

Análisis del comportamiento estructural de una caja de plástico reciclado para champiñones

Luis Alejandro Alcaraz Carachéo

Instituto Tecnológico de Celaya
alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

José Francisco Louvier Hernández

Instituto Tecnológico de Celaya
francisco.louvier@itcelaya.edu.mx

Jaime Navarrete Damián

Instituto Tecnológico de Celaya
jaime.navarrete@itcelaya.edu.mx

Melissa Karina Zapatero Gutiérrez

Instituto Tecnológico de Celaya
melissa_zapatero@hotmail.com

Eduardo Hortelano Cerrito

Instituto Tecnológico de Celaya
edwardhortelano@yahoo.com.mx

Resumen

Actualmente los polímeros son materiales altamente utilizados en la industria para la fabricación de un gran número de productos para el embalaje, y resulta difícil prescindir de la utilización de dichos materiales. Sin embargo, constituyen una parte importante dentro de los desechos que contaminan nuestro planeta todos los días, por esta razón, en este proyecto se propone el uso del polipropileno reciclado (rPP), un material dúctil que puede ser reutilizado en procesos de manufactura.

Se analizó estructuralmente un embalaje de polipropileno 100% reciclable el cual se usará para el transporte de productos perecederos como son los champiñones, mediante método de elemento finito (MEF), con el fin de sustituir el embalaje de cartón empleado en la actualidad. Se requiere que soporte un total de 15 cajas por estiba, para mejorar la logística del transporte del producto.

Se realizaron pruebas de tensión a probetas fabricadas bajo la norma ASTM D638-10 con la finalidad de obtener la curva esfuerzo-deformación del material (rPP) y a partir de los datos obtenidos con la gráfica fue posible dar de alta el material en el software de análisis de elemento finito Ansys, versión 14.5. Se presentan los resultados y conclusiones obtenidos al someter el modelo, dentro del programa, a las cargas críticas a que podrá estar expuesto en la realidad.

Palabra(s) Clave(s): Embalaje, perecederos, polipropileno, reciclable.

1. Introducción

El impacto que tienen los plásticos en la actualidad, es que es difícil prescindir de ellos, no sólo por su utilidad sino también por la importancia económica que tienen. Esto se refleja en los índices de crecimiento de esta industria que, desde principios del siglo pasado, supera casi todas las actividades industriales. Los plásticos se utilizan para embalajes, para envasar, conservar y distribuir alimentos, medicamentos, bebidas, agua, artículos de limpieza, de tocador, cosmetología y un gran número de otros productos, que pueden llegar a la población en forma segura, higiénica y práctica.

Debido a que se tiene la necesidad de seguir utilizando plásticos, pero por otro lado se producen un impacto al medio ambiente, el reciclaje es una alternativa para contribuir con la solución de este problema. El reciclaje se define como la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos.

Para los fines de este trabajo, se va a analizar un embalaje fabricado a base de polipropileno reciclado el cual se produce utilizando el proceso de inyección de plásticos. El objetivo es reemplazar las cajas de cartón usadas actualmente en el transporte de champiñones. Con esto se verá una mejora en la logística de este producto ya que se tendrá un embalaje resistente a la humedad que desprenden los champiñones; es decir, como resultado se tendrá un embalaje inocuo y capaz de soportar mayor estiba.

2. Desarrollo

2.1 Propiedades Mecánicas

La caracterización de los materiales atendiendo a sus propiedades mecánicas es de suma importancia en el diseño, ya que nos permite elegir el material correcto según la función y esfuerzos a los que estará sometido. Para que dichas propiedades se puedan comparar convenientemente es necesario que el tamaño de las probetas, así como la forma en que se aplique la carga, estén estandarizadas. Es así como surgen distintas organizaciones para establecer dicha uniformidad; este es el caso de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM), la Sociedad Americana de Normas (ASA) y el Departamento Nacional de Normas (NBS), por mencionar sólo algunos.

2.1.1 Ensayo de tensión

Una prueba de tensión proporciona información sobre el esfuerzo y la ductilidad de los materiales: esta información puede ser utilizada para comparar materiales, mejorar aleaciones, control de calidad en los materiales y diseñar bajo ciertas circunstancias (Ver Fig. 1). La prueba de tensión estática tiene como finalidad determinar la curva esfuerzo-deformación de un material en el que se identifiquen el límite de proporcionalidad (punto p_l de la Fig. 2), esfuerzo de fluencia (punto y de la Fig. 2), esfuerzo último (punto u de la Fig. 2) y el esfuerzo de ruptura nominal (punto f de la Fig.2). Sin olvidar que la pendiente de la curva en la zona elástica define el módulo de elasticidad del material [1].

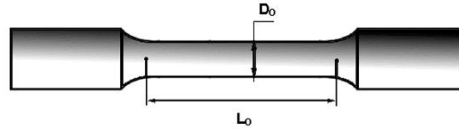


Fig. 1. Probeta típica para prueba de tensión.

La deflexión o extensión de la longitud calibrada, está dada por $l - l_0$ donde l es la longitud calibrada correspondiente a la carga P . La deformación unitaria normal se calcula a partir de:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1)$$

Dónde:

l es la longitud final entre puntos de la longitud calibrada.

l_0 es la longitud calibrada.

Y el esfuerzo ingenieril:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

Dónde:

P es la carga.

A_0 es el área de la sección transversal reducida de la probeta.

A la conclusión de la prueba, o durante ella, se grafican los resultados como un diagrama de esfuerzo-deformación unitaria.

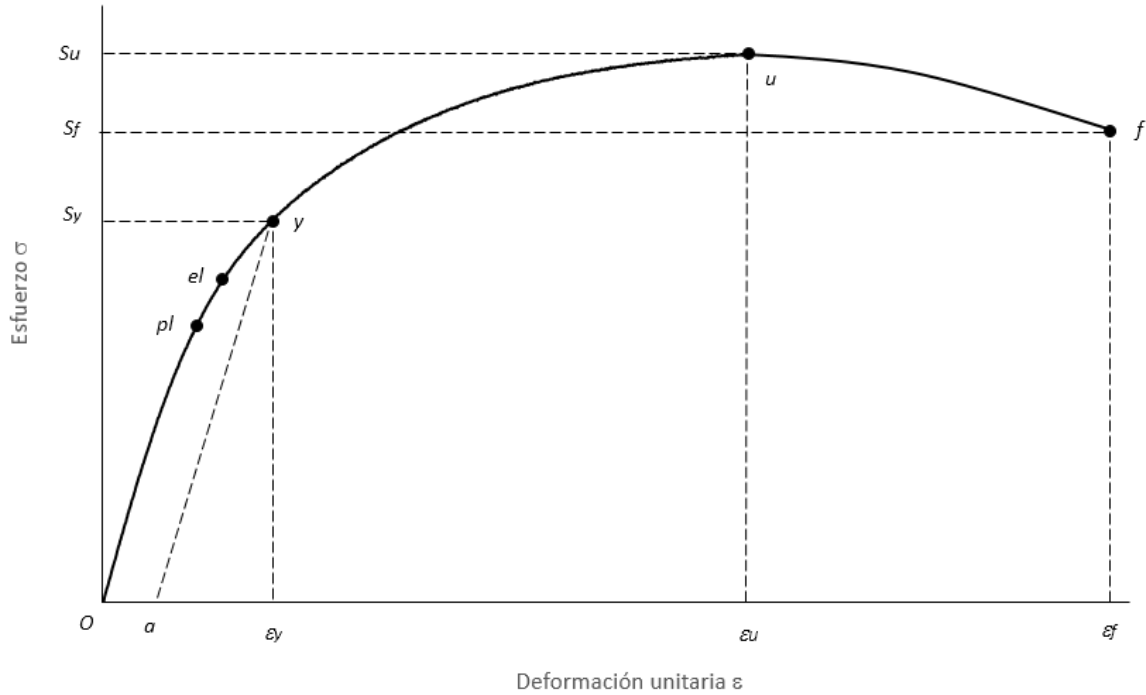
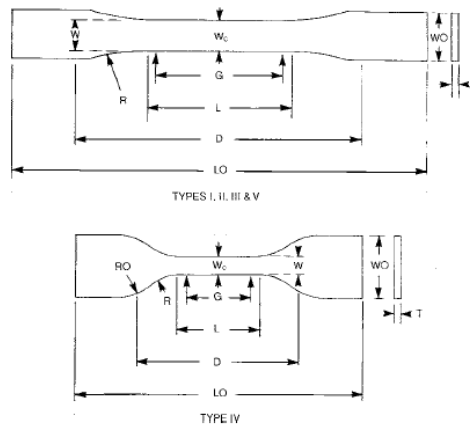


Fig. 2. Diagrama esfuerzo-deformación.

Tomando como referencia el procedimiento que indica la norma ASTM D638-10 [2] se hicieron ensayos de tensión al polipropileno reciclado para obtener sus propiedades mecánicas. Se usaron probetastipo I (Ver Fig. 3) que se obtuvieron mediante el proceso de inyección de plástico.



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^A

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}		
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}	
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C	
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)	
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^{H,I}	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)	
G —Gage length ^J	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C	
G —Gage length ^J	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)	
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C	
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Fig. 3. Dimensiones de las probetas para prueba de tensión para hojas, láminas y plásticos moldeados (figura reproducida de la Norma ASTM D638-10).

Posteriormente, las probetas fueron ensayadas en la máquina universal INSTRON 8801 usando un extensómetro *DynamicExtensometer 12.5mm GL +-5mmTravel* (Ver Figs. 4 y 5), con una velocidad de prueba de 5mm/min [2].



Fig. 4. Máquina Instron 8801 para pruebas de tensión.



Fig. 5. Extensómetro Instron.

2.2 Análisis del embalaje mediante MEF

El software que se usó para analizar el modelo del embalaje fue Ansys Workbench en su versión 14.5. Al obtener el modelo del embalaje (Fig. 6), y debido a que es un modelo un tanto complejo para analizar, se procede primeramente a hacer una simplificación de éste para ahorrar tiempo computacional. Se analizó sólo la mitad del embalaje ya que por sus características geométricas se presta para aplicar simetría.

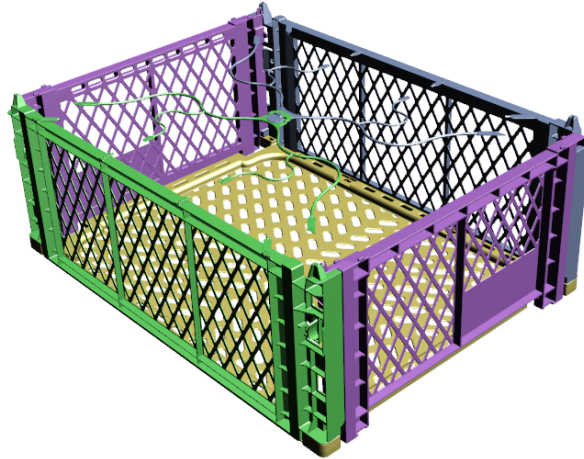


Fig. 6. Modelo de embalaje para champiñones.

Para aplicar las condiciones de frontera se debe tener en cuenta el peso del producto que va a estar contenido en este embalaje, hacer una estimación del peso de cada caja, así como el número de cajas que van a estar apiladas, como se observa en la Fig.7 la caja más crítica es la que está en la parte inferior ya que ésta recibe el peso de toda la estiba, debido a esto, se toma esta caja para el análisis.



Fig. 7. Forma de apilamiento de las cajas para champiñones.

El peso del producto es de 5 Kg, y se le agrega el 18.5% debido a pérdidas de humedad del producto.

Total de cajas requeridas por estiba: 15 cajas.

El peso de cada caja: 0.33 Kg.

Las fuerzas mostradas en la Fig. 8 es una representación de la distribución del peso de la columna de cajas. A la base se aplicó el tipo de soporte *FrictionlessSupport*.

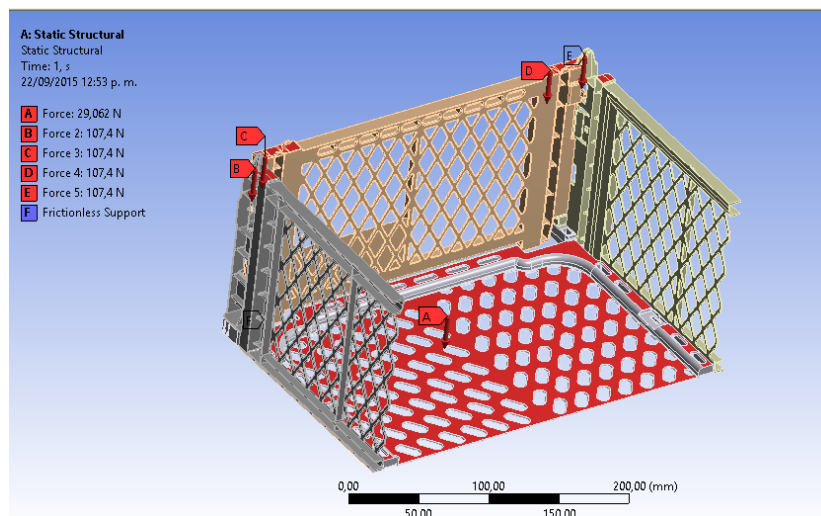


Fig. 8. Cargas puntuales representando el peso de la estiba.

3. Resultados

3.1 Caracterización del material

Se muestra en la Fig. 9 la gráfica esfuerzo-deformación, que resultó de una de las pruebas de tensión que se le hizo al polipropileno reciclado.

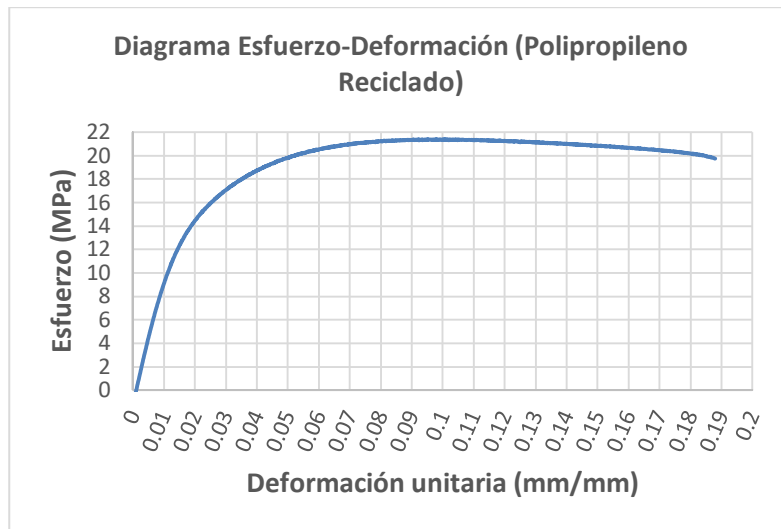


Fig. 9. Gráfica de la prueba de tensión de una de las probetas.

La Tabla 1 muestra el valor promedio de las propiedades obtenidas mediante la prueba de tensión.

Módulo de elasticidad (MPa)	1043.7
Esfuerzo de tensión último (MPa)	20.52
Esfuerzo de fluencia (MPa)	11.08
Elongación (%)	9.61

Tabla 1. Valores promedio de las propiedades para el polipropileno reciclado.

A modo de comparación de las propiedades aquí obtenidas con las registradas en otro artículo se puede observar que los valores son muy semejantes (Fig. 10a) y b).

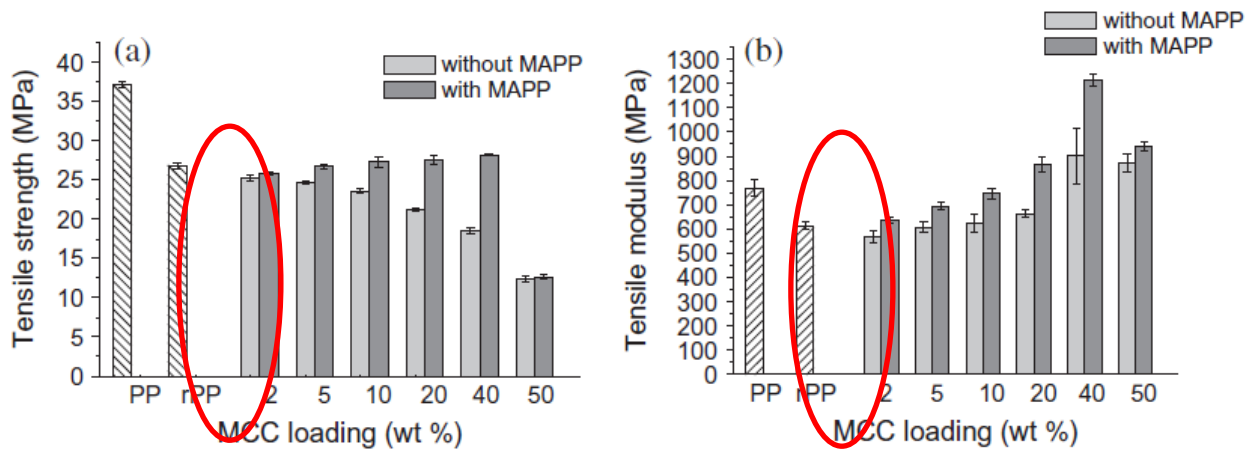


Fig. 10. a) Esfuerzo último de tensión, b) Módulo de elasticidad para el polipropileno reciclado encontrado en otro artículo [3].

3.2 Análisis del embalaje mediante MEF

Debido a la complejidad del modelo del embalaje, el método que se utilizó para mallar fue el de tetraedros (Fig. 11 y 12), con un tamaño de elemento de 0.5mm, se generaron 4, 019, 424 nodos y 2, 218, 354 elementos.



Fig. 11. Malla utilizada en el modelo.

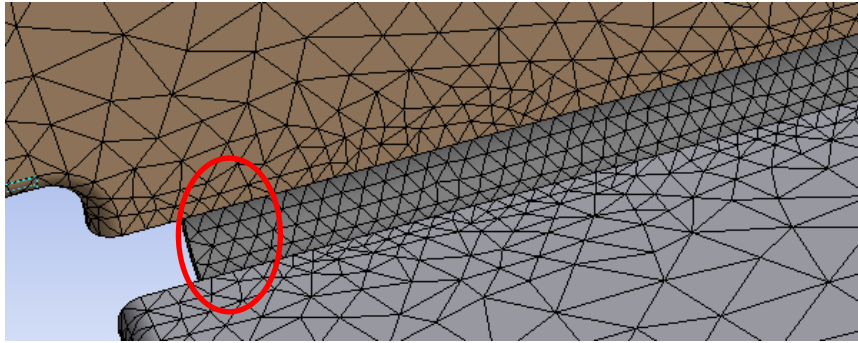


Fig. 12. Detalle de la malla utilizada en la zona donde se presenta el esfuerzo máximo.

Se utilizaron los datos siguientes para generar un nuevo material en AnsysWorkbench y utilizarlos para el análisis.

Densidad: 935 Kg/m³ [4].

Módulo de elasticidad: 1043.70 MPa.

Relación de Poisson: 0.35.

Esfuerzo de fluencia: 11.08 MPa.

Esfuerzo de tensión último: 20.52 MPa.

Desafortunadamente no existe una teoría universal de falla para un caso general de las propiedades del material y el estado de esfuerzo. En su lugar, a través de los años se han formulado y probado varias hipótesis, las cuales han conducido a las prácticas aceptadas, estas prácticas se caracterizarán como *teorías* tal como lo hacen la mayoría de los diseñadores. El comportamiento de los materiales se clasifica de manera típica como dúctil o frágil. Normalmente, los materiales se clasifican como dúctiles cuando su deformación unitaria es mayor a 0.05 y es frágil para valores menores a 0.05 [5].

Las teorías generalmente aceptadas son:

Materiales dúctiles (criterios de fluencia)

- Esfuerzo cortante máximo (ECM).
- Energía de distorsión o teoría de Von Mises (ED).
- Mohr-Coulomb para materiales dúctiles (CMD).

Materiales frágiles (criterios de fractura)

- Esfuerzo normal máximo (ENM).
- Mohr Coulomb para materiales frágiles (CMF).
- Mohr modificada (MM).

Por consecuente el material que se está usando (polipropileno reciclado) se puede considerar como un material dúctil debido a que su deformación unitaria tiene un valor promedio de 0.096.

Utilizando la teoría de Von Mises para el análisis se tiene que la zona de mayor esfuerzo que resultó del análisis estático son las que se muestran en la Fig.13 con un valor de esfuerzo de 40.613 MPa.

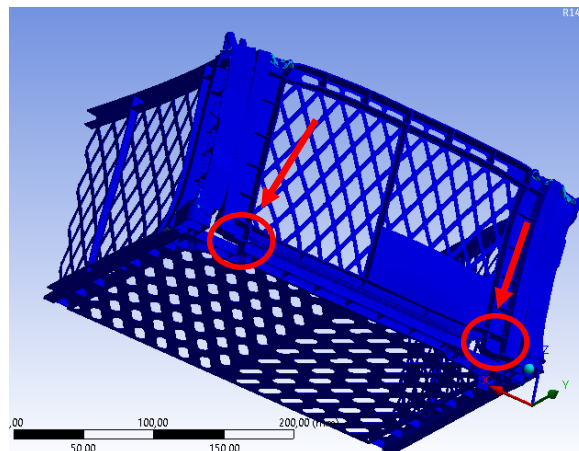


Fig. 13. Zonas de mayor esfuerzo.

En la Fig. 14 se muestra la región donde ocurre la deformación máxima en la cual se tiene un valor de 0.67 mm.

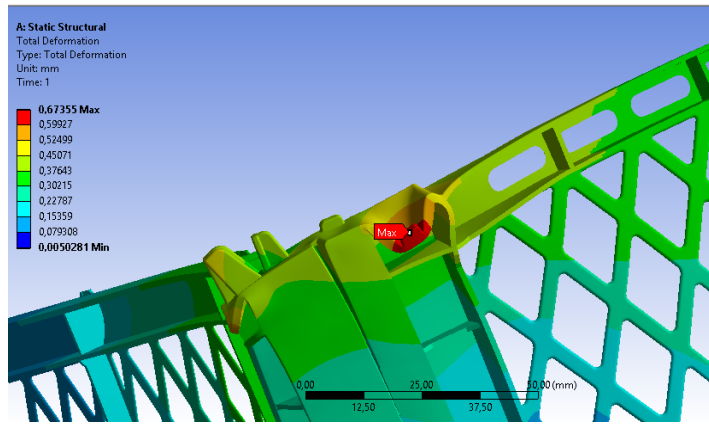


Fig. 14. Zona en la que se presenta la deformación máxima.



Fig. 15. Zona en la que se presenta el máximo esfuerzo de Von Mises

La parte presentada en la Fig. 15, es una lámina de polipropileno de 0.2mm de espesor que funciona como bisagra para este tipo de caja plegable.

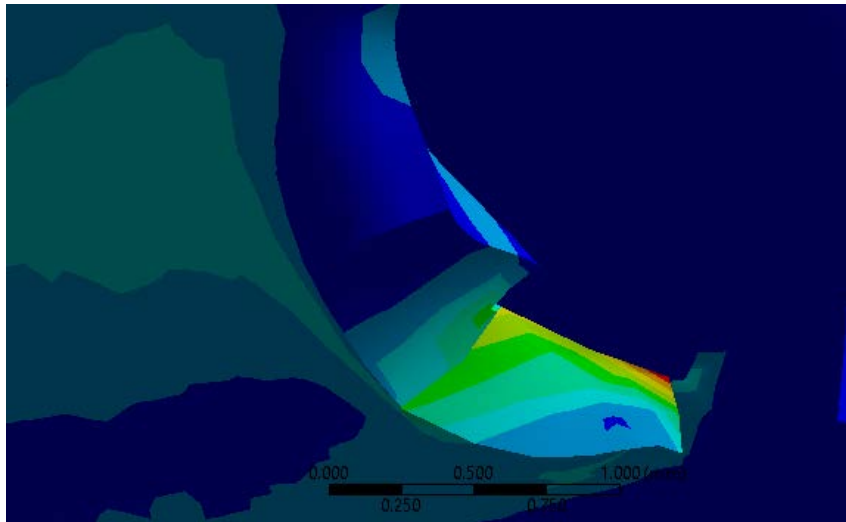


Fig. 16. Detalle de la zona en la que se presenta el máximo esfuerzo.

Para mejor apreciación de la zona mencionada en las Figs. 13 y 15, se muestra la Fig. 16 donde se hizo un acercamiento para observar aún más a detalle la zona. Gracias a esto, podemos desechar que se trate de una singularidad en el programa.

Toda solución de elemento finito involucra la solución de un sistema de ecuaciones con una matriz de coeficiente conocido (rigidez), un vector con grados de libertad desconocidos y un vector de fuerza conocido. Si el coeficiente de la matriz es singular, la solución falla. Las razones más comunes por las cuales el coeficiente de la matriz puede hacerse singular son las siguientes [6]:

1. Inestabilidad en la estructura provocada por la carencia de restricciones en el análisis estructural estático. Para este trabajo, como se menciona en la sección 2.2 se utilizó un soporte de tipo *FrictionlessSupport* en la base de la caja, el cual evita que al ser aplicadas las fuerzas, la geometría sufra desplazamiento y/o rotación.
2. Material con propiedades físicamente imposibles, por ejemplo, valores igual a cero o negativos del módulo de elasticidad, conductividad térmica, densidad, o calor específico. Esta característica es totalmente descartada como motivo de singularidad en los resultados, ya que como se menciona a lo largo de la sección 2, todos los datos utilizados para dar de alta el material en Ansys fueron obtenidos

realizando pruebas experimentales y comparando con los existentes en literatura, sin dejar de lado que todos son cantidades mayores a cero.

Se consultó también la ventana de ayuda de Ansys, la cual refiere que una de las formas de verificar que el resultado no sea singular, es la revisión del archivo APDL. Si uno de los modos está marcado con el texto “Infinity. Possiblemasssingularity. Ignored,” debe realizarse una revisión detallada del modelo. A continuación se revisó dicho archivo y no se encontró ninguna leyenda similar en el código. Además cabe mencionar que mientras Ansys calculó la solución ningún mensaje de alerta fue registrado, dado que el comando PIVCHECK es “ON” como valor predeterminado en el programa [7].

Por otra parte, la forma más sencilla de comprobar que existen singularidades es la inspección detallada de la solución. Si una sección de la geometría cambia de forma drástica en su color, es decir, sin pasar por la gama intermedia de tonos entre los valores [7]. Nuevamente, se puede referir a la Figura 16, donde se observa que la geometría atraviesa por cada uno de los tonos hasta llegar al valor máximo.

5. Conclusiones

Al realizar el análisis estructural del embalaje en Ansys se encontró que el esfuerzo de Von Mises es de 40.61 MPa. Se observa que excedió el esfuerzo de fluencia del polipropileno que es de 11.083 MPa. Por lo tanto, se concluye que no resistirá las 15 cajas que se tenía contemplado estibar, así que, usando parametrización en Ansys se encontró que sólo se pueden apilar 4 cajas verticalmente.

En trabajos futuros, se trabajará en un rediseño del embalaje que cumpla con los requerimientos para apilar 15 cajas por estiba sin que se presente falla estructural.

6. Referencias

- [1] R. G. Budynas, N. J. Keith, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Novena edición. 2012. Mc. Graw Hill. Nueva York. 30-31.
- [2] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International. E.U.A. 2010. (Norma ASTM D638-10).
- [3] N. IzzatiZulkifli, N. Samat, H. Anuar, N. Zainuddin, "Mechanical properties and failure modes of recycled polypropylene/ microcrystalline cellulose composites". *Material & Design*. No. 69. 06 de enero de 2015. 114-123.
- [4] Matweb. Overview of materials for Popypropylene, Molded, (Dsiponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=08fb0f47ef7e454fbf7092517b2264b2&ckck=1>). Consultado en septiembre de 2015.
- [5] R. G. Budynas, N. J. Keith, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Novena edición. 2012. Mc. Graw Hill. Nueva York. 210-229.
- [6] E. Madenci, I. Guven, *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. Cuartaedición. 2007. Springer. Nueva York. 158-159.
- [7] ANSYS 14.5 Help. ANSYS. EUA. 2014.