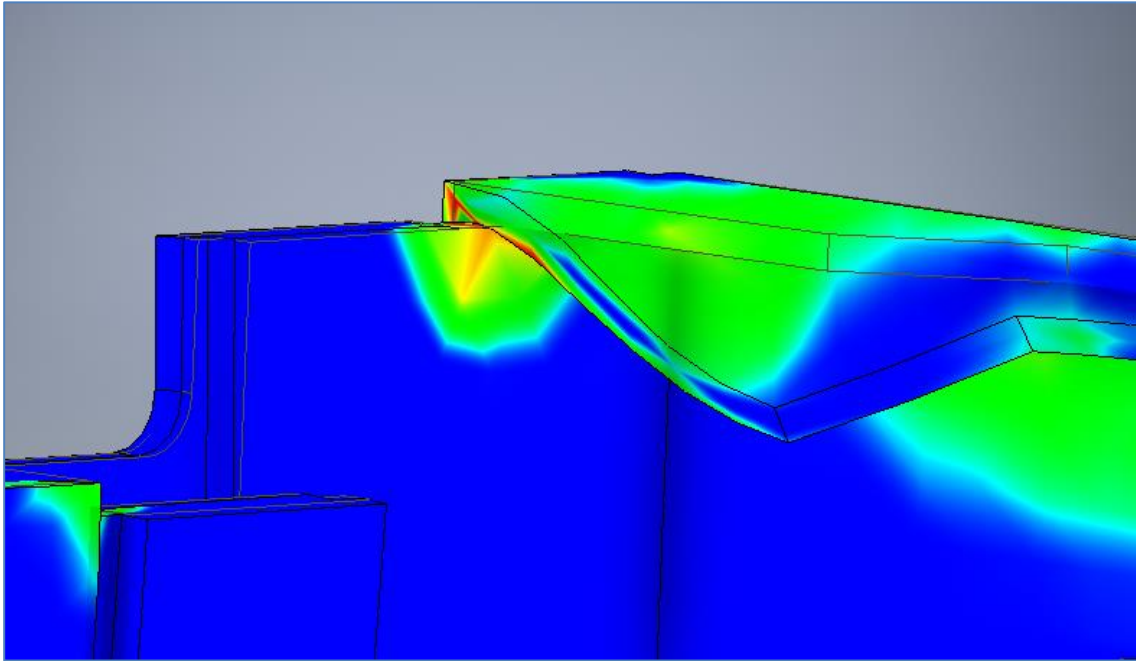


Figura 43. Tensión de Von Mises en detalle de la solapa

Los resultados indican que en las zonas de las solapas el material se va a deformar ya que el valor de VM supera al límite elástico del material. Esta tensión va asociada como se observa en la fórmula teórica a las tensiones principales mostradas a continuación:

Primera:

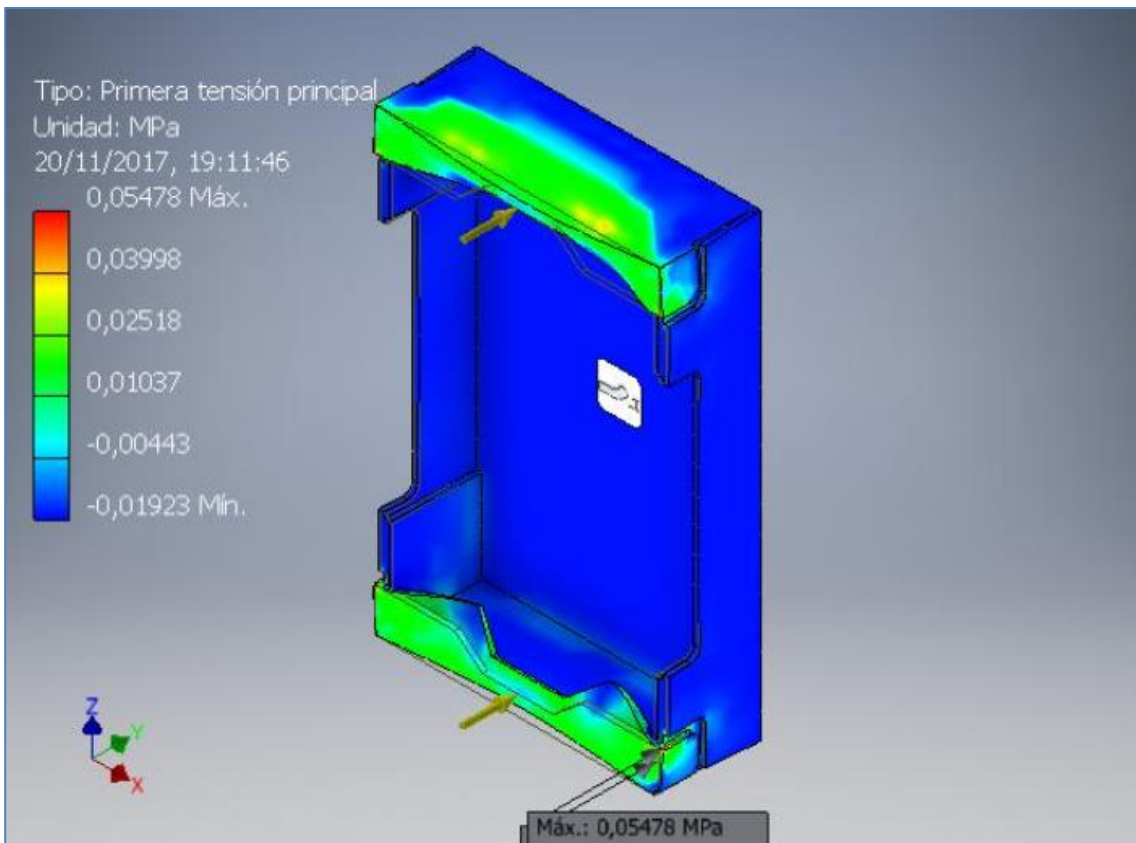


Figura 44. Primera tensión principal

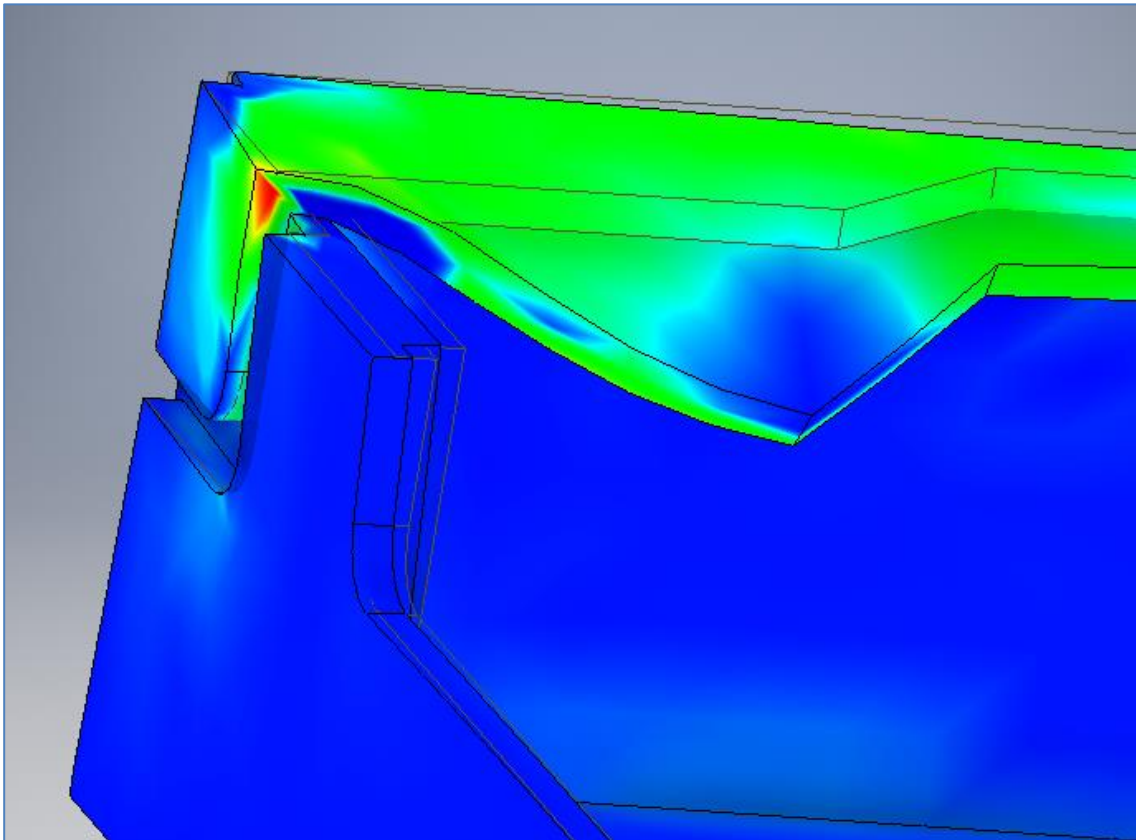


Figura 45. Primera tensión principal en detalle de solapa

Tercera:

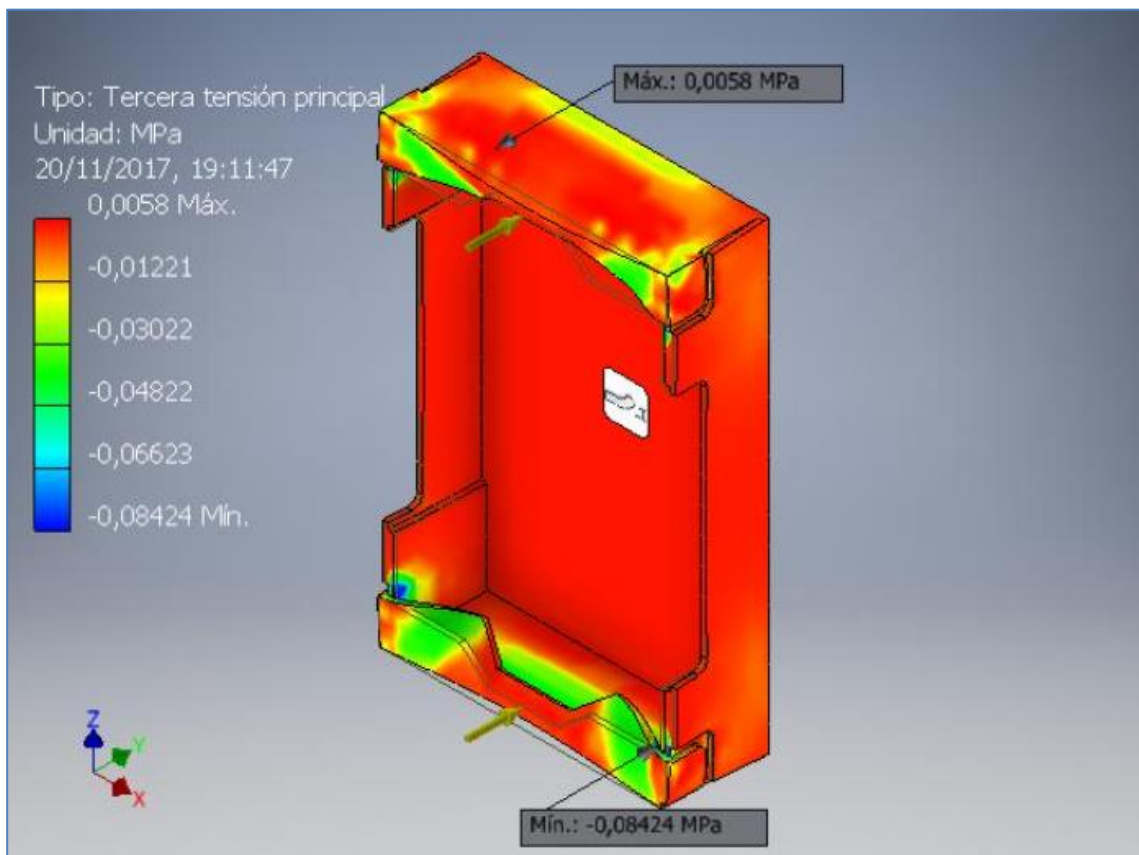


Figura 46. Tercera tensión principal

- Desplazamientos

Todas las propiedades, tensiones, deformaciones y esfuerzos que nos muestra el análisis de elementos finitos están relacionados con el desplazamiento que se produce en cada uno de los nodos de nuestro mallado.

Para que la caja cumpla con las funciones para las que ha sido diseñado, protección de la mercancía en el transporte, tiene que cumplir que las deformaciones se encuentren dentro de unos valores en los cuales no se produzcan desperfectos en las piezas de fruta, o estos sean los mínimos posibles.

Eje X:

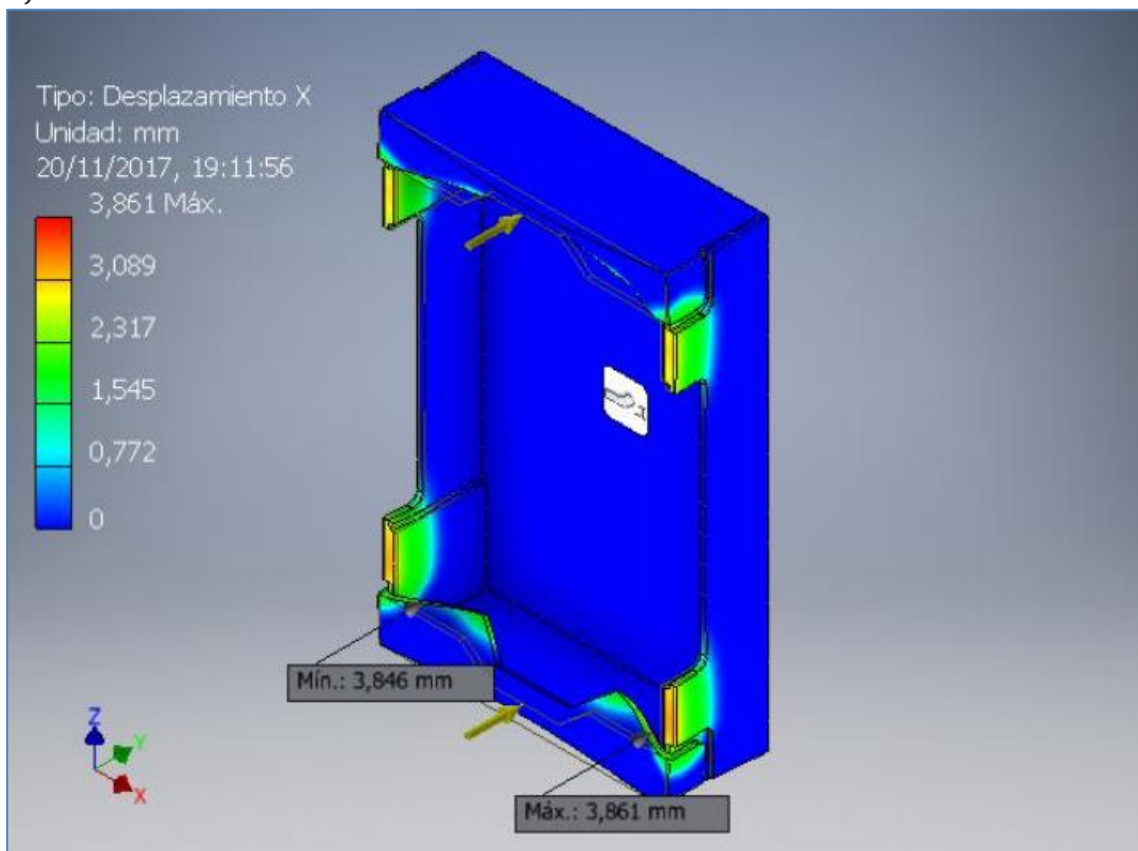


Figura 47. Desplazamientos eje X

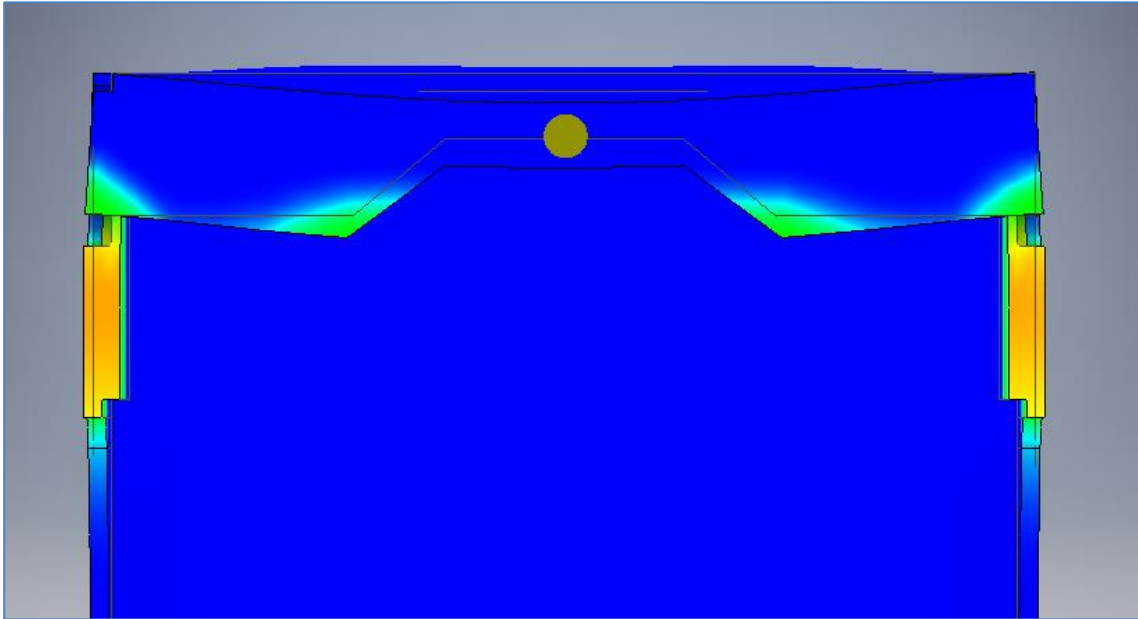


Figura 48. Desplazamiento eje X vista superior

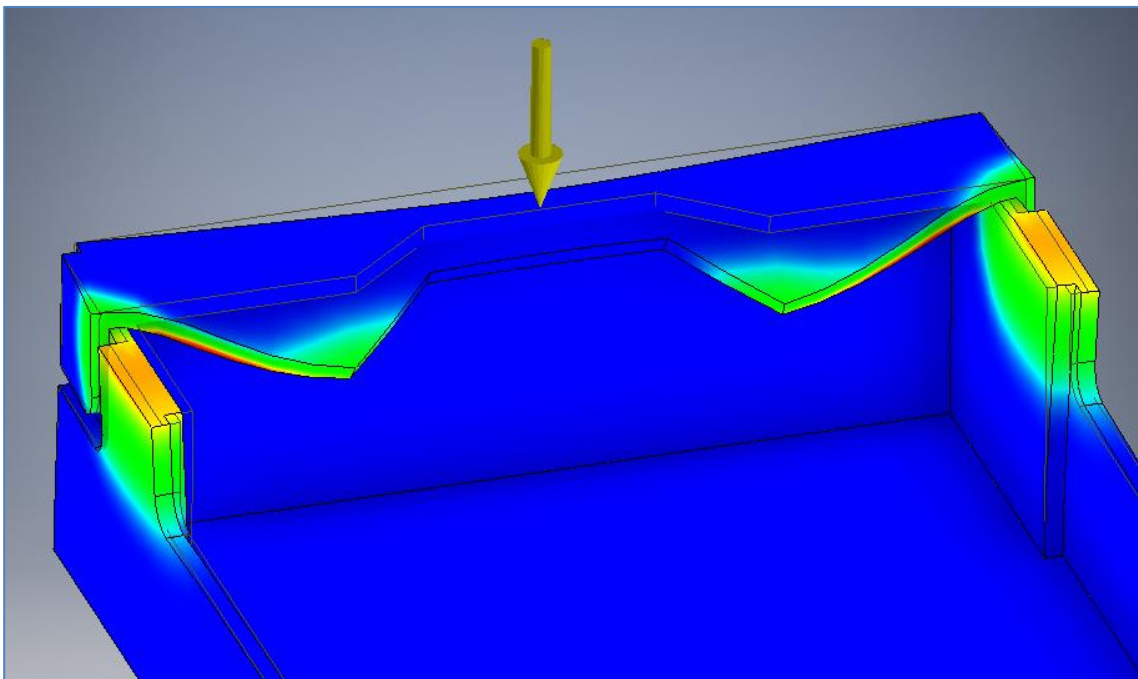


Figura 49. Desplazamiento eje X detalle solapa

Debido a la aplicación de la fuerza en dirección Y se genera una tensión en la parte exterior de la solapa en dirección X, hacia el centro de la caja produciendo un desplazamiento del refuerzo lateral de entre 2 y 3 mm.

Precisamente por eso se añade el refuerzo lateral en ambos extremos, esto hace que se evite un desplazamiento de estos puntos mucho mayor.

Eje Y:

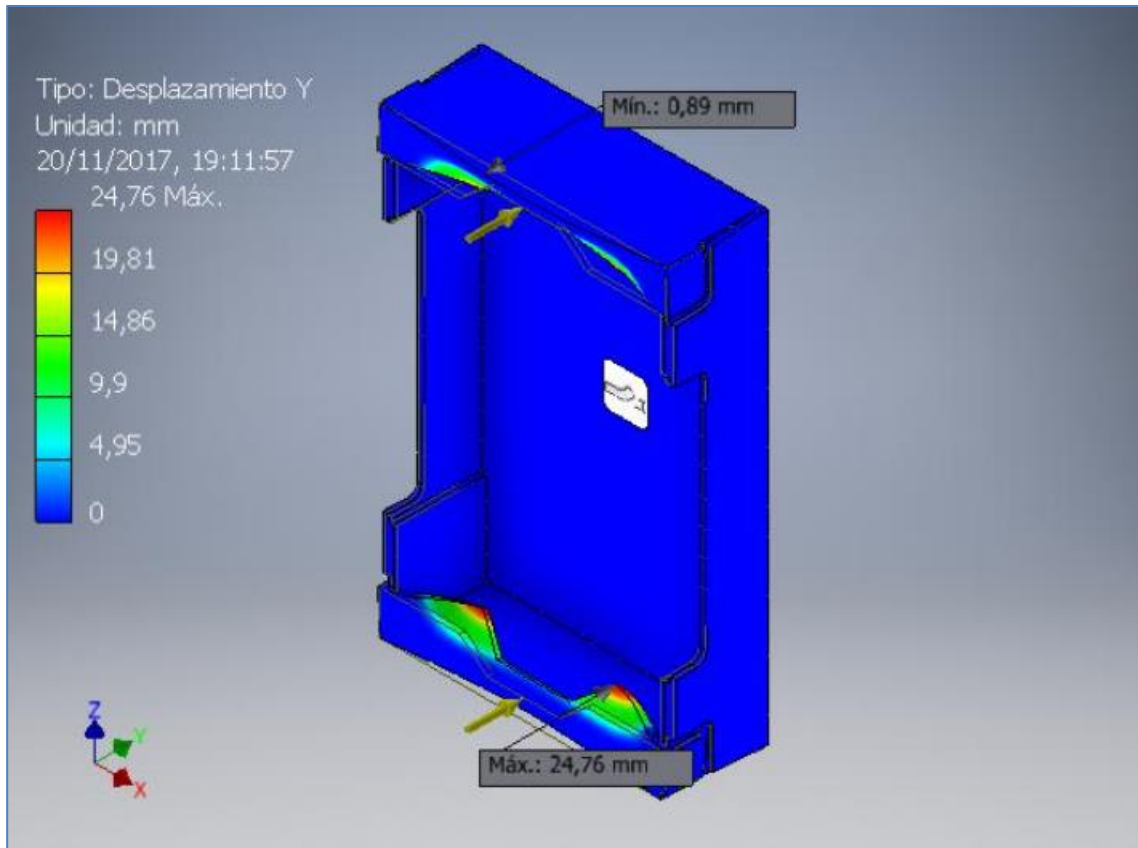


Figura 50. Desplazamientos en el eje Y

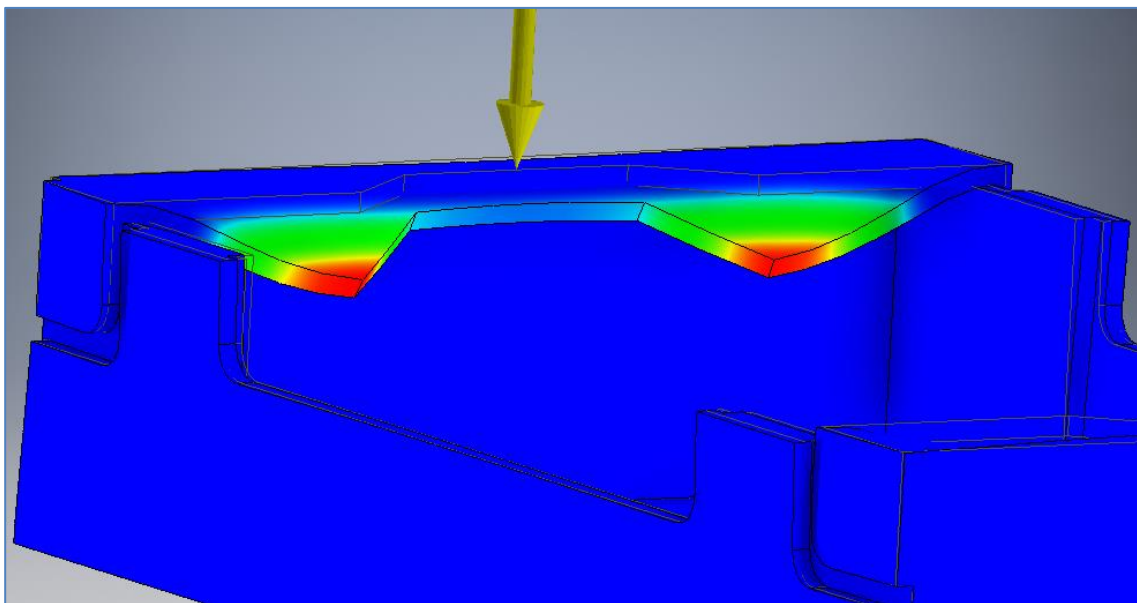


Figura 51. Desplazamiento eje Y detalle de solapa

El mayor desplazamiento en el eje Y, eje de aplicación de la fuerza, se produce en la zona de aplicación de la carga, con un valor máximo de 2,4 cm. La función de la solapa es precisamente absorber la deformación vertical y evitar así que las paredes laterales de la caja sean las que se deformen, produciendo un deterioro de la carga.

Eje Z:

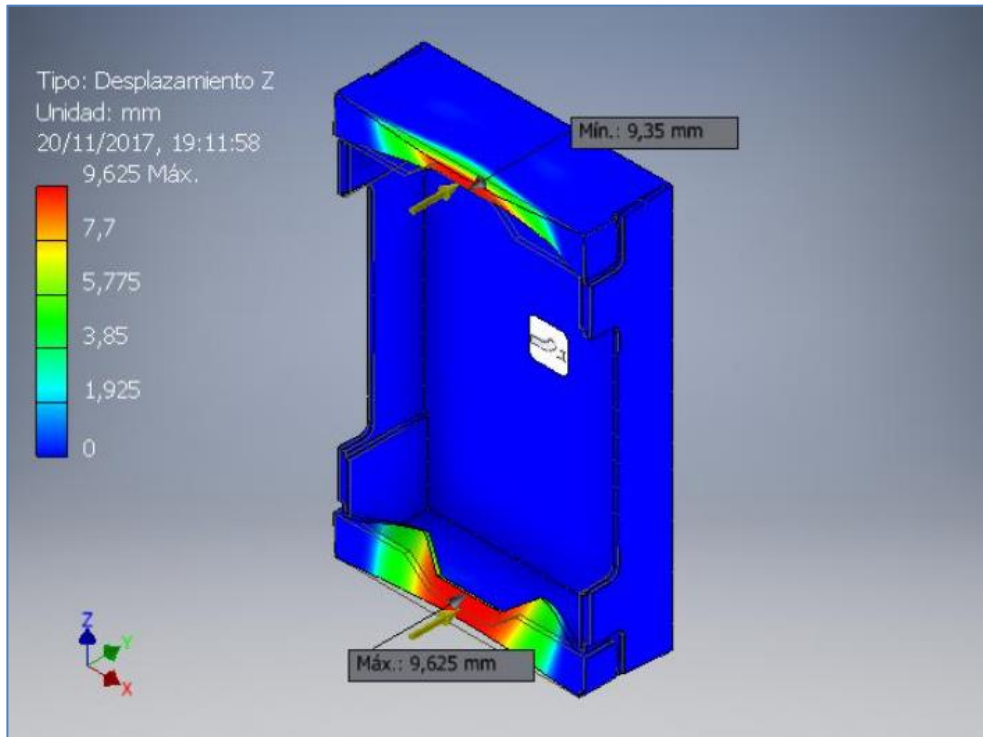


Figura 52. Desplazamiento eje Z

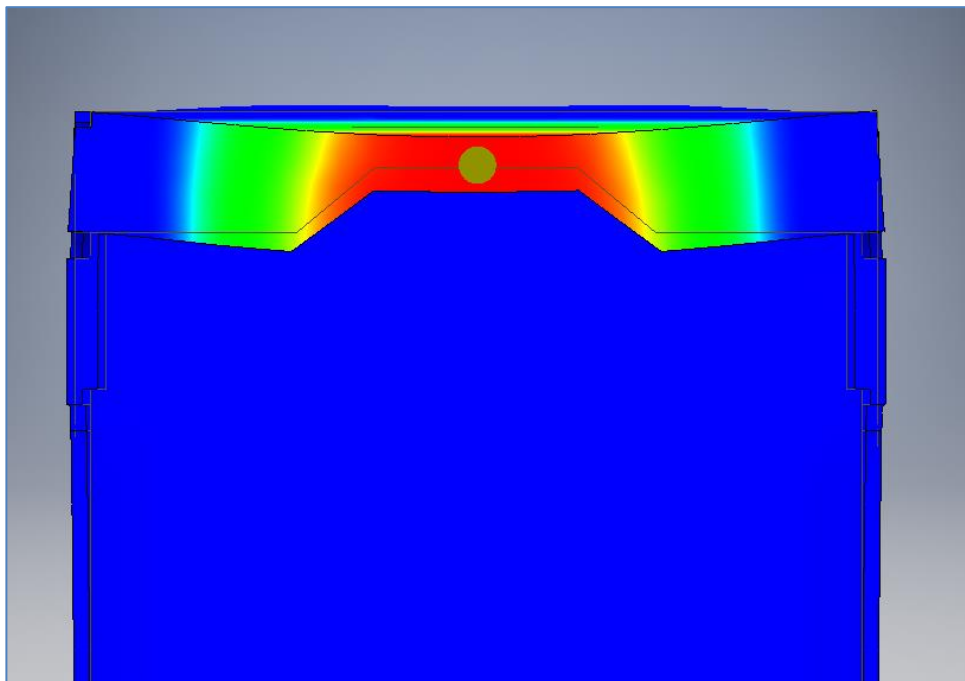


Figura 53. Desplazamiento eje Z vista superior

La fuerza aplicada sobre las solapas genera un desplazamiento de 9,625 mm en el eje Z de los puntos centrales de dicha solapa. Este desplazamiento no produce ningún tipo de deterioro en la mercancía ya que solo se genera en el refuerzo y no en el cuerpo de la caja.

4.3.4.4 Resumen resultados

A continuación se muestra el diseño final de la caja con las propiedades más características:



Dimensiones	495x295x91 mm
Desarrollo	KE160-SNA160-K135-SI155-K186
Canal y gramaje	Canal BC (6mm); 915 g/m ²
ECT y BCT	15 kN/m; 393,89 Kg

Tabla 8. Resumen de los resultados obtenidos

5. Conclusiones

El alto consumismo actual deriva en una gran movilización de mercancía diaria a través de todo tipo de medios de transporte. Gran parte de estos productos van embalados con cartón debido a la buena relación calidad-precio que ofrece. Por ello el trabajo se ha centrado en dicho material, encontrando una relación entre conocimientos generales y datos técnicos que ayudan a conocerlo en profundidad.

En primer lugar se ha analizado lo que engloba este sector, realizando un estudio del estado del arte de todo lo necesario para posteriormente llevar a cabo el objetivo principal del trabajo, el diseño de un embalaje de cartón propio.

Con la colaboración por parte de DS Smith Andorra, una conocida empresa del sector del *packaging* de cartón, se han estudiado las distintas posibilidades que ofrece el mercado actual antes de proceder con el proyecto.

En primer lugar se ha ideado el diseño. Esto incluye las medidas de la caja, las cuales han sido analizadas para obtener la solución más óptima en cuanto a comodidad de uso y rentabilidad, es decir, la mejor opción en cuanto a beneficio económico se refiere, ya que si la cantidad de mercancía que se puede transportar por viaje es más elevada, el vendedor obtendrá un beneficio mayor, véase en la Tabla 2. La opción elegida ha sido una caja de tipo bandeja, muy común para el transporte de fruta, con unas dimensiones de 495x295x91 mm que permiten transportar hasta 66 cajas de 10 kg, por palé de tipo europeo, lo que hace un total de 666 Kg de fruta por palé, alcanzando una ocupación del 92,13% del volumen transportable por palé.

Una vez determinado el modelo y dimensiones del embalaje se ha realizado un estudio de las propiedades mecánicas, corroborando que la caja está perfectamente capacitada para el uso que se le va a dar, aportando datos teóricos. Se ha optado, como la empresa recomendó, por un canal de tipo BC con un espesor de 6 mm, véase en la figura 36, que le aporta al embalaje las propiedades mecánicas necesarias para minimizar la cantidad de defectos que se producen en la mercancía durante el transporte o el almacenado. Las propiedades mecánicas más características de estos envases son la resistencia al pandeo, ECT, con un valor tabulado de 15 kN/m y el índice BCT, parámetro que mide la

resistencia al apilado, con un valor de 393,89 Kg ambos calculados en el apartado 4.3.3.

Para la verificación de todos los cálculos realizados se ha optado por un análisis de elementos finitos. Con los resultados que nos ofrece esta simulación se puede concluir que el objetivo del trabajo ha sido cumplido y perfectamente este diseño de caja podría empezar a fabricarse, salir al mercado y cumplir con las expectativas del consumidor.

6. Glosario de términos

- Pasta química: en la producción de la pasta química, las fibras se extraen de la madera añadiendo productos químicos a las astillas que disuelven la lignina, que es lo que une unas fibras con otras.
- Pasta mecánica: en la producción de la pasta mecánica, las fibras se extraen de la madera mediante un proceso mecánico a base de discos metálicos o cilindros de roca especial que desfibran y mueven las astillas hasta conseguir fibras individuales.
- Pasta de fibras recicladas: este tipo de pasta se produce mediante el reciclaje de material basado en recortes variados previamente seleccionados. Las fuentes de fibras recicladas son el rechazo generado por las propias fábricas de papel y cartón y la recogida selectiva.
- Kraftliner crudo: papel fabricado con pasta química virgen sin blanquear. Su uso se focaliza en la industria de las cajas por su gran resistencia.
- Kraftliner blanco: kraftliner con un recubrimiento de celulosa blanqueada.
- Kraftliner blanco estucado: kraftliner recubierto con una capa que contiene pigmentos de color.
- Testliner: papel fabricado con fibra recuperada con diferentes grados de encolado, por lo que corresponde a la categoría de papel reciclado. Su mayor uso es en la cara exterior del corrugado.
- Fluting semiquímico: papel fabricado con fibra virgen semiquímica, generalmente con un contenido de más del 80% de fibra virgen semiquímica.
- Impresión litográfica: procedimiento de impresión que consiste en trazar un dibujo, texto o fotografía en una plancha de cartón mediante la adherencia entre sustancias hidrófilas e hidrófobas.
- Sustancia hidrófila: sustancia que tiene afinidad por el agua, no se pueden mezclar con pinturas o grasas.

7. Bibliografía

- Park, J. (2011). *Finite Element Analysis of Corrugated Board under Bending Stress*. Japan: Kyushu University.
- Phan, D. & Nhu, N. (2015). *An analytic homogenization model in traction and bending for orthotropic composite plates with the type of double corrugated cardboard*. Vietnam: Thai University of Technology.
- Biancolini, M.E. & Brutti, C. (2003). *Numerical and experimental investigation of the strength of corrugated board packages*. Italy: Università di Roma 'Tor Vergata'
- Gómez, E. (2015). *Comportamiento mecánico, térmico y vibracional de cajas de dispositivos médicos para la estibación más alta*. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Campbell, A. (2010). *The use of A-Flute, B-Flute, AC-Flute and BC-Flute corrugated paperboard as a cushioning material*. USA: Clemson University.
- Gómez, C. (2015). *Diseño y técnicas de Packaging*. España: Universidad Técnica Superior de Arquitectura.
- Nordstrand, T. (2003). *Basic testing and strength design of corrugated board and containers*. Sweden: Lund University.
- Aboura Z.; Talbi N; Allaoui S; Benzeggagh M. (2004). *Elastic Behavior of corrugated cardboard: experiments and modeling*. France, Paris.
- Newell, S. (1953). *Manufacture and testing of paper and board*. Mc Graw-Hill. London.
- ASIMAG S.L. (2013). Manual de elaboración de cartón ondulado. España. Recuperado de: <http://afco.asimag.es>
- Cartonajes Alboraya. (2015). *Cajas para frutas y verduras, embalaje para productos agroalimentarios*. España. Recuperado de: <https://cartonajes-alboraya.blogspot.com.es>
- Asimag S.L. (2007, Jul 31). *Manual de elaboración del cartón ondulado*. Madrid. Recuperado de: <http://afco.atrenza.es>
- Market Research Business Development. (2015). *Hispack, informe sectorial*. Barcelona. Recuperado: <http://media.firabcn.es>
- Paul, S; Burgess, G & Xu, M. (1992). *Packaging Technology and Science*,5: 145-150. USA: Michigan State University.

FEFCO (2007). *International fibreboard case code, 5th Edition*. Belgium.
Recuperado de: <http://fefco.org>

FEFCO (2016). *Evolución de la industria española del cartón ondulado*. Madrid.
Recuperado de: <http://afco.es>

Álvarez, J. (2015,oct 29). Principales tipos de cartón. Recuperado de:
<http://blog.cajaeco.com>

8. Anexos

1. Plano del troquel

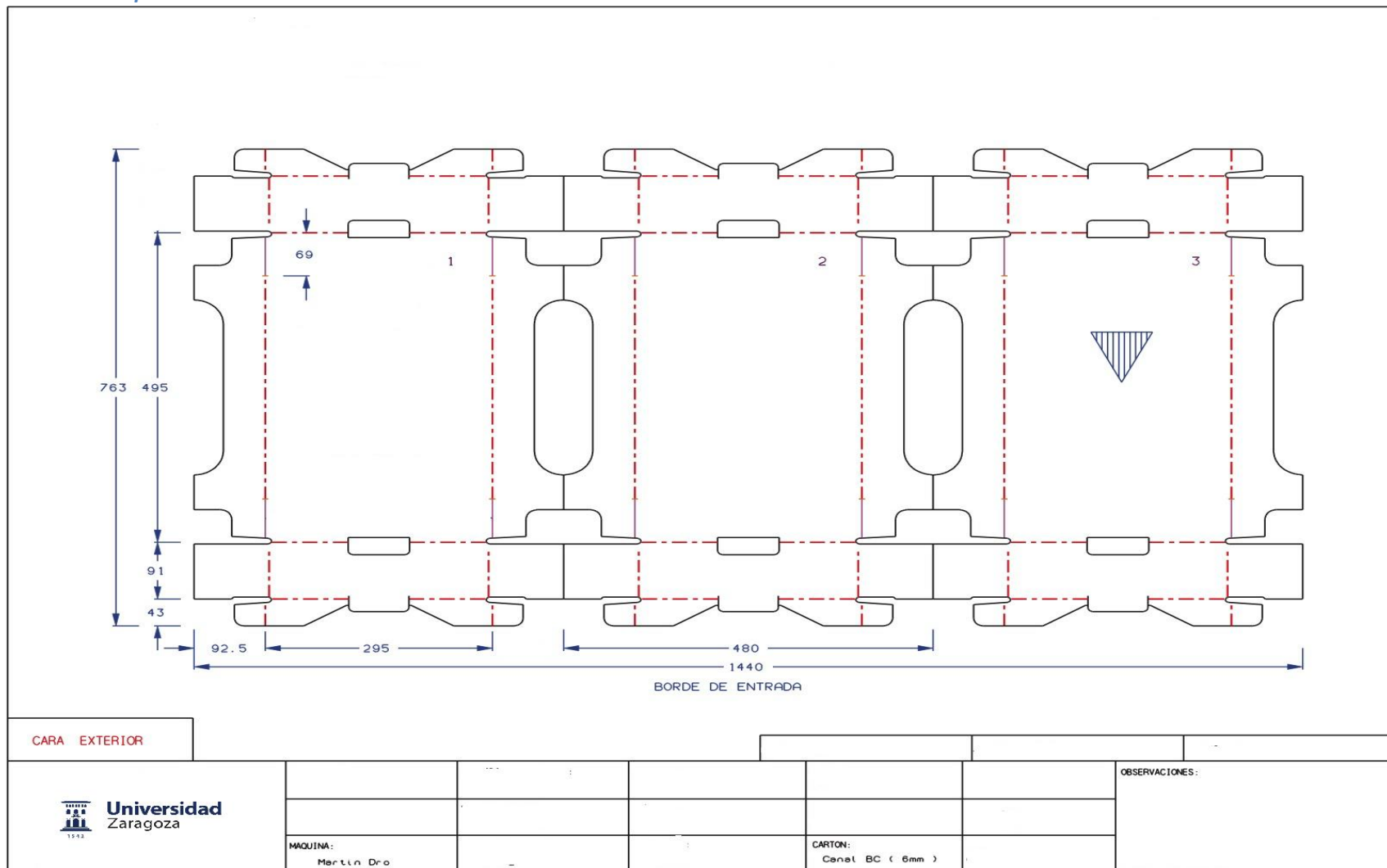


Figura 54. Plano del troquel

II. Plano caja

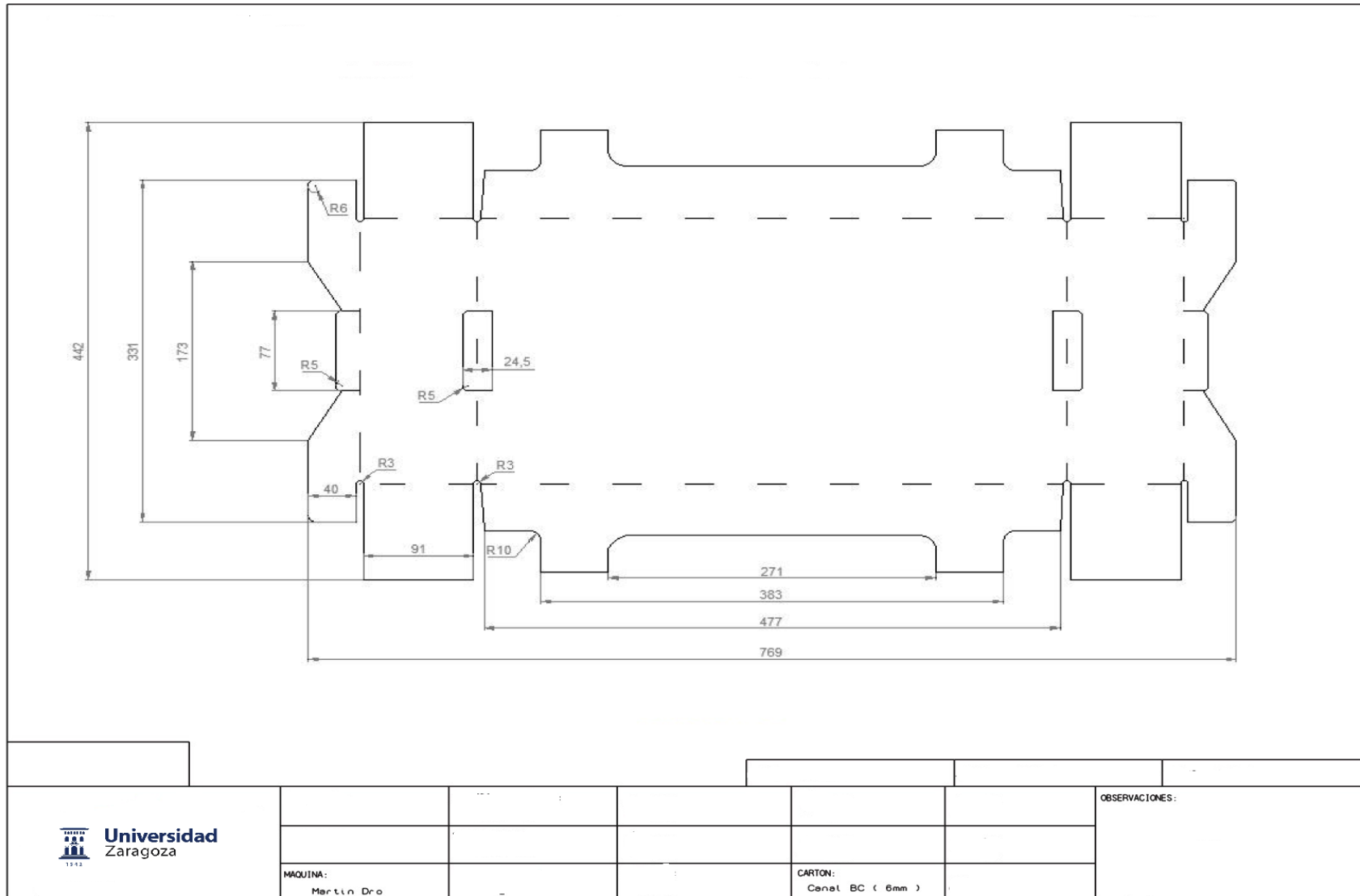


Figura 55. Plano de caja

III. Vistas caja

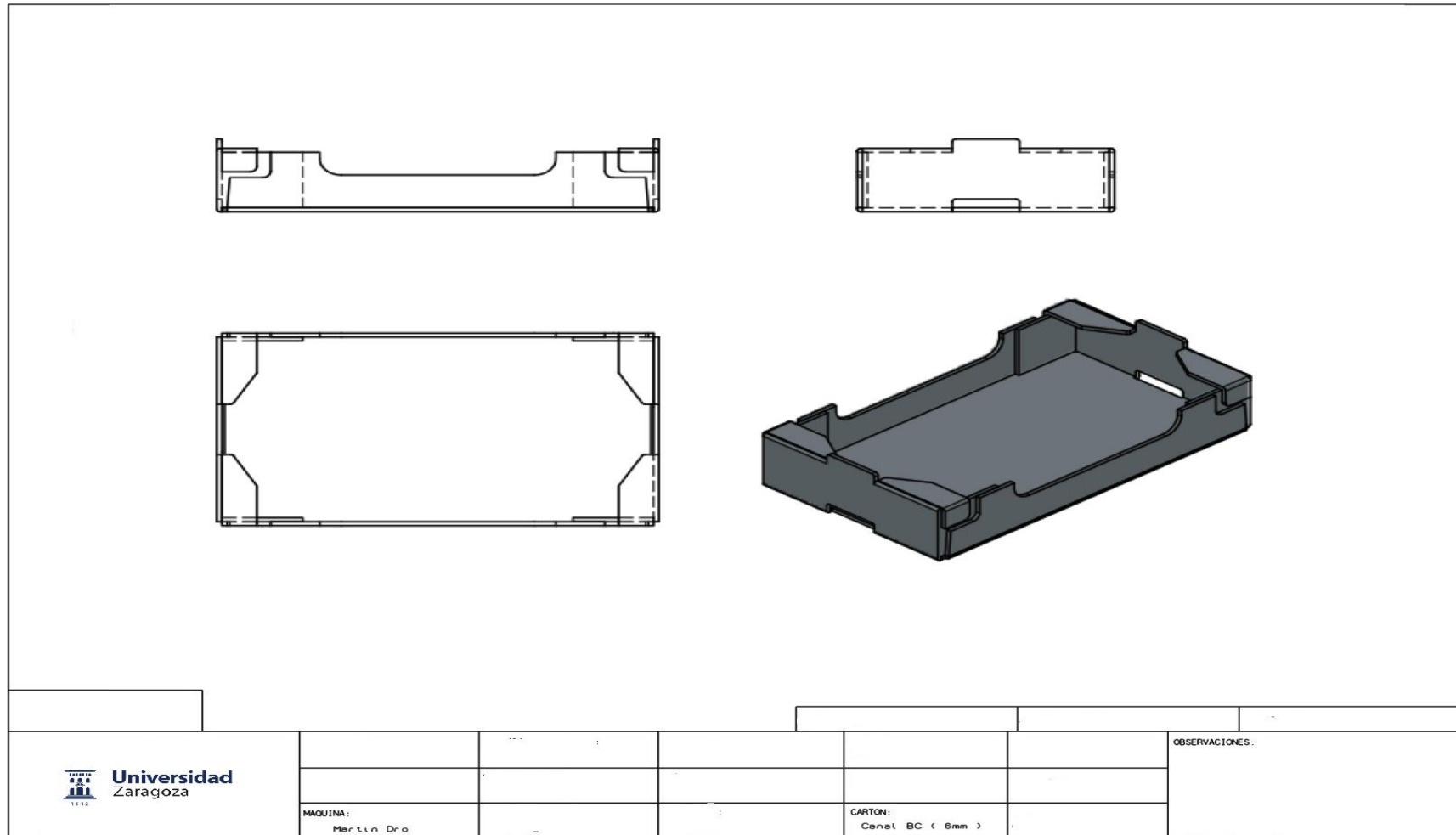


Figura 56. Vistas de la caja

IV. Calculo del Módulo de Young

Mediante un ensayo de tensión-deformación con datos experimentales sobre una caja de cartón corrugado se obtiene la siguiente gráfica:

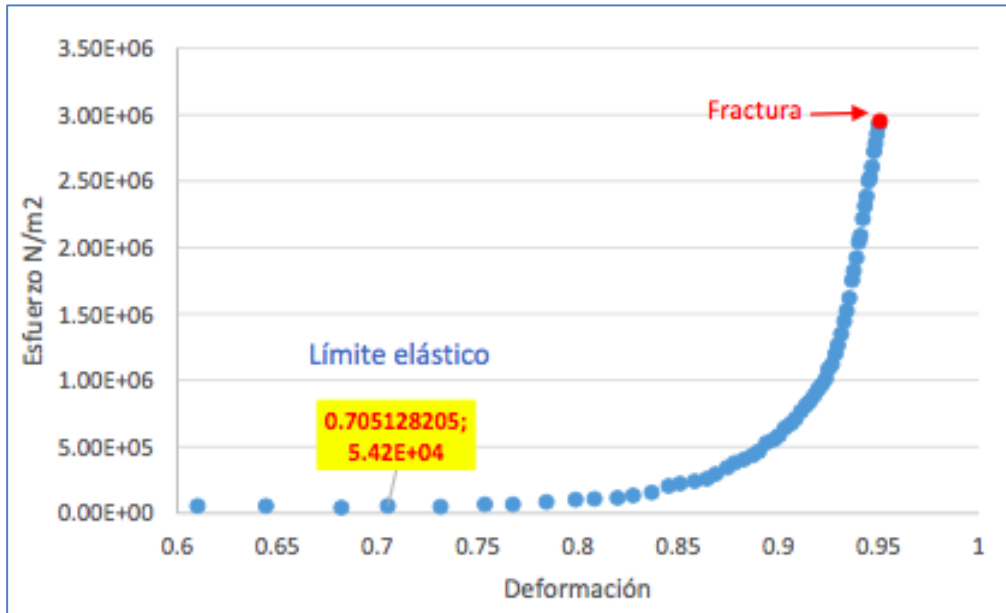


Figura 57. Ensayo tensión-deformación

Se observa que el cartón no se comporta idealmente ya que apenas se observa el límite de elasticidad. Marcado en rojo se analiza el punto de fractura del material encontrándose por debajo los puntos donde se comporta de manera elástica.

En este intervalo es donde se obtiene el Modulo de Young. Para el análisis, el módulo de Young se ha obtenido dividiendo el esfuerzo entre la deformación en el valor del límite de elasticidad.

Descripción y optimización del uso del cartón en envase y embalaje

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 9. Valores numéricos del ensayo tensión-deformación

V. Otros datos de interés de Inventor

Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	2065220 mm ³	
Masa	0,313913 kg	
Tensión de Von Mises	0,0000000118598 MPa	0,0624054 MPa
Primera tensión principal	-0,0192335 MPa	0,0547821 MPa
Tercera tensión principal	-0,0842386 MPa	0,0057971 MPa
Desplazamiento	0 mm	25,9324 mm
Coefficiente de seguridad	15 su	15 su
Tensión XX	-0,0814821 MPa	0,043899 MPa
Tensión XY	-0,0304729 MPa	0,0295066 MPa
Tensión XZ	-0,027388 MPa	0,0290494 MPa
Tensión YY	-0,0560215 MPa	0,0393386 MPa
Tensión YZ	-0,0275497 MPa	0,0216226 MPa
Tensión ZZ	-0,0365328 MPa	0,0211827 MPa
Desplazamiento X	-3,84552 mm	3,86132 mm
Desplazamiento Y	-0,892565 mm	24,7608 mm
Desplazamiento Z	-9,34954 mm	9,62535 mm
Deformación equivalente	0,00000000916688 su	0,0639127 su
Primera deformación principal	-0,00424229 su	0,0567574 su
Tercera deformación principal	-0,0776114 su	0,000437841 su
Deformación XX	-0,0744413 su	0,0416787 su
Deformación XY	-0,0350439 su	0,0339326 su
Deformación XZ	-0,0314962 su	0,0334068 su
Deformación YY	-0,0536527 su	0,0387216 su
Deformación YZ	-0,0316821 su	0,024866 su
Deformación ZZ	-0,0356083 su	0,0206082 su

Tabla 10. Resultados simulación Inventor

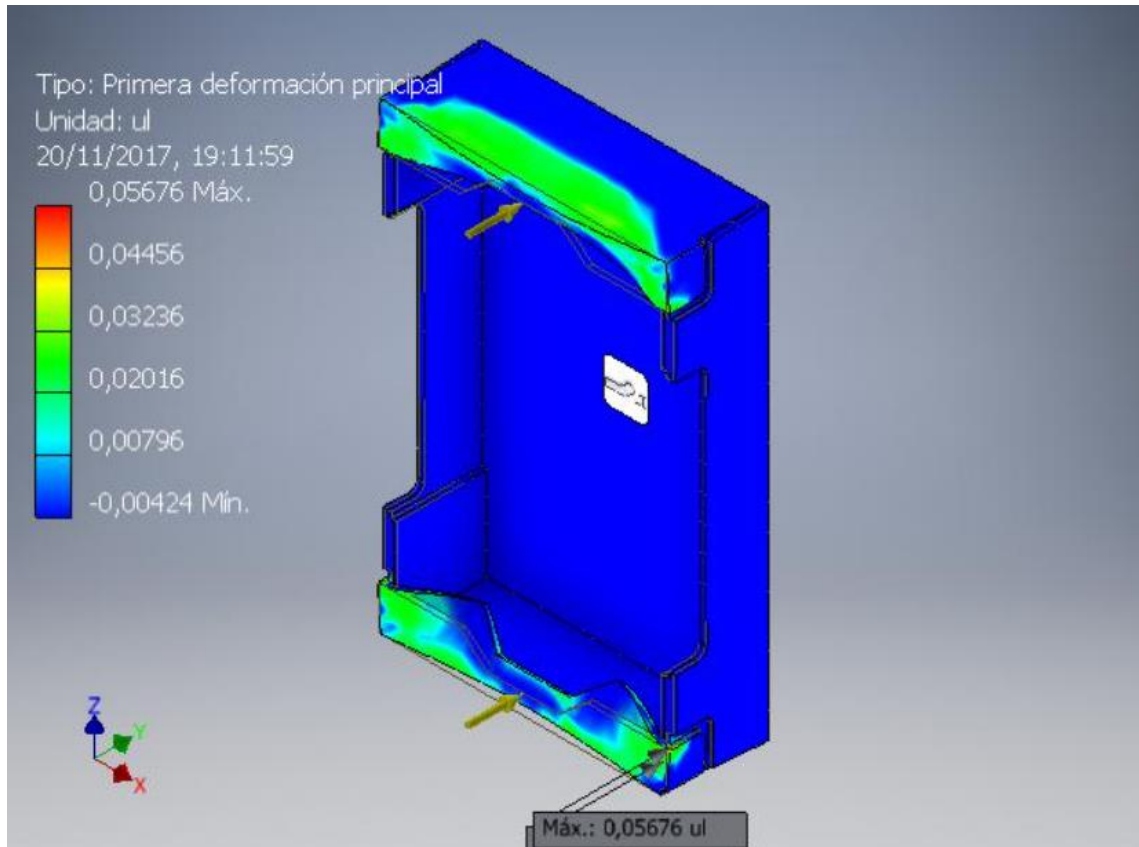


Figura 58. Primera deformación principal

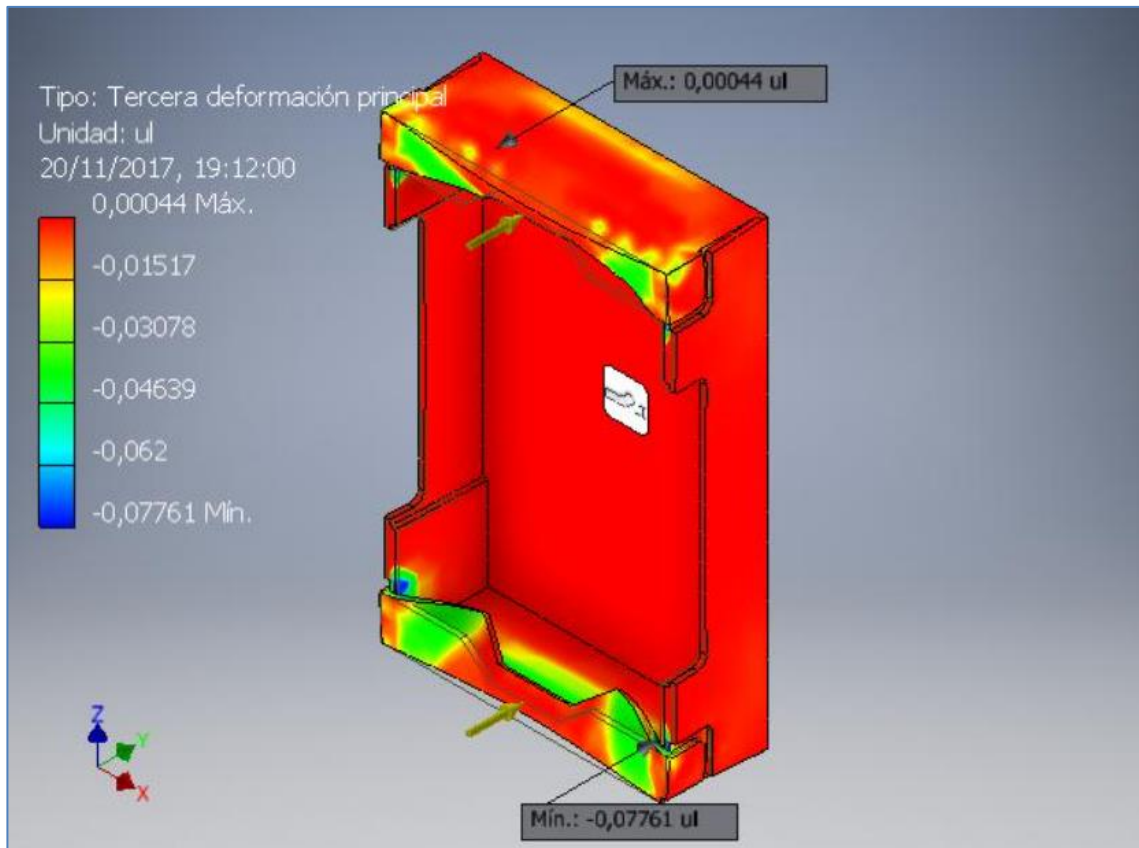


Figura 59. Tercera deformación principal

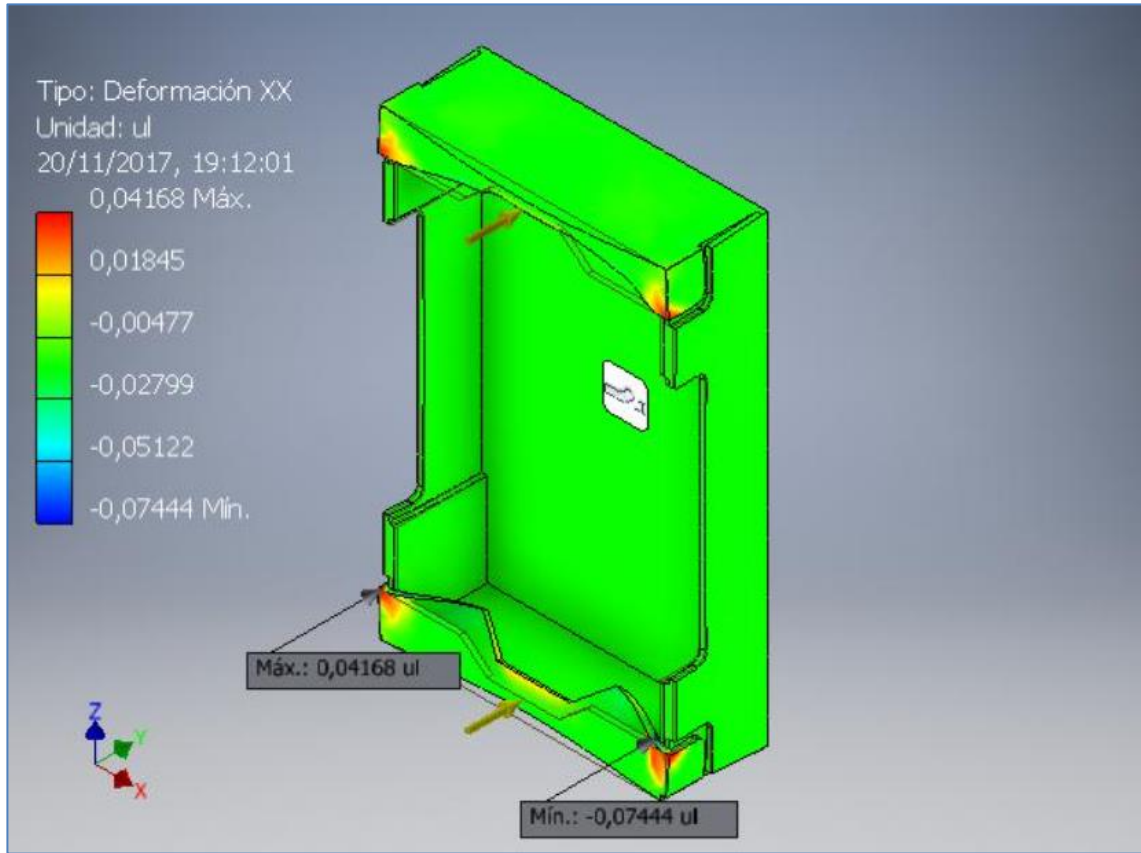


Figura 60. Deformación XX

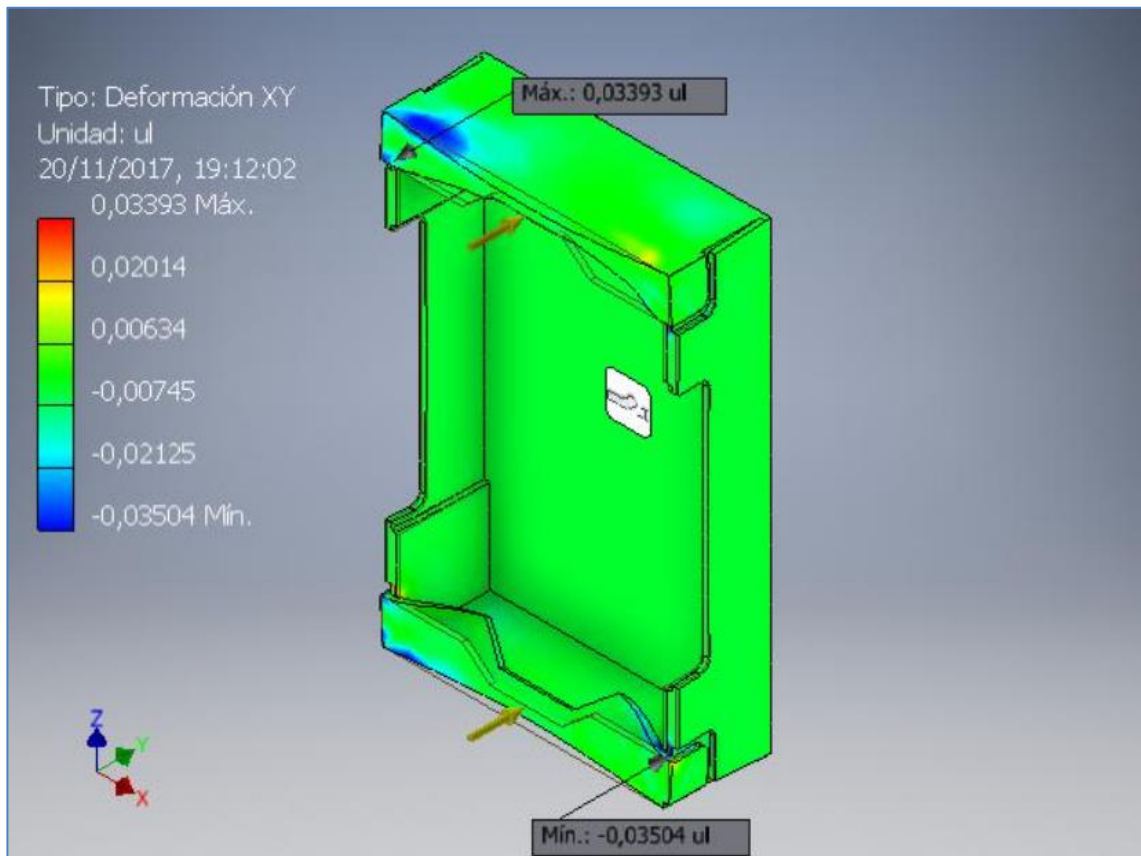


Figura 61. Deformación XY

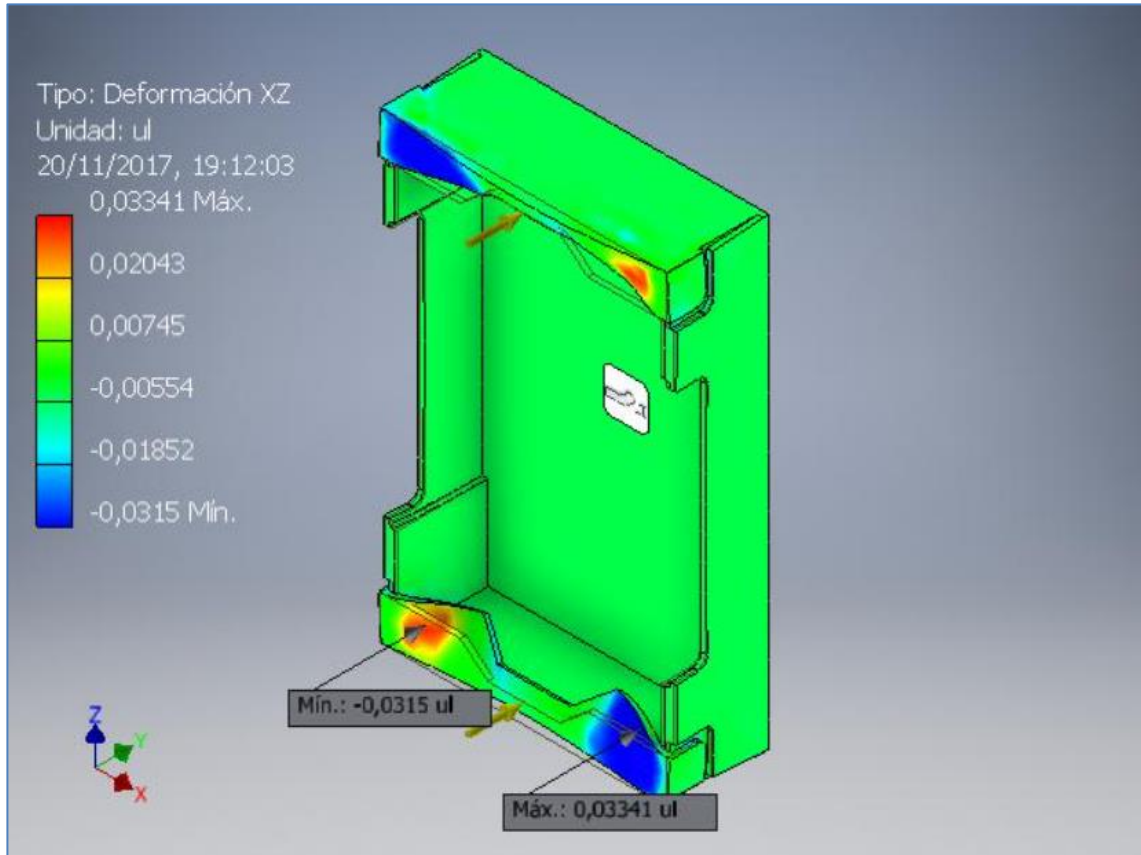


Figura 62. Deformación XZ

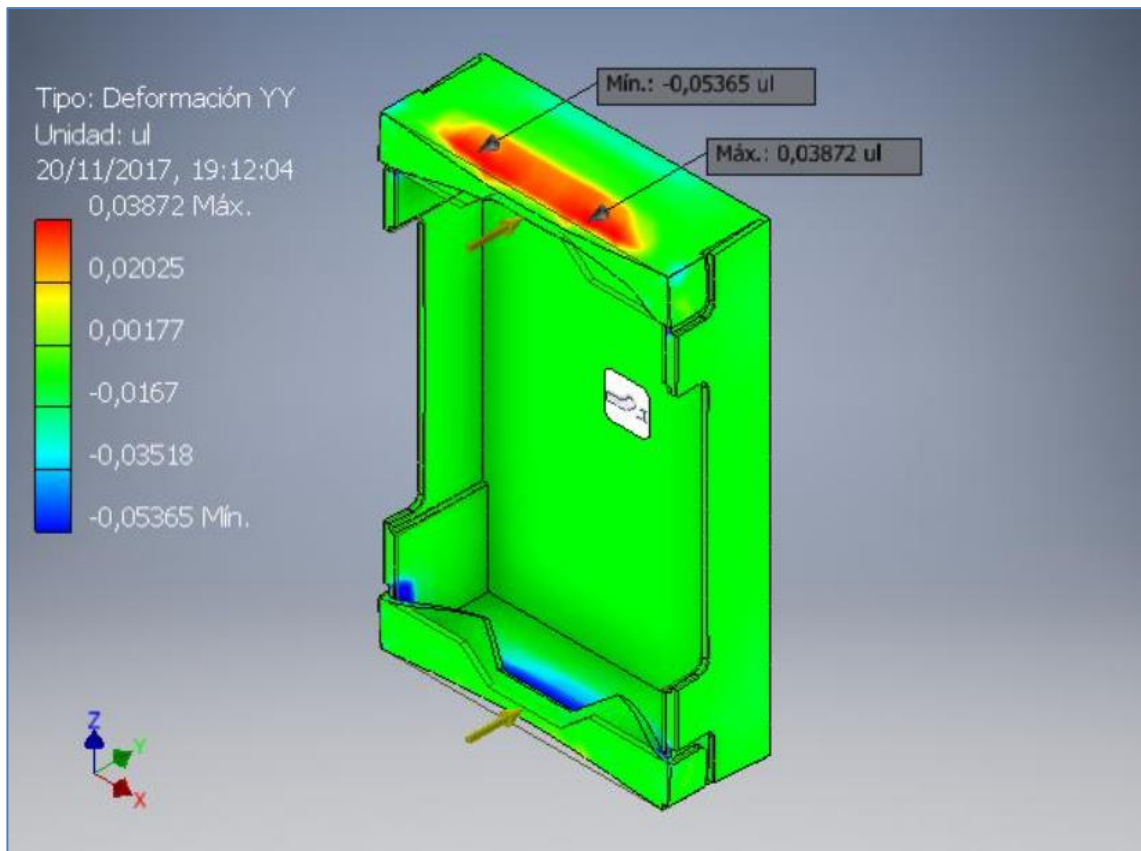


Figura 63. Deformación YY

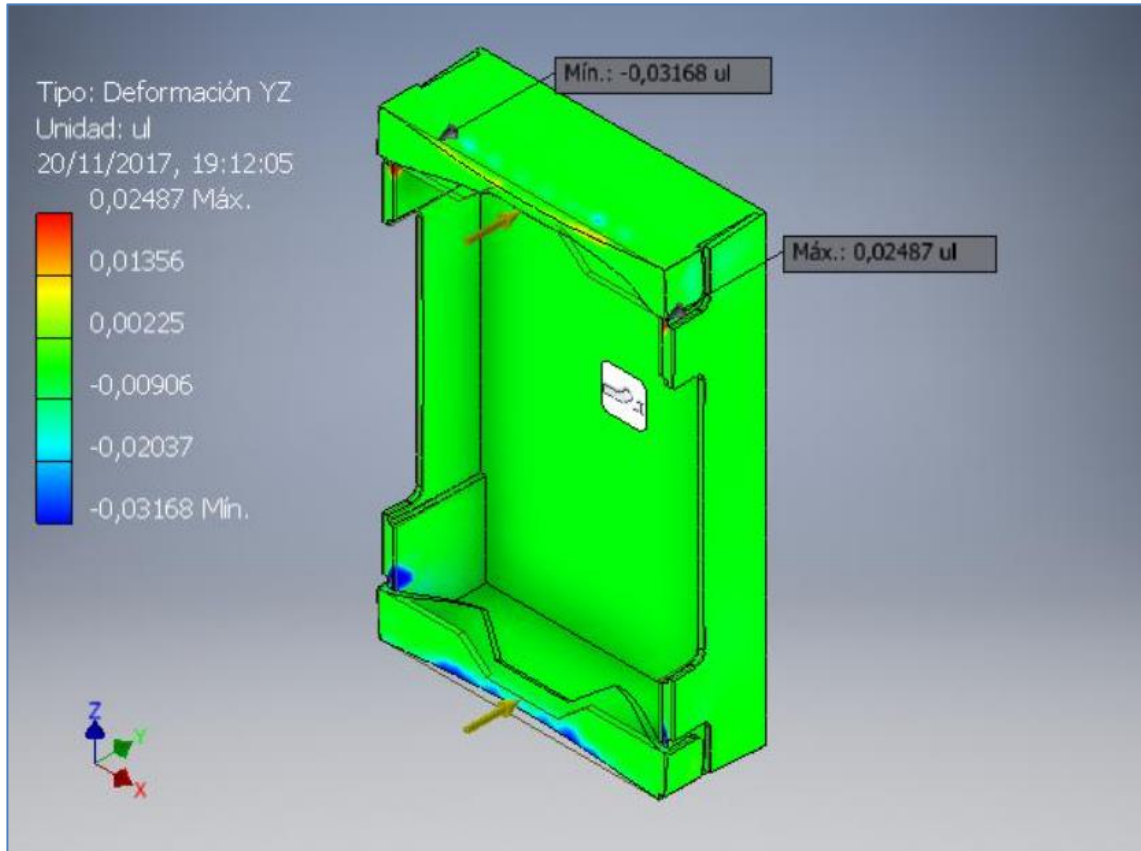


Figura 64. Deformación YZ

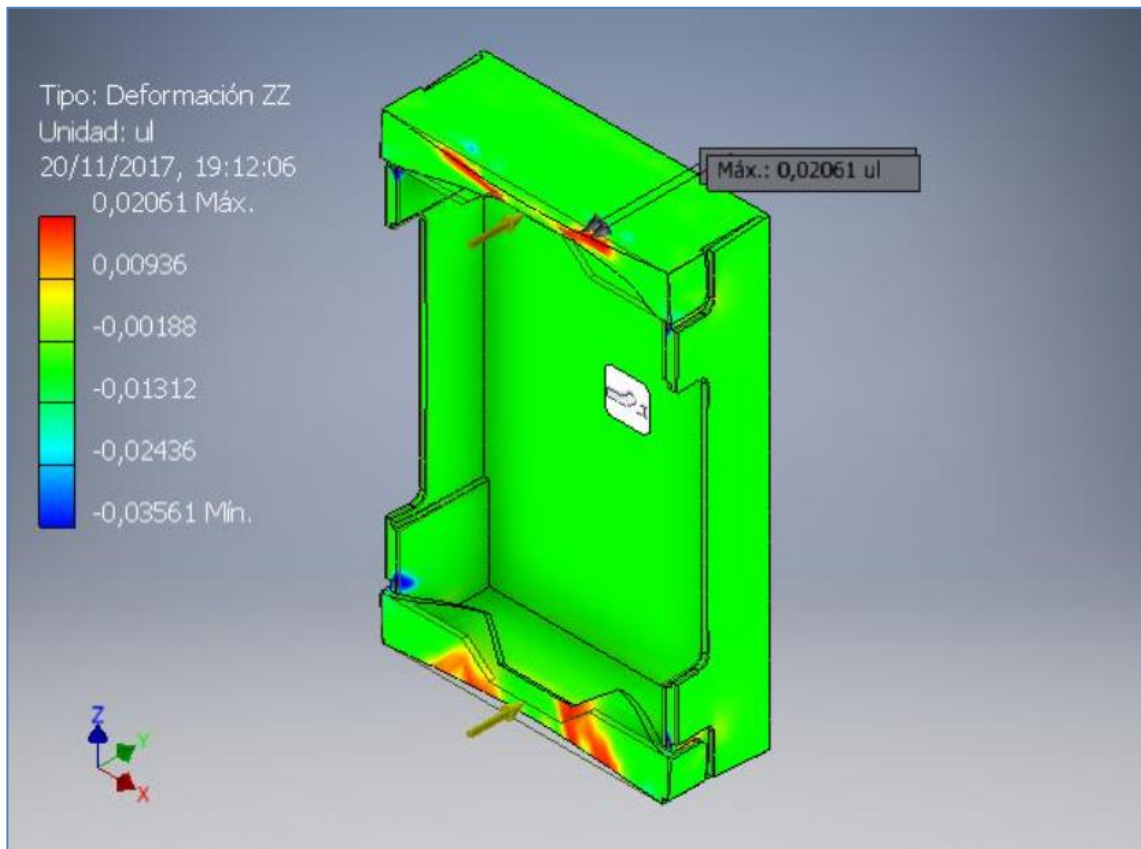


Figura 65. Deformación ZZ