

DESARROLLO Y EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ESTRUCTURAS CELULARES FG

*DEVELOPMENT AND NUMERICAL EXPERIMENTATION OF
MECHANICAL BEHAVIOR OF CELLULAR STRUCTURES FG*

Miriam Lucero Quemada Villagómez

Tecnológico Nacional de México en Celaya
lucero.quemada@gmail.com

Ramón Rodríguez Castro

Tecnológico Nacional de México en Celaya
ramon.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Luis Alejandro Alcaraz Caracheo

Tecnológico Nacional de México en Celaya
alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

Resumen

Dada la importancia de mitigación de energía en varias áreas de la industria, las estructuras ligeras que atenúen cargas de impacto han sido el foco de interés en años recientes. Una de ellas es la estructura celular hexagonales o honeycomb. Estas, pueden fabricarse como estructuras celulares funcionalmente graduadas (FG) que representan un tipo novedoso de materiales, donde variaciones en tamaño de celda, forma, espesor de pared, o de material produce una variación funcional en la densidad relativa de la estructura.

Con la finalidad de diseñar estructuras ligeras que atenúen cargas de impacto, en este trabajo se realizará un estudio para explorar la posibilidad de fabricar un material celular funcionalmente graduado (FG), el cual se generará al introducir un gradiente de composición de dos materiales diferentes y se analizará numéricamente en términos de su respuesta mecánica con el fin de determinar la potencialidad de su uso como atenuador de cargas de impacto.

Palabra(s) Clave: Comportamiento mecánico, estructuras, funcionalmente graduado, material celular.

Abstract

Given the importance of energy mitigation in several areas of industry, lightweight structures that mitigate impact loads have been the focus of interest in recent years. One of them is the hexagonal or honeycomb cellular structure. These can be manufactured as functionally graded cell structures (FG) that represent a novel type of material, where variations in cell size, shape, wall thickness, or material produces a functional variation in the relative density of the structure.

With the purpose of designing light structures that attenuate impact loads, in this work a study will be carried out to explore the possibility of manufacturing a functionally graduated cellular material (FG), which will be generated by introducing a gradient of composition of two different materials and it will be analyzed numerically in terms of its mechanical response in order to determine the potentiality of its use as an impact load attenuator.

Keywords: *Cellular material, functionally graded, mechanical behavior, structures.*

1. Introducción

En la actualidad la mitigación de energía ha sido un tema de gran importancia en varias áreas de la industria, esto mediante disipadores de energía, que son dispositivos que convierten la energía cinética en otras formas de energía, por ejemplo: en energía de presión en fluidos, energía elástica en sólidos deformables y una combinación de energías elástica y plástica en sólidos permanentemente deformables (Mori, y otros, 2007). El objetivo primario de los amortiguadores de energía es mantener los esfuerzos internos debajo de un esfuerzo límite que podría causar daño. Este objetivo se obtiene al redistribuir los esfuerzos o deformaciones a lo largo del material. Otra característica importante incluye la conversión irreversible de la energía de impacto, además de tener modos estables y repetibles de deformación, una capacidad máxima de energía de absorción específica y bajo costo. Por lo anterior, el uso de estructuras ligeras que disipen cargas de impacto han sido el foco de interés en años recientes (Ali M. , Qamhiyah, Flugrad, & Shakoor, 2008). En particular, las estructuras celulares hexagonales o honeycombs (Chiang, Boay, & Keey, 2007)

En la naturaleza existen muchos ejemplos de disipadores de energía, por ejemplo, en un fémur humano, también llamado hueso esponjoso, existe la presencia de una estructura celular, esta ayuda a reducir los niveles de esfuerzo de apoyo y los impactos en las uniones. Otro ejemplo es la madera, la cual tiene una configuración celular con excelentes propiedades en absorción de energía en las direcciones axial, radial y tangencial. Otro ejemplo más de estas estructuras son los panales de las abejas, su configuración hexagonal les confiere alta rigidez y bajo peso que los hace candidatos ideales para reducir efectos de impactos en las industrias automotriz, aeroespacial y de empaquetado o embalaje. Un ejemplo más de los disipadores de energía queda en evidencia al observar la estructura celular graduada en una cáscara de plátano (ver figura 1) (Chen, y otros, 2008). La geometría de esta implica que, uno de los requisitos funcionales de la cáscara de plátano, es proteger el núcleo suave de éste de impactos externos.



Figura 1 Estructura celular graduada en cáscara de plátano.

Esta estructura tiene tres características únicas, primero, contiene una estructura celular graduada, esto es, que el tamaño y la forma de las celdas cambia a lo largo del espesor de la cáscara. Segundo, la composición del material varía a lo largo del espesor, esto quiere decir que el material alrededor de las celdas más grandes es esponjoso y suave mientras que se vuelve más rígido de manera continua en la dirección radial hacia el exterior de la cáscara. Tercero, las celdas contienen un fluido que, en el contexto de absorción de energía, mejora la integridad estructural (Ali M. , Qamhiyah, Flugrad, & Shakoor, 2006). Técnicamente, este tipo de material es llamado material funcionalmente graduado (FGM por sus siglas en

inglés) (Wiley, 2004). En los FGMs, la composición y la estructura varían gradualmente a lo largo de una cierta dirección, resultando en cambios importantes en las propiedades del material.

Así, en este trabajo, se considerarán dos materiales plásticos típicos que se usan en impresiones 3D, con propiedades mecánicas disímiles: uno con características de un material más “frágil” y resistente, y el otro con propiedades de un material más “dúctil” y de baja resistencia mecánica. Esto con el fin de obtener una estructura con un determinado gradiente de composición y de propiedades mecánicas a lo largo de una cierta dirección. De dicha estructura se estudiará numéricamente su respuesta mecánica y se determinará la potencialidad de su uso como atenuador de cargas de impacto.

2. Métodos

Selección de materiales con propiedades diferentes para aplicar concepto FGM

Para la selección de los materiales a considerar para la estructura celular FG se tomaron en cuenta los materiales polímeros que pueden ser impresos por medio de impresión 3D y sus respectivos módulos elásticos y coeficientes de Poisson, ver tabla 1.

Tabla 1 Propiedades de polímeros para impresión 3D.

	Módulo elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson
ABS	1681.5	
PLA	2346.5	0.36
PC	2134	
Nylon	579	
Polipropileno	220	0.4
PBS	900	0.245

Tanto el módulo elástico como el coeficiente de Poisson son relevantes para la selección de los materiales dado que son las propiedades principales necesarias para el análisis numérico de las propiedades mecánicas.

Selección de tamaño representativo de espécimen

Al analizar experimental o numéricamente materiales cuya micro o macroestructura sea de naturaleza periódica (ej. honeycombs), se utiliza un tamaño representativo de espécimen. Éste consiste en una región limitada (más pequeña) del dominio que contiene las principales características estructurales del material, y responde como medio infinito si una deformación uniforme es aplicada junto con las condiciones de frontera adecuadas.

Para determinar el tamaño mínimo representativo de muestra, en este trabajo se analizará numéricamente el comportamiento elástico de especímenes de diferentes tamaños. En particular se determinará el módulo elástico en las dos direcciones en el plano, x y y , de una probeta con celdas hexagonales. Se incrementará gradualmente el tamaño de espécimen. Al comparar los valores de los módulos elásticos obtenidos para los diferentes tamaños de probeta, debe observarse una tendencia hacia valores constantes de los módulos conforme aumenta el tamaño de espécimen. Se elegirá el tamaño de espécimen a partir del cual los módulos elásticos no varíen significativamente (Jin, Zhou, Wang, Wu, & Shu, 2015).

El tamaño de espécimen será definido en términos del número de celdas hexagonales en cada probeta. Así, se analizarán los siguientes tamaños:

• 5x5 celdas	• 13x13 celdas
• 7x7 celdas	• 15x15 celdas
• 9x9 celdas	• 17x17 celdas
• 11x11 celdas	

Estas probetas de material celular serán sometidas a desplazamientos direccionales en x y en y para generar un estado uniforme de deformación. De los datos experimentales obtenidos se calculan los módulos elásticos en cada dirección y de cada espécimen. Dichos módulos se calculan como sigue. El módulo elástico en dirección x se calcula con la expresión de la ecuación 1.

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x} \quad (1)$$

Similarmente el módulo elástico en dirección y se calcula utilizando la ecuación 2.

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} \quad (2)$$

Donde σ_x y σ_y son los esfuerzos realizados en su respectiva dirección, cada uno calculado con las ecuaciones 3 y 4.

$$\sigma_x = \frac{F_x}{A_y} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_x} \quad (4)$$

Aquí F_x y F_y son las fuerzas de reacción en cada uno de los apoyos de las celdas hexagonales. Las respectivas áreas son calculadas de empleando las ecuaciones 5 y 6 (figura 2).

$$A_x = 10nL \quad (5)$$

$$A_y = 10nL\sqrt{3} \quad (6)$$

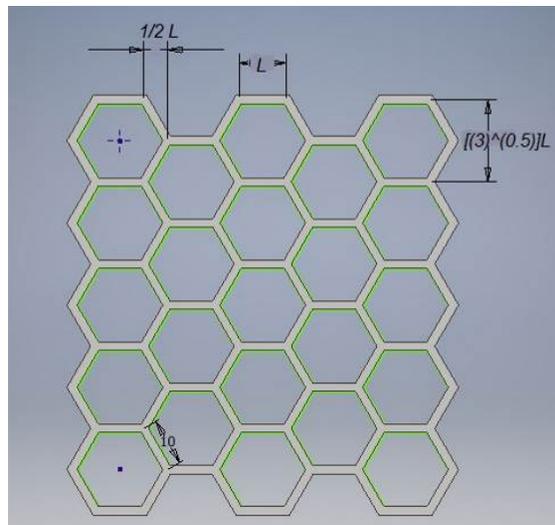


Figura 2 Esquema de medición de dimensiones de un sólido celular.

Donde n es el número de longitudes L en su respectiva dirección de acuerdo con la figura 2 y 10 es la profundidad, en milímetros, del espécimen.

Por otro lado ϵ_x y ϵ_y se calculan utilizando las ecuaciones 7 y 8.

$$\epsilon_x = \frac{\delta_x}{L_{0x}} \quad (7)$$

$$\epsilon_y = \frac{\delta_y}{L_{0y}} \quad (8)$$

Donde δ_x y δ_y son las deformaciones en su respectiva dirección. Mientras que L_{0x} y L_{0y} son las longitudes originales calculadas con las ecuaciones 9 y 10.

$$L_{0x} = nL \quad (9)$$

$$L_{0y} = nL\sqrt{3} \quad (10)$$

Una vez obtenidos los módulos elásticos de cada uno de los especímenes se grafican juntos y se selecciona el espécimen cuyos módulos elásticos, tanto en x como en y empiecen a ser constantes al aumentar el tamaño del espécimen (Gibson & Ashby, 1997).

Adecuación de datos para experimentación numérica

Dado que los datos de los materiales obtenidos de un artículo publicado por Qui (Qiu, Song, & G., 2016), ver figura 3, para las mezclas de materiales graduados no son los adecuados para introducir en el software de simulación para experimentación numérica, se usó el método de ajuste de funciones por mínimos cuadrados o estimación de parámetros para obtener modelos más simplificados de las curvas de esfuerzo-deformación de cada mezcla.

El método de ajuste de funciones por mínimos cuadrados o estimación de parámetros emplea la fórmula de la ecuación 11.

$$y = a_0 \frac{x}{a_1 + x} \quad (11)$$

Para crear un modelo modificado de una serie de datos utilizando la variación de los parámetros a_0 y a_1 . Para ello se saca la sumatoria de errores de la serie de

datos y se busca minimizar el error mediante la extensión del software Excel llamada Solver.

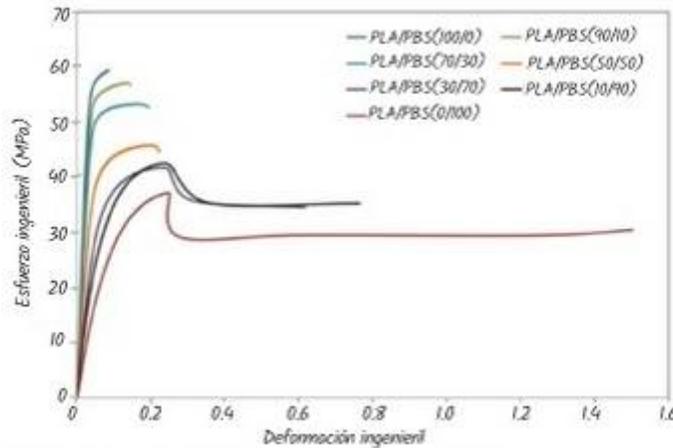


Figura 3 Curvas de esfuerzo-deformación de tensión uniaxial para mezclas de PLA/PBS (Qiu, Song, & G., 2016).

Mediante el mismo software Excel se saca el error relativo y el coeficiente de relación de la matriz de datos formada por los datos experimentales y los datos del modelo modificado, si el coeficiente de correlación es superior a 0.7 entonces el modelo modificado es aceptable.

Uso de software de simulación para buscar modos de falla de espécimen de prueba

El software utilizado para la experimentación numérica en búsqueda de modo de falla del espécimen es Ansys Wortbench. En dicho software se tiene una biblioteca con los datos de los materiales que tiene el programa por default, sin embargo, dado que en este proyecto se utilizarán mezclas graduadas de dichos materiales, entonces se tiene que introducir los nuevos datos de manera manual. Los datos necesarios para la simulación de análisis estructural del espécimen en comportamiento lineal, es decir, cuando la deformación no sobrepasa la zona elástica del material, son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Para simular el comportamiento no lineal se tiene que añadir en las propiedades del material un apartado de comportamiento multilineal, es en este apartado que se

introducen los datos del modelo simplificado de las curvas de esfuerzo-deformación calculadas anteriormente.

3. Resultados

Selección de tamaño representativo de espécimen

De acuerdo con la metodología expuesta anteriormente se realizaron experimentaciones numéricas con todos los especímenes, desde el tamaño de 5×5 hasta el tamaño de 17×17 celdas. El objetivo es analizar el comportamiento elástico de los especímenes en el plano x - y . Para determinar módulos elásticos en la dirección y , las condiciones de frontera en los especímenes de prueba fueron las siguientes, ver figura 4:

- *Frontera superior*: desplazamientos prescritos en la dirección y .
- *Frontera inferior*: restricción de movimiento en la dirección y ; restricción en x para nodos ubicados justo a la mitad del espécimen, a lo largo de una línea en el espesor.
- *Fronteras izquierda y derecha*: fronteras libres.

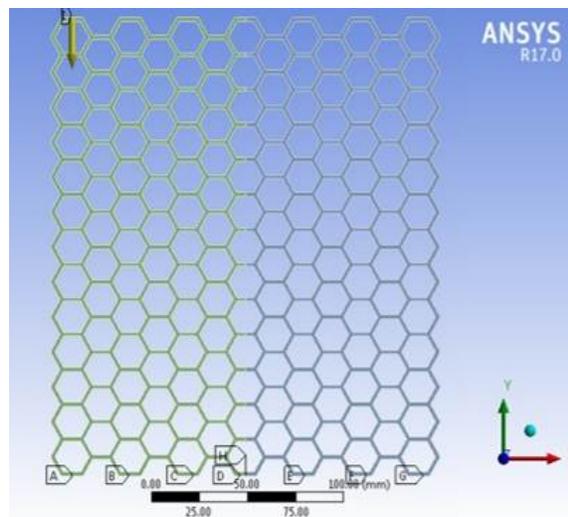


Figura 4 Panel de 13×13 celdas con desplazamiento en dirección y .

Similarmente, para determinar módulos elásticos en la dirección x , las condiciones de frontera correspondientes son, ver figura 5:

- *Frontera izquierda*: desplazamientos prescritos en la dirección x .
- *Frontera derecha*: restricción de movimiento en la dirección x ; restricción en y para nodos ubicados justo a la mitad del espécimen, a lo largo de una línea en el espesor.
- *Fronteras superior e inferior*: fronteras libres.

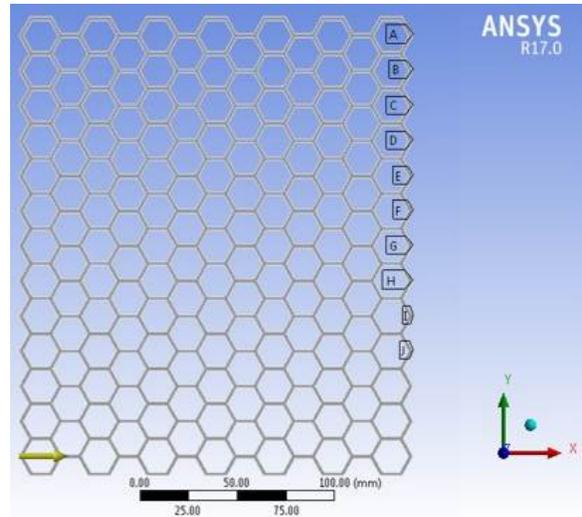


Figura 5 Panel de 13x13 celdas con desplazamiento en dirección x .

Al proporcionar valores a los desplazamientos prescritos de 1 mm para las direcciones x y y , de las simulaciones correspondientes se obtuvieron las fuerzas de reacción; con estas fuerzas reactivas se obtuvieron los correspondientes esfuerzos normales en las direcciones x y y , usando las ecuaciones 3 y 4, respectivamente. Las deformaciones normales en x y y se obtuvieron de las ecuaciones 2.7 y 2.8, respectivamente, con δx y δy igual a 1 mm. Finalmente, los módulos elásticos en direcciones x y y fueron calculados de las expresiones 1 y 2, respectivamente. La tabla 2 muestra un resumen de todos los cálculos realizados. Se graficaron los datos obtenidos en la tabla 2 para seleccionar el mínimo tamaño de espécimen, ver figura 6.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el gráfico, se observa que se puede tomar como mínimo el tamaño de probeta de 9x9 celdas ya que a partir de éste los módulos elásticos tienden a ser constantes. También es de notarse que

para un espécimen de dimensiones infinitas (medio infinito), los módulos elásticos tienden a ser iguales, lo cual comprueba lo predicho por la ecuación 13, $E_x=E_y$, esto quiere decir que la estructura celular hexagonal es isotrópica.

Tabla 2 Datos obtenidos de las simulaciones hechas a especímenes de celdas.

Tamaño espécimen	Reacción x (N)	Reacción y (N)	Área y	Área x	Esfuerzo x (kPa)	Esfuerzo y (kPa)	Longitud y	Longitud x
Panal 5x5	8177.2	9542.8684	0.00087	0.0008	9442.2172	11928.5855	86.6025	80
Panal 7x7	8709.2	9080.2	0.00121	0.0011	7183.227	8254.7272	121.2435	110
Panal 9x9	9016.47	8707.4809	0.00156	0.0014	5784.0682	6219.6292	155.8845	140
Panal 11x11	9215.86	8544.95	0.00191	0.0017	4837.0720	5026.4411	190.5255	170
Panal 13x13	9353.73	8378.3519	0.00225	0.002	4154.1373	4189.1759	225.1666	200
Panal 15x15	9455.49	8295.94	0.0026	0.0023	3639.4197	3606.9304	259.8076	230
Panal 17x17	9534.1	8199.2565	0.00294	0.0026	3237.9501	3153.5601	294.4486	260
Deformación x	Deformación y	Deformación Unitaria x	Deformación Unitaria y	Módulo Elástico x	Módulo Elástico y	% Error ex	% Error ey	
1.0049	1.0046	0.0125	0.0116	751694.0784	1028315.559	4.7290	3.0024	
1.0037	1.0034	0.0091	0.0082	787242.184	997441.1927	2.5641	3.0392	
1.0029	1.0025	0.0071	0.0064	807428.007	967126.4288	1.5983	1.1857	
1.0024	1.0021	0.0058	0.0052	820333.4477	955658.7814	1.0669	1.4744	
1.0021	1.0018	0.0050	0.0044	829086.3853	941567.7065	0.7811	0.6326	
1.0018	1.0016	0.0043	0.0038	835562.5409	935611.0382	0.5935	0.8922	
1.0016	1.0014	0.0038	0.0034	840522.1953	927263.3337			

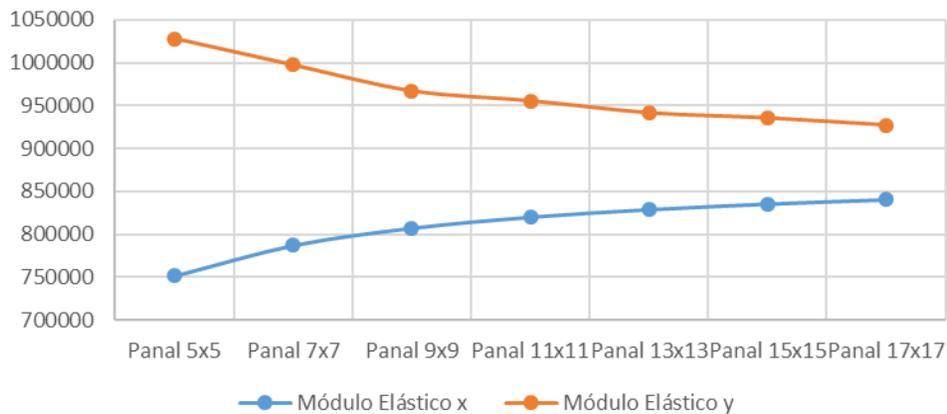


Figura 6 Gráfico de módulos elásticos en función del tamaño de espécimen.

Adecuación de datos para experimentación numérica

Como se mencionó en la sección 2, las propiedades obtenidas del trabajo de Qui (Qiu, Song, & G., 2016) no eran las adecuadas para introducir en el software

de simulación ANSYS, esto es porque el comportamiento de las curvas presenta pendientes negativas que arrojan un error cuando son introducidos en la biblioteca de datos del software, ver figura 7.

Por lo tanto, se adecuaron los datos con el método de ajuste de funciones por mínimos cuadrados o estimación de parámetros, dicho método nos arrojó los modelos modificados de las curvas como se ven en la figura 8.

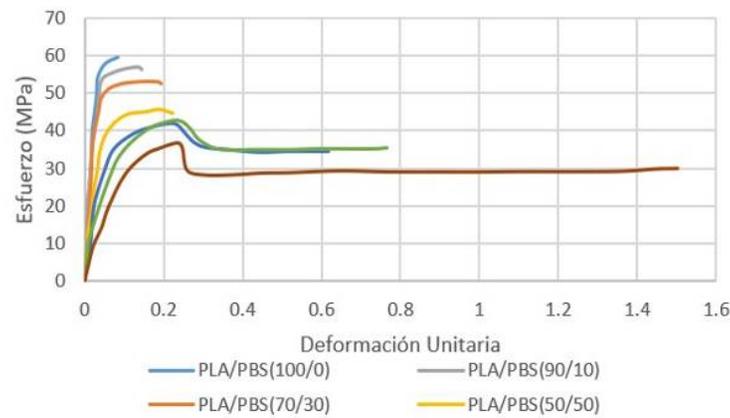


Figura 7 Curvas de esfuerzo-deformación para mezclas de PLA/PBS.

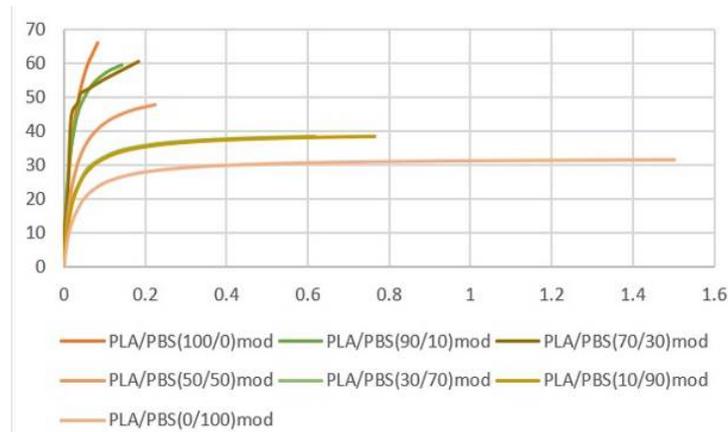


Figura 8 Modelos modificados de curvas tensión-deformación.

Se obtuvo el coeficiente de correlación y el error típico entre la curva original y el modelo modificado. El coeficiente de correlación es un indicador de la tendencia que hay entre los datos experimentales y el modelo modificado mientras que el error típico indica el error presente entre dichos datos, ver tabla 3.

Dado que todos los coeficientes de correlación están por encima del 0.7 entonces los modelos modificados son aceptables para su uso.

Tabla 3 Coeficientes de correlación y errores típicos de modelos de curva modificados.

Modelo modificado	Coeficientes de correlación	Error típico
PLA/PBS(100/0)mod	0.974770775	4.82994762
PLA/PBS(90/10)mod	0.989835433	3.04093231
PLA/PBS(70/30)mod	0.84168594	4.1204596
PLA/PBS(50/50)mod	0.991788418	2.1207999
PLA/PBS(30/70)mod	0.95847103	3.83139333
PLA/PBS(10/90)mod	0.955886845	3.56900492
PLA/PBS(0/100)mod	0.91580126	3.77127001

Experimentación numérica en materiales celulares FG

- **Análisis en comportamiento lineal de especímenes celulares de PLA, PBS y FG.** Primeramente, se realizaron simulaciones con modelos de comportamiento lineal, es decir, se le introdujeron datos del comportamiento de los materiales para que su comportamiento fuera completamente elástico.

Fueron tres especímenes en total, uno con las propiedades del polímero puro PLA, otro con las propiedades del polímero puro PBS y finalmente uno dividido en 7 segmentos a lo largo de la dirección x , cada segmento con propiedades discretas de mezclas de PLA/PBS, para simular el material funcionalmente graduado.

Cada segmento del espécimen graduado tiene una mezcla diferente de PLA y PBS a excepción de los extremos, el extremo derecho tiene PBS puro y el extremo izquierdo PLA. La graduación para los segmentos intermedios se hizo de manera lineal aumentando poco a poco el contenido de PLA y disminuyendo el contenido de PBS de derecha a izquierda. Esto se hizo, en la experimentación numérica, variando los valores del módulo de Young y del coeficiente de Poisson de manera lineal, lo cual proporciona un gradiente constante de propiedades, ver figura 9.

Los especímenes de 9x9 celdas fueron restringidos en las dos direcciones en un punto medio en el extremo derecho, el resto de las superficies fueron libres

a desplazarse en las direcciones y y z . Posteriormente se le aplicó un desplazamiento en todas las superficies del extremo izquierdo en dirección x , ver figura 10.

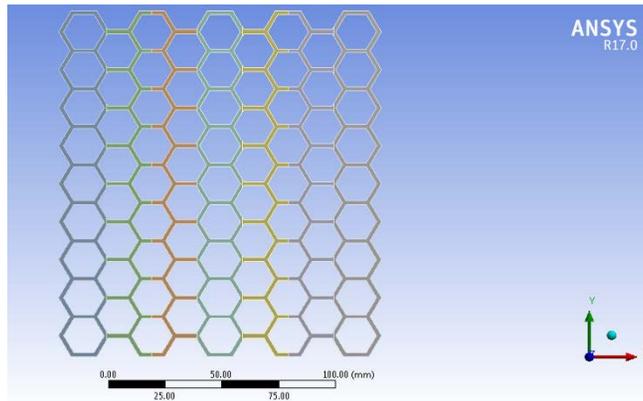


Figura 9 Espécimen de prueba de 9x9 celdas dividido en 7 fragmentos con diferentes mezclas de PLA/PBS.

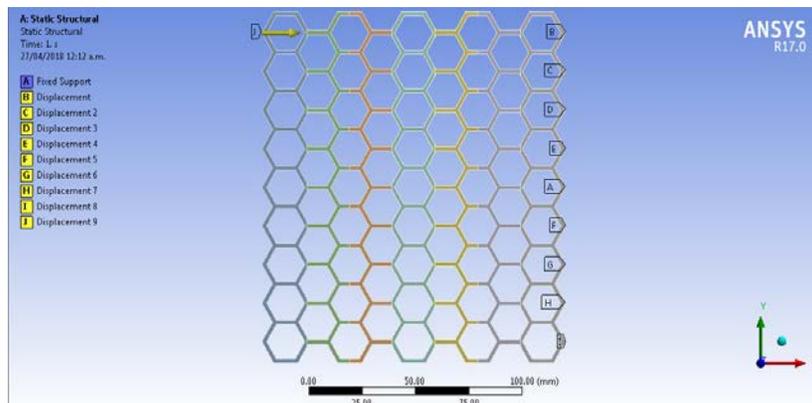


Figura 10 Espécimen de 9x9 celdas segmentado con soportes y desplazamiento aplicado.

Se realizaron diferentes pruebas con diferentes desplazamientos desde 1 a 5 mm.

De dichas simulaciones se obtuvieron las fuerzas de reacción en las superficies delimitadas y el soporte fijo, además de las deformaciones en x . Esto con el fin de obtener los esfuerzos y las deformaciones unitarias de todos los especímenes sometidos a prueba.

Dichos datos se graficaron en conjunto para obtener las curvas de esfuerzo-deformación de cada uno de los materiales, ver figura 11.

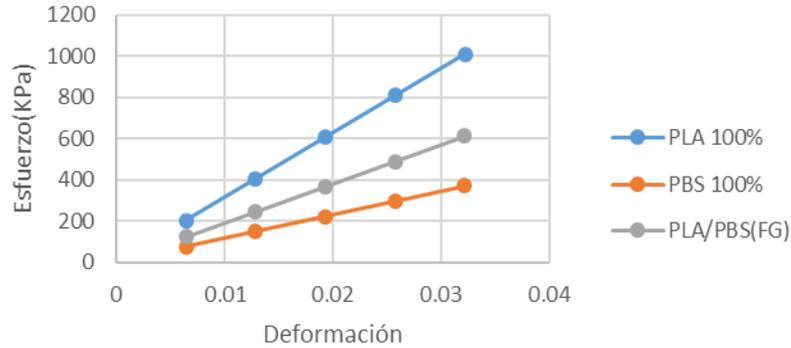


Figura 11 Curvas de Esfuerzo-Deformación de especímenes en comportamiento lineal.

Se puede ver entonces que el comportamiento del material FG compuesto por PLA y PBS se ubica en un rango entre el comportamiento de cada uno de los materiales puros, esto es en análisis bajo comportamiento lineal.

- **Análisis en comportamiento no lineal de especímenes celulares de PLA, PBS y FGM.** Similarmente, se realizaron simulaciones con especímenes de prueba de 9x9 celdas, esta vez, sin embargo, se utilizaron datos diferentes para considerar el comportamiento de los materiales en su zona plástica y, de esta manera, estudiar la posibilidad de una redistribución de deformaciones favorable para disipar energía.

De igual manera que en la experimentación en comportamiento lineal, se utilizó una estructura dividida en 7 segmentos en cada uno de los cuales se introdujeron los datos de los modelos modificados de las curvas obtenidos del trabajo de Qui (Qiu, Song, & G., 2016). Siendo entonces la parte derecha de la estructura puramente de PBS, el siguiente segmento con una composición discreta de 90/10 de PBS/PLA, seguido de un segmento de 70/30, otro segmento de 50/50, otro de 30/70 y de 10/90 hasta el último de PLA puro que corresponde al extremo izquierdo. Para este caso se tuvieron que realizar simulaciones con valores de desplazamiento más altos, esto con el fin de llevar el comportamiento de los especímenes de la zona elástica a la zona plástica. Se obtuvieron las fuerzas de reacción en las superficies delimitadas y el soporte fijo, además de las deformaciones en x . Esto con el fin de obtener los esfuerzos y las deformaciones unitarias de todos los especímenes sometidos a prueba.

Posteriormente todos los datos se graficaron en conjunto para obtener las curvas de esfuerzo-deformación de cada uno de los especímenes celulares sometidos a prueba, ver figura 12. Se puede ver entonces que el comportamiento del material FG compuesto por PLA y PBS se ubica en un rango entre el comportamiento de cada uno de los materiales puros, esto es en análisis bajo comportamiento no lineal.

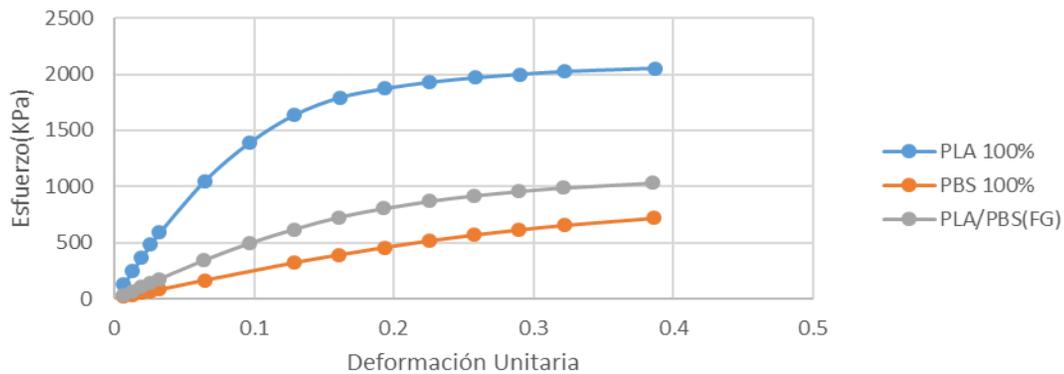


Figura 12 Curvas de Esfuerzo-Deformación de especímenes en comportamiento no lineal.

- **Análisis no lineal de estructuras celulares Funcionalmente Graduadas.** Al aplicar un desplazamiento prescrito de 20 mm en la dirección x , correspondiente a una deformación unitaria $\epsilon_x = 0.1286$, se puede observar en la figura 13 que casi la totalidad de las celdas hexagonales alcanzan individualmente un patrón uniforme de configuración deformada para el espécimen de material PBS. Lo mismo puede observarse para el espécimen de material PLA en la figura 14. Consecuentemente, en estos dos especímenes constituidos de materiales homogéneos se alcanzan estados uniformes de deformación.

Por otro lado, las figuras 15 y 16 muestran esfuerzos en las estructuras celulares de material homogéneo PBS y PLA, respectivamente. Tomando como referencia las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a 100% PBS y 100% PLA de la figura 6, se observa que para una deformación $\epsilon_x = 0.1286$ las uniones de las celdas hexagonales empiezan a ceder, con valores de 16 MPa para el PBS y 64 MPa para el PLA.

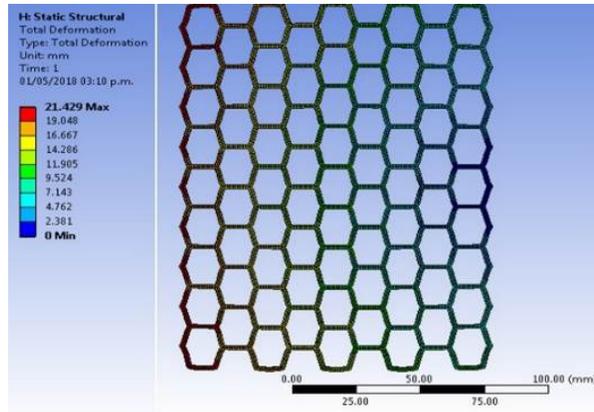


Figura 13 Espécimen de PBS sometido a deformación uniforme de $\epsilon_x = 0.1286$ en dirección x .

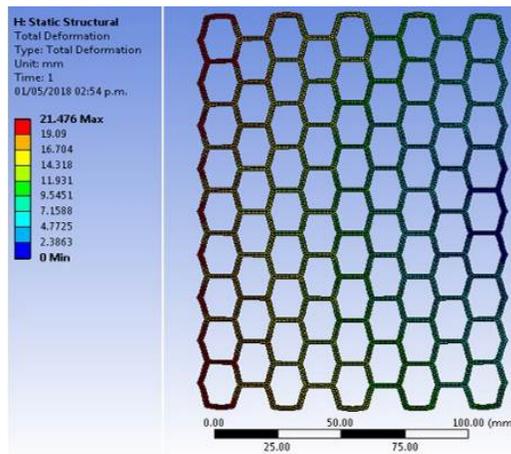


Figura 14 Espécimen de PLA sometido a deformación uniforme $\epsilon_x = 0.1286$ en dirección x .

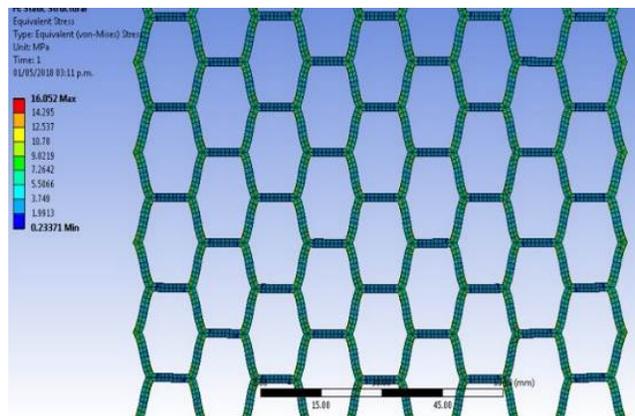


Figura 15 Esfuerzos equivalentes de espécimen de PBS sometido a deformación uniforme de $\epsilon_x = 0.1286$ en dirección x .

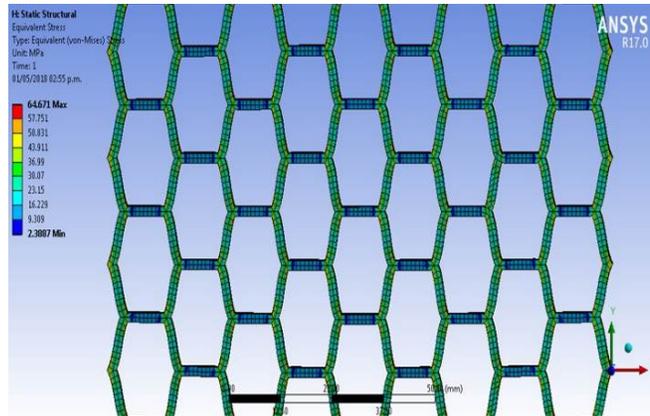


Figura 16 Esfuerzos equivalentes de espécimen de PLA sometido a deformación uniforme de $\epsilon_x = 0.1286$ en dirección x.

Considerando ahora el comportamiento no lineal de la estructura celular FG PBS/PLA, se muestra en la figura 17 la configuración deformada del espécimen FG al someterlo a una deformación $\epsilon_x = 0.1286$.

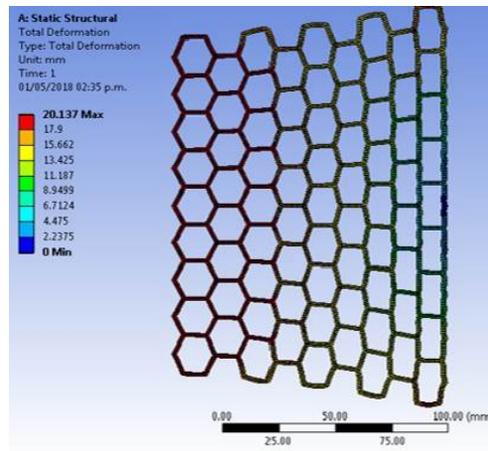


Figura 17 Espécimen FG de PLA/PBS sometido a deformación uniforme de $\epsilon_x = 0.1286$ en dirección x.

Es notable observar que, a diferencia de los especímenes de materiales homogéneos, los patrones de deformación de las celdas hexagonales ya no son uniformes. Por tanto, existe una redistribución de la deformación en materiales celulares FG. Más aún, se observa de la figura 18 que en las celdas hexagonales con mayor contenido de PBS (celdas a la derecha del espécimen), la cedencia de las uniones ya ha ocurrido, mientras que las celdas

con mayor contenido de PLA aún se están deformando elásticamente. Estas observaciones en comportamiento material hacen que materiales celulares FG sean candidatos potenciales en el diseño de estructuras celulares resistentes al impacto: la energía cinética se convierte en energía elástica y plástica, siendo ésta última irreversible. Además, si este tipo de materiales FG se usaran como material de protección o embalaje, se pueden proteger partes delicadas de un cuerpo o un objeto al hacer ceder plásticamente las celdas cercanas al cuerpo, atenuando la energía cinética.



Figura 18 Esfuerzos equivalentes de espécimen de PLA/PBS sometido a deformación uniforme de $\epsilon_x = 0.1286$ en dirección x .

4. Discusión

Se realizaron distintas pruebas, las primeras de ellas, para determinar el tamaño mínimo representativo de los especímenes, éstas permitieron comprobar que los modelos estructurales de celdas hexagonales como un medio infinito poseen la propiedad de ser estructuras isotrópicas, esto es debido a que los módulos elásticos tanto en x como en y tienden a ser iguales, $E_x = E_y$.

En pruebas de comportamiento lineal de los especímenes celulares se observó que, con un gradiente constante de contenido de propiedades en la estructura FG de PLA/PBS, ésta demuestra un comportamiento lineal semejante al de los materiales puros PLA y PBS.

En pruebas de comportamiento no lineal de los especímenes celulares se pudo observar que los patrones de deformación de las celdas hexagonales en el

espécimen FG no son uniformes. Las celdas hexagonales con mayor contenido de PBS (material dúctil) muestran cedencia en las uniones mientras que las celdas con mayor contenido de PLA (material frágil) siguen deformándose elásticamente. Por lo tanto, los materiales celulares FG son candidatos potenciales en el diseño de estructuras celulares resistentes al impacto. Esto también los hace viables para aplicaciones de protección o embalaje, ya que pueden atenuar la energía cinética al hacer ceder plásticamente las celdas cercanas al cuerpo u objeto a proteger.

Lo descrito anteriormente, permite concluir que el principal objetivo de este trabajo, el cual consistía en el desarrollo de una estructura FG con dos materiales plásticos con propiedades mecánicas disímiles para obtener su gradiente de composición y propiedades mecánicas en cierta dirección, se cumplió y permitió estudiar de manera numérica la respuesta mecánica de dicho material celular, lo que lo hace un candidato potencial para su uso como atenuador de cargas de impacto.

Por otro lado, en lo concerniente a la continuación de este proyecto se propone la validación de los datos obtenidos por experimentación numérica con prototipos físicos de las estructuras FG propuestas. Dichas estructuras serán fabricadas mediante tecnología de impresión 3D y, posteriormente, sometidas a pruebas de compresión en una máquina de tensión universal para obtener las curvas de esfuerzo-deformación reales de cada uno de los especímenes.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Ali, M., Qamhiyah, A., Flugrad, D., & Shakoor, M. (2006). Compact energy absorbing cellular structure, in Structures Under Shock and Impact IX. WIT Transactions on The Built Environment, 413-420.
- [2] Ali, M., Qamhiyah, A., Flugrad, D., & Shakoor, M. (2008). Theoretical and finite element study of a compact energy absorber. Advances in Engineering Software 39, 95-106.
- [3] Chen, P., Lin, A., Lin, Y., Seki, Y., Stokes, A., Peyras, J., . . . McKittrick, J. (2008). Structure and mechanical properties of selected biological materials. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 1, 208-226.

- [4] Chiang, F., Boay, C., & Keey, S. (2007). Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure. *Science*, 588-594.
- [5] Gibson, L., & Ashby, M. (1997). *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [6] Jin, T., Zhou, Z., Wang, Z., Wu, G., & Shu, X. (2015). Experimental Study on the effects of specimen in-plane size on the mechanical behavior of aluminum hexagonal honeycombs. *Elsevier*, 23-35.
- [7] Mori, L., Lee, S., Xue, Z., Vaziri, A., Queheillalt, D., Dharmasena, K., . . . Espinosa, H. (2007). Deformation and fracture modes of sandwich structures subjected to underwater impulsive loads. *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 2.
- [8] Qiu, T. Y., Song, M., & G., Z. L. (2016). Testing, characterization and modelling of mechanical behaviour of poly (lactic-acid) and poly (butylene succinate) blends. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*.
- [9] Wiley, J. (2004). *The Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs*. Wiley-Interscience publication.