

Absorción de energía generada por cargas de impacto en estructuras celulares
funcionalmente graduadas mediante elementos finitos

Andrés Felipe Montesino Loza, Jorge David Rubio Nieto

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Octavio Andrés Gonzales Estrada
Ingeniero Mecánico, PhD.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2022

Agradecimientos

Es para mí un orgullo concluir mi ciclo universitario con la realización del presente trabajo investigativo, mismo que me llevará la obtención de mi título profesional como ingeniero mecánico; en tal sentido, resulta un verdadero honor para mí exaltar y presentar mi agradecimiento a quienes contribuyeron de una u otra manera al alcance de este objetivo.

En primer lugar, a Dios por haberme bendecido en cada uno de los aspectos de mi vida, en especial por el hecho alinear los sucesos y a las personas necesarias para hoy en día presentar esta obra a quienes les resulte de interés y por qué no, de utilidad.

A mi madre, no solo por correr con todos los gastos económicos que suponía mi estadía en la universidad, sino por el amor incondicional que solo una madre puede brindar, por su preocupación, por mi bienestar, por el apoyo moral constante que me impulsaba a querer continuar en mi lucha por culminar mis estudios, incluso en esos momentos de crisis, en los que parecía mucho más sencillo abandonar todo. Pero sobre todas las cosas por la cantidad de sacrificios que estoy seguro que realizó sin que yo me enterara, con tal de ayudarme a alcanzar mi sueño de convertirme en alguien con valor para la sociedad. Sin lugar a dudas este título le pertenece a ella. De igual forma a cada miembro de mi familia por poner su granito de arena en la unidad familiar, el apoyo mancomunado y amor sincero que siempre predicaron mi abuela Raquel y mi abuelo Carlos.

A la universidad Industrial de Santander y a sus directivos por su incansable búsqueda de la excelencia a nivel académico, poniendo a nuestra disposición los mejores recursos humanos, tecnológicos y de infraestructura.

A cada uno de los profesores que desde su experiencia y su don por la enseñanza han sabido transmitir el amor por esta carrera y lo apasionante que puede llegar a ser. En especial al doctor Octavio Andrés Gonzáles estrada, quien con paciencia, profesionalismo y liderazgo ha sabido dirigir este trabajo de investigación.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a mis compañeros más cercanos de la universidad, Luis Alberto Vaca, Freddy Alexandre Gómez, y Jorge David Rubio con quienes he tenido el privilegio de compartir cada uno de los momentos, y experiencias vividas en esta institución.

Andrés Felipe Montesino Loza

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mi familia, por su incondicionalidad y todo lo recibido de su parte, sin su gran ayuda la terminación de este proyecto no hubiera sido posible. Dedico este triunfo a mi padre, por sus consejos y sabiduría con los cuales he podido forjar gran parte de mi personalidad; a mi madre, quien con su amor genuino y todo lo que irradia se ha convertido en mi mayor modelo a seguir; a mi hermana, quien es como mi segunda madre, porque siempre ha estado presente y ha sido el pilar más grande de nuestro hogar; a mi hermano gemelo y amigo, por todos los momentos compartidos fuera y dentro de la Universidad.

Gracias a todas las personas con las que me crucé en este bonito proceso, por las experiencias vividas, por el apoyo recibido, por el cariño entregado, por los consejos, las risas, por lo bueno y lo aprendido. Agradezco especialmente a mis amigos y colegas Luis José, Felipe, Luis Alberto y Freddy, con los que compartí y trabajé desde el inicio de esta carrera.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería Mecánica por su incansable búsqueda de la excelencia y hacer de nosotros profesionales íntegros. A sus profesores, por sus enseñanzas y liderazgo, especialmente al doctor Andrés Gonzáles por su importante guía en la terminación de este proyecto de investigación.

Gracias infinitas a Dios por lo que fue, es y será, porque por Él absolutamente todo ha sido posible.

Jorge David Rubio Nieto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Metodología	18
2.1 Parámetros geométricos de las estructuras celulares	18
2.2 Propiedades del material.....	25
2.3 Manufactura de las estructuras celulares	26
2.4 Método numérico.....	28
3. Resultados.....	32
4. Conclusiones.....	46
5. Recomendaciones	48
Referencias Bibliográficas	49
Apéndices.....	53

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Dimensiones generales aproximadas de las estructuras celulares	19
Tabla 2. Diseño asistido por computadora de los sólidos celulares.....	20
Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas del Nylon	25
Tabla 4. Sólidos celulares fabricados mediante manufactura aditiva	27
Tabla 5. Rango de energías de impacto simuladas	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema general de la probeta	18
Figura 2. Celda unitaria tipo hexagonal	22
Figura 3. Espesor de pared vs número de pared para estructuras hexagonales graduadas funcionalmente.....	23
Figura 4. Perfil de las estructuras tipo hexagonal uniforme y graduadas funcionalmente	24
Figura 5. Diseño de la arquitectura tipo Voronoi	25
Figura 6. Curva característica de Tensión deformación para el ácido poliláctico PLA	29
Figura 7. Mallado de la estructura celular	30
Figura 8. Convergencia de malla de las estructuras celulares	31
Figura 9. Fuerza vs desplazamiento para estructuras hexagonales uniformes y estructuras graduadas tipo Voronoi y graduada tipo hexagonal	33
Figura 10. Gráfica energía vs tiempo de una estructura celular aplicada una carga de impacto ..	35
Figura 11. Gráficas de energía vs tiempo de las estructuras celulares.....	36
Figura 12. Diagrama comparativo del desempeño energético de las diferentes estructuras celulares	38
Figura 13. Gráfica eficiencia energética vs tiempo requerido para absorber energía.....	39
Figura 14. Eficiencias energéticas a diferentes energías de impacto	42
Figura 15. Clasificación cualitativa del desempeño energético.....	44
Figura 16. Resultados de la clasificación cualitativa de las estructuras celulares estudiadas.....	45

Lista de Apéndices

Apéndice A. Validación de curva tensión-deformación a través de método numérico.....	53
Apéndice B. Curvas de energía vs tiempo para el rango de energías evaluado.....	54
Apéndice C. Proceso de simulación.....	58

Glosario

AM: siglas de Manufactura Aditiva. Conocida también como impresión 3D, es un proceso controlado por computadora utilizado para fabricación de piezas tridimensionales mediante la extrusión de material, generalmente en capas.

CAD: siglas de Diseño Asistido por Computadora. Implementación, aplicación y asistencia de recursos computacionales en el proceso de creación, modificación u optimización gráfica de diseños ingenieriles o arquitectónicos.

Celda unitaria: es la unidad fundamental de una estructura celular, la cual, al repetirse a lo largo y ancho, reproduce toda la geometría del sólido.

Densidad relativa: propiedad que mide la relación existente entre la masa de un sólido celular y el volumen cuboidal que ocupa este, sobre la densidad del material del que está fabricada la arquitectura celular.

Desempeño energético: concepto que establece la relación entre la energía absorbida por una estructura sobre la máxima energía de impacto.

Estructuras celulares: sólidos formados por un arreglo de celdas con bordes o caras sólidas contiguas entre sí.

FDM: siglas de Modelado por Deposición Fundida. Técnica de manufactura aditiva que consiste en la fabricación de elementos sólidos mediante la superposición de capas de material fundido, procedente de filamentos generalmente termoplásticos.

FEM: siglas de Método de Elementos Finitos. Es el proceso matemático utilizado en la simulación computacional para la resolución y análisis de problemas continuos, como en este caso, de estructuras celulares, para la obtención de desplazamientos, fuerzas, energías, esfuerzos,

deformaciones, entre otras. Aunque también se puede utilizar para realizar análisis térmicos, dinámica de fluidos, análisis acústicos y hasta electromagnéticos.

FGM: siglas de Material Funcionalmente Graduado. También conocido como FG, es una técnica mediante la cual se realizan modificaciones topológicas, que permiten una distribución de masa que favorece la variación de propiedades como la rigidez a lo largo de una estructura celular. En el caso de las estructuras celulares, esto se consigue a través de alteraciones en el tamaño, densidad, geometría o disposición de las celdas unitarias.

Nylon: también conocida como poliamida, es un termoplástico ampliamente utilizado para la manufactura aditiva o impresión 3D por sus excelentes propiedades mecánicas.

Volumen cuboidal: hace referencia al volumen que ocupa la estructura celular si fuese tomada como un cubo macizo, por lo cual la magnitud es determinada por el producto entre el largo, el ancho y la altura total del sólido y se utiliza para calcular la densidad relativa. El volumen cuboidal es diferente del real, en el cual sí se deben tener en cuenta los huecos al interior de la estructura celular, lo cual hace más complejo su cálculo.

Resumen

Título: Absorción de energía generada por cargas de impacto en estructuras celulares funcionalmente graduadas mediante elementos finitos.*

Autor: Andrés Felipe Montesino Loza, Jorge David Rubio Nieto.**

Palabras Clave: Sólidos celulares, graduación funcional de materiales, absorción de energía, método de elementos finitos, manufactura aditiva, modelado por deposición fundida, Nylon.

Descripción: Los sólidos celulares están siendo ampliamente implementados en diferentes sectores industriales como el civil, aeroespacial, naval, seguridad industrial, entre otros, por ser una opción eficiente en términos de sus propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas, comparados con otro tipo de estructuras. El objetivo de este trabajo es analizar, haciendo uso del método de elementos finitos, la influencia de los parámetros geométricos de estructuras celulares fabricadas mediante manufactura aditiva (AM) con la técnica de modelado por deposición fundida (FDM) en su capacidad de absorción de energía. En primer lugar, se diseñaron diferentes topologías de estructuras celulares uniformes y funcionalmente graduadas. Luego, se realizaron modelos numéricos de impacto mediante análisis por elementos finitos (FEA) con el fin de evaluar la energía disipada, las fuerzas y los desplazamientos de las diferentes arquitecturas. Los resultados de este proyecto de investigación indican que hay una clara tendencia que muestra que las estructuras celulares funcionalmente graduadas en todos los rangos de energía establecidos, ofrecen una mejor respuesta a impactos de baja velocidad y por tanto, son recomendables para aplicaciones de este tipo, mientras que las arquitecturas sin clasificación funcional, son preferibles en aplicaciones estructurales, en donde la relación peso-resistencia y la rigidez uniforme, es un requerimiento importante durante el proceso de selección.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Octavio Andrés Gonzales Estrada. PhD

Abstract

Title: Energy absorption generated by impact loads in functionally graded cellular structures by finite elements method.*

Author: Andrés Felipe Montesino Loza, Jorge David Rubio Nieto.**

Key Words: Cellular solids, functionally graded materials, energy absorption, finite elements method, additive manufacturing, fused deposition modeling, Nylon.

Description: Cellular solids are being widely implemented in different industrial sectors such as civil, aerospace, naval, industrial safety, among others, for being an efficient option in terms of their mechanical, thermal, electrical, and acoustic properties, compared to other types of structures. The objective of this work is to analyze, using the finite element method (FEM), the influence of the geometrical parameters of cellular structures fabricated by additive manufacturing (AM) with the fused deposition modeling (FDM) technique on their energy absorption capacity. First, different topologies of uniform and functionally graded cellular structures were designed. Then, numerical impact modeling was performed using finite element analysis (FEA) to evaluate the dissipated energy, forces, and displacements of the different architectures. The results of this research project indicate that there is a clear trend showing that functionally graded cellular structures in all established energy ranges offer a better response to low velocity impacts and are therefore recommended for such applications, while non-functionally graded architectures are preferable in structural applications where the strength-to-weight ratio and the uniform stiffness is an important requirement during the selection process.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Octavio Andrés Gonzales Estrada.

Introducción

Las propiedades y características de los materiales, son las que determinan sus aplicaciones ingenieriles, mismas que pueden ir desde diseños para la industria automovilística y aeroespacial (Hohe et al., 2012), hasta el diseño de estructuras para obras civiles o de seguridad contra choques. En este sentido, resulta conveniente su mejoramiento, por lo que se ha echado mano de distintas técnicas, que van desde la exploración de nuevas aleaciones en el caso de los metales (Smith et al., 2012), hasta la configuración de la geometría de las celdas en el caso de las estructuras de tipo celular (Mohsenizadeh et al., 2016).

Las estructuras celulares son ensambles de celdas con bordes o caras sólidas que se encuentran interconectadas entre sí (Gibson, 1997) y que resultan atractivas debido a su excelente relación peso-resistencia (Ashby, 1983), así como a sus propiedades térmicas, acústicas, entre otras, mediante la optimización topológica (Panesar et al., 2018) o a su gran capacidad de absorción de energía (Shen et al., 2014). Sus posibles aplicaciones dependen de las diferentes configuraciones geométricas que puedan llegar a realizarse, esto ha dado lugar a que se efectúen estudios con geometrías cada vez más complejas que satisfagan requerimientos funcionales específicos. La madera, las esponjas, los huesos o los corales son algunos de los ejemplos de sólidos celulares que podemos encontrar en la naturaleza, y que han servido como referencia o punto de partida para la exploración de nuevas técnicas de fabricación que permitan replicar y/o mejorar las propiedades de estas estructuras para ampliar su gama de aplicaciones, o bien para adaptarlos a una aplicación en particular (Han et al., 2018).

Si de por sí solas, las estructuras celulares son atractivas por las razones mencionadas anteriormente, implementar en ellas el concepto de graduación funcional de un material (FGM)

las vuelve aún más interesantes (Lucero et al., 2018), pues esto implica la realización de modificaciones topológicas cuyo fin es el mejoramiento estructural del material, ello, mediante variaciones en el tamaño, densidad o geometría de las celdas, estimulando una distribución de masa que podrá ser alterada dependiendo de las necesidades, y que por tanto, le ofrece a estas estructuras un carácter de versatilidad, muy apetecible en la industria (Zhang & Zhang, 2013).

Los métodos más tradicionales empleados para la fabricación de las estructuras celulares se basan, en el caso de las espumas, en introducir una corriente gaseosa en un metal o polímero en estado líquido, permitiéndole a las burbujas de gas crecer mientras que se estabiliza y solidifica la materia prima durante el proceso de enfriamiento (Cheneler & Kennedy, 2020), o en el caso de las estructuras celulares con celda tipo hexagonal o honeycomb, el proceso más común de manufactura consiste en la unión de láminas, generalmente de aluminio, mediante pegamento industrial para luego separarlas. El efecto que produce es que, dependiendo de los lugares donde se coloque el pegamento, se obtiene una geometría específica (Smardzewski & Kramski, 2019). Estas limitadas técnicas de manufactura no permiten, en el caso de las espumas, mantener control sobre las propiedades finales del sólido, debido al alto grado de aleatoriedad involucrado en su proceso de producción, o en el caso de los honeycombs, ir más allá de la elaboración de estructuras con geometrías sencillas y poco margen de variabilidad (Casas et al., 2020), situación que incentivó a la exploración e implementación de nuevas técnicas de fabricación que permiten mayor control en ciertos parámetros de diseño. Así es como finalmente y a raíz del desarrollo tecnológico que ha significado la industria 4.0 se llega a la manufactura aditiva (AM), popularmente conocida como impresión 3D (Guerrero-De-Mier et al., 2015), que, a diferencia de las tecnologías convencionales de manufactura, basa su metodología en la adición de material para la fabricación de un producto (Goel & Anand, 2019). Este proceso permite que dicha

tecnología sea capaz de producir de manera efectiva piezas con geometrías de alta complejidad como las estructuras auxéticas (Shokri Rad et al., 2019). A su vez, uno de los métodos AM más utilizados, dado su favorable accesibilidad en el mercado respecto a otras técnicas de impresión 3D, es la tecnología FDM (siglas que en español significan Modelado por Deposición Fundida) (Bates et al., 2019). Su carácter económico, y las ventajas morfológicas que ofrece, es lo que ha llevado al creciente interés por implementar este modelo como una alternativa para la manufactura de los FGM (Duraibabu et al., 2020). Sin embargo, ello representa un reto, pues implica que se realice un gran esfuerzo en experimentaciones que permitan la caracterización del material, y que ayude a determinar cómo el FDM influye en el mejoramiento o empeoramiento de las propiedades de este. Si bien es cierto que se han adelantado extensos trabajos de investigación bajo modelos experimentales y teóricos, de tipo cuasiestáticos (mayormente estudios que implican ensayos de compresión y tensión) (Niknam & Akbarzadeh, 2020), y dinámicos como cargas de impacto sobre espumas (Chen et al., 2018) y estructuras tipo panal de abeja (Rahman & Koohbor, 2020), o cargas cíclicas (Avalle et al., 2018), aún falta ahondar en el análisis de propiedades que son fundamentales (Nazir et al., 2019), como es el caso de la capacidad de absorción de energía generadas por cargas de impacto (Qi et al., 2019) en estructuras que implementen en su modelo un gradiente de densidad en alguna de sus direcciones (Yazdani Sarvestani et al., 2018).

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia de los parámetros geométricos de estructuras celulares funcionalmente graduadas fabricadas mediante manufactura aditiva (AM) con la técnica de modelado por deposición fundida (FDM) en la capacidad de absorción de energía. En primer lugar, se diseñaron diferentes topologías de estructuras celulares uniformes y funcionalmente graduadas. Luego, se realizaron modelos numéricos de impacto mediante

análisis por elementos finitos (FEA) para evaluar la energía disipada y la distribución de fuerzas y desplazamientos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar mediante elementos finitos la capacidad de absorción de energía generada por cargas de impacto de baja velocidad, aplicadas en estructuras celulares de material funcionalmente graduado (FGM) fabricadas mediante manufactura aditiva con la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM).

1.2 Objetivos Específicos

Generar la geometría de las estructuras celulares funcionalmente graduadas (FGM) mediante software CAD para su posterior análisis mediante el método de elementos finitos.

Modelar las cargas de impacto de baja velocidad en las estructuras celulares funcionalmente graduadas y no graduadas, mediante el método de elementos finitos (FEM), con ayuda del software ANSYS, para determinar la capacidad de absorción de energía mediante análisis de la distribución de fuerzas y desplazamientos, historial de energías y desempeño energético.

Comparar los resultados obtenidos de la capacidad de absorción de energía (basados en el análisis de la distribución de fuerzas y desplazamientos, historial de energías y desempeño energético) de las estructuras no graduadas y las estructuras celulares FG para evaluar la viabilidad de los FGM producidos mediante manufactura aditiva por FDM.

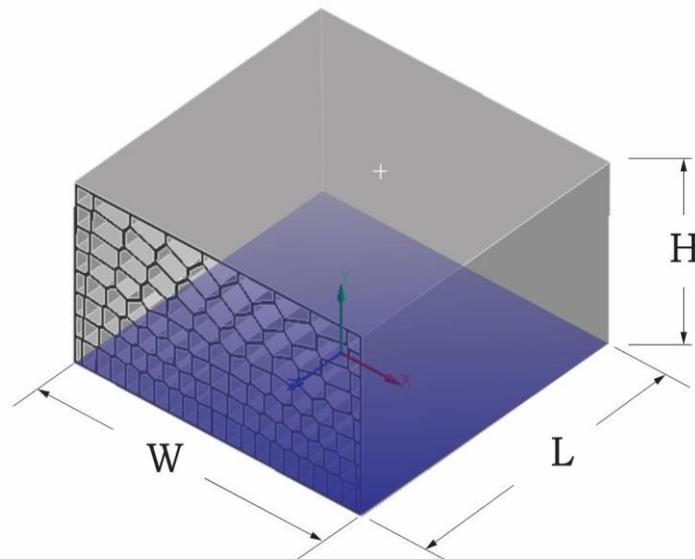
2. Metodología

2.1 Parámetros geométricos de las estructuras celulares

Las dimensiones generales de altura, ancho y largo de las estructuras celulares diseñadas se establecieron de acuerdo con las especificaciones geométricas de la norma técnica ASTM D3763 (ASTM, 2003), la cual establece que la dimensión lateral mínima debe aproximarse a 83 mm, y la altura no debe variar de espécimen a espécimen con el fin de imprimir siempre la misma energía durante el impacto. La Figura 1 muestra un esquema de la probeta, al tiempo que ilustra el sistema de coordenadas cartesianas posicionado en el centro del plano inferior del panel celular. Por su parte, las dimensiones anteriormente referenciadas se muestran en la Tabla 1.

Figura 1

Esquema general de la probeta



Nota. Dimensiones aproximadas de largo (L), alto (H) y ancho (W) de las diferentes muestras diseñadas de acuerdo con la norma técnica ASTM D3763.

Tabla 1*Dimensiones generales aproximadas de las estructuras celulares*

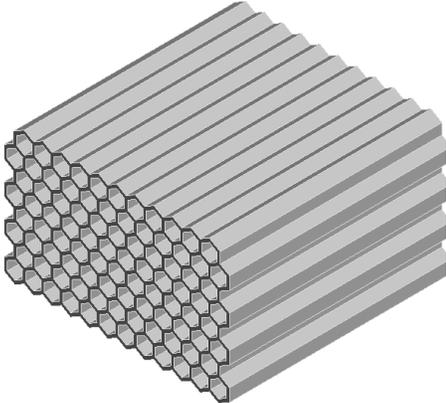
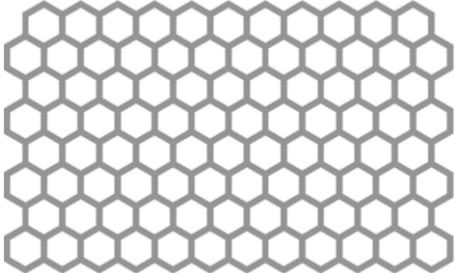
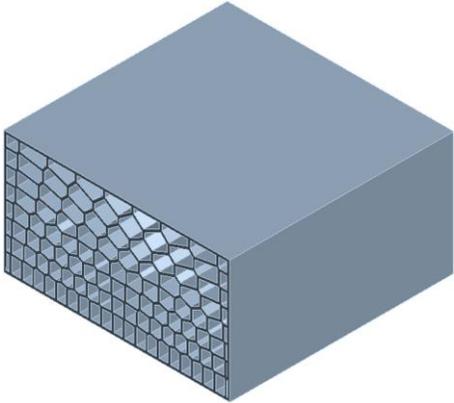
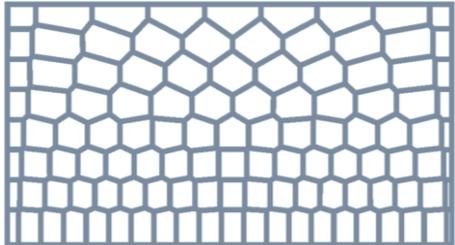
Ancho (W)	Largo (L)	Alto (H)
83 mm	83 mm	48 mm

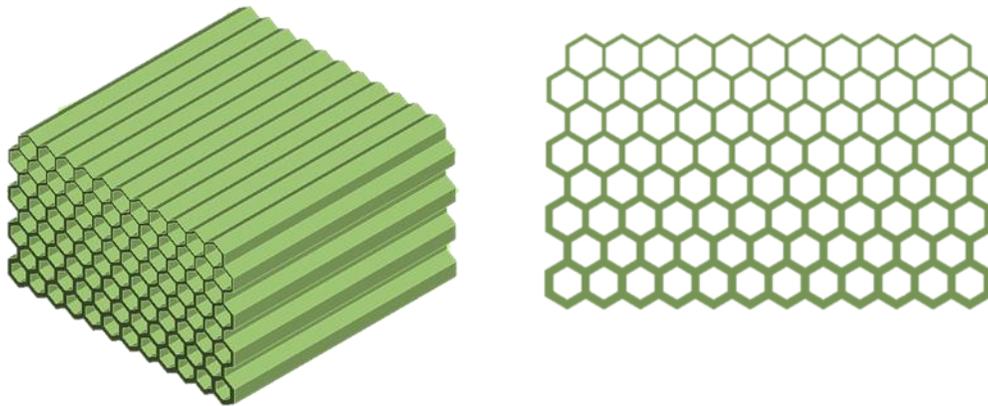
Nota. Esta tabla muestra las dimensiones cuboidales de las estructuras celulares.

Se habla de dimensiones aproximadas debido a que el presente estudio se centra en el análisis de estructuras celulares con clasificación funcional (de las cuales se detalla posteriormente), lo que obliga en algunos casos a pequeñas variaciones en las dimensiones generales de ancho y alto de la muestra debidos a cambios de espesor en las celdas unitarias. Sin embargo, dichos cambios de longitud no son significativos, por lo que puede entonces asumirse que la altura de las estructuras se mantiene.

Definida la geometría general de la probeta, se plantearon diferentes tipos de estructuras celulares como se muestra en la Tabla 2, las cuales fueron esbozadas según las tres variables de diseño independientes: densidad relativa, tipo de celda unitaria y el tipo de graduación. Las densidades relativas de las estructuras fueron obtenidas mediante la relación existente entre la masa de la probeta y el volumen cuboidal del cuerpo, sobre la densidad del material del que está hecho el filamento utilizado en las impresiones 3D, es decir, el Nylon. Se seleccionaron valores de densidad relativa en un rango específico para cumplir con la condición necesaria para que un sólido pueda ser tratado como estructura celular. Por lo cual, para cada tipo de estructura mostrada en la Tabla 2, se diseñaron probetas al 20, 25, 30 y 35% de densidad relativa, obteniendo un total de 12 especímenes a analizar.

Tabla 2*Diseño asistido por computadora de los sólidos celulares*

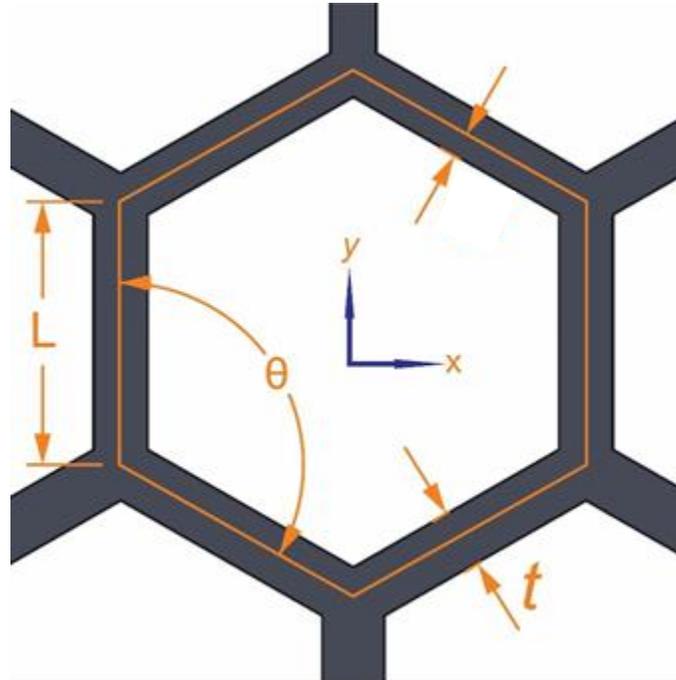
Vista isométrica	Vista Frontal
	
Estructura hexagonal uniforme (sin graduación funcional)	
	
Estructura funcionalmente graduada mediante patrón de Voronoi	



Estructura hexagonal graduada funcionalmente

Nota. Diseño CAD de los 3 tipos de sólidos celulares utilizados en este estudio, realizados en el software comercial SolidWorks.

Se llevó a cabo un análisis detallado de los aspectos más importantes en el proceso de diseño de la estructura hexagonal uniforme, la estructura graduada tipo Voronoi y la graduada tipo hexagonal. La Figura 2 muestra la configuración de la celda unitaria tipo hexagonal, utilizada para el desarrollo de las estructuras hexagonales uniformes y las estructuras hexagonales graduadas. Como se observa, la celda unitaria tiene una longitud de pared $L = 4$ mm, un ángulo entre paredes $\theta = 120^\circ$ y un espesor de pared t , el cual varía dependiendo de la densidad relativa que se esté analizando y de si se trata de una estructura uniforme o con graduación funcional.

Figura 2*Celda unitaria tipo hexagonal*

Nota. Configuración geométrica de una celda unitaria tipo hexagonal definida por la altura (L), el ángulo entre paredes (θ) y el espesor de pared (t).

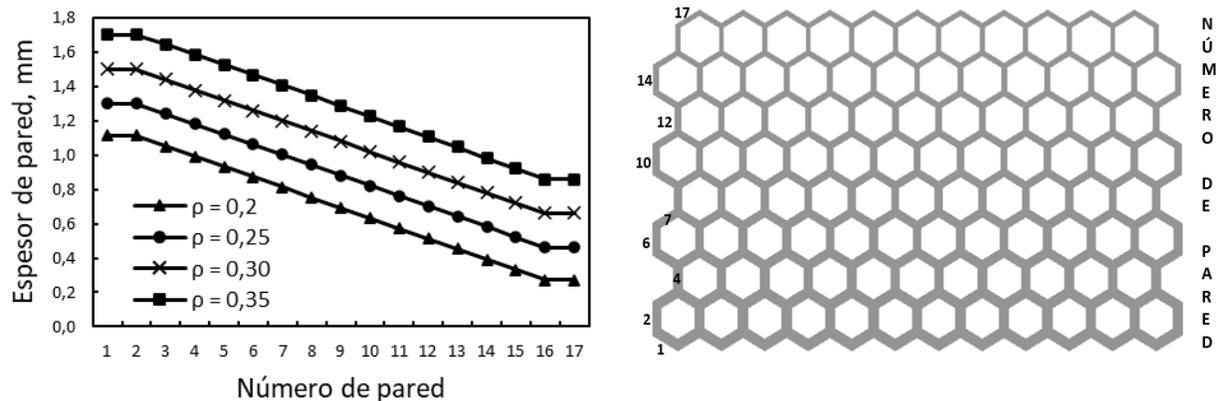
Se incluyen además arquitecturas hexagonales uniformes con el fin de utilizarlas como referencia, y comparar sus resultados frente al desempeño de las estructuras funcionalmente graduadas en cuanto a absorción de energía. El diseño de estas estructuras uniformes resulta sencillo, pues consiste en la adición contigua de celdas unitarias, utilizando el mismo espesor de pared t a lo largo de su geometría.

Por otra parte, las estructuras hexagonales funcionalmente graduadas se diseñaron mediante la variación del espesor de las paredes, de acuerdo con una función polinómica de primer grado de la forma $t = -0,6 * n + b$, en donde t es el espesor de pared, n es el número de pared y b es un término que depende de parámetros geométricos que determinan la densidad

relativa de la arquitectura celular. Es así como los espesores disminuyen conforme aumenta el número de pared o la altura. En la Figura 3 se muestra el gráfico espesor de pared vs número de pared.

Figura 3

Espesor de pared vs número de pared para estructuras hexagonales graduadas funcionalmente

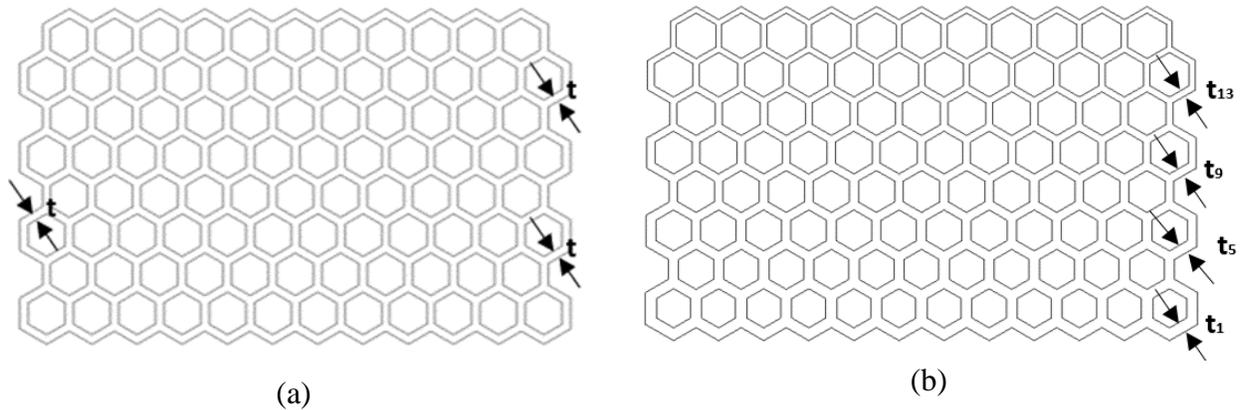


Nota. (a) gráfico espesor de pared vs número de pared para estructuras hexagonales graduadas funcionalmente y (b) numeración de las paredes de la estructura hexagonal.

En la Figura 4 se muestra una comparación entre la estructura hexagonal uniforme (sin graduación) y la estructura hexagonal funcionalmente graduada con igual valor de densidad relativa. Se puede notar que, aunque ambas cuentan con el mismo tipo de celda unitaria y el mismo valor de densidad relativa, la distribución de masa es diferente entre una y otra arquitectura.

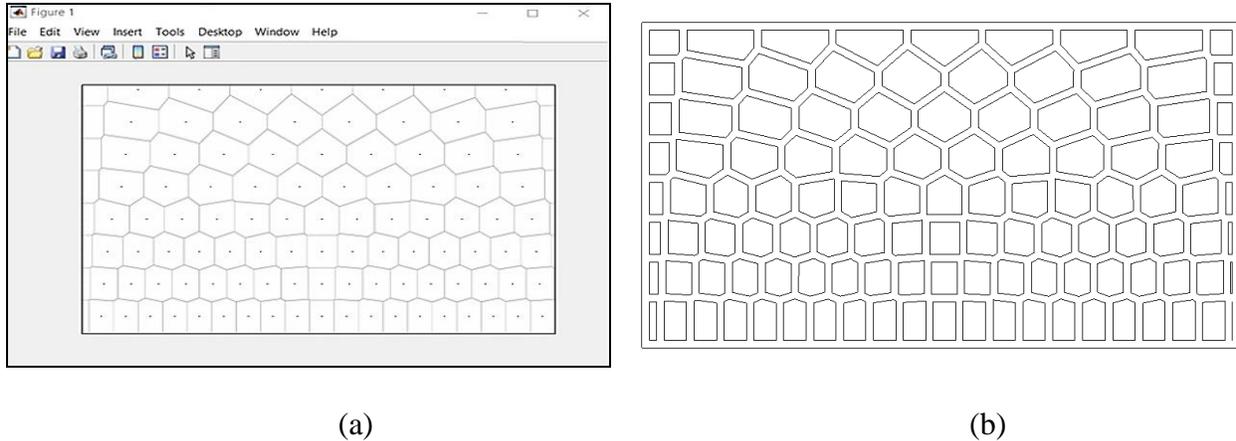
Figura 4

Perfil de las estructuras tipo hexagonal uniforme y graduadas funcionalmente



Nota. Comparación entre el perfil de (a) estructura hexagonal uniforme y (b) estructura hexagonal graduada funcionalmente.

El otro tipo de estructura utilizada en este estudio es la mostrada en la Figura 5, la cual tiene una geometría irregular construida a partir de una teselación de Voronoi. Se generan puntos distribuidos gradualmente, a partir de los cuales se divide el espacio en regiones de tal manera que las líneas minimizan la distancia Euclidiana al punto centro de la célula. En este tipo de sólidos, el concepto de graduación funcional se implementa mediante variaciones en el tamaño y forma de la célula, manteniendo siempre el mismo espesor de pared. Este patrón se realizó mediante la generación de un código en Matlab (Figura 5a), con el cual se obtuvo el diseño preliminar para la elaboración del croquis en el software de diseño asistido por computadora SolidWorks (Figura 5b).

Figura 5*Diseño de la arquitectura tipo Voronoi*

Nota. (a) Patrón de Voronoi generado mediante código en lenguaje de Matlab (b) Perfil de la estructura Voronoi diseñado en el entorno de SolidWorks.

2.2 Propiedades del material

El Nylon es uno de los termoplásticos más ampliamente utilizados en la industria de manufactura aditiva. Es un polímero que surge como resultado de la reacción de dos unidades o monómeros, una amina y un cloruro de ácido. En la Tabla 3 se muestran las propiedades de los filamentos de Nylon que se utilizan como material de aporte en la fabricación de las muestras, y definidas para el análisis numérico. En el Apéndice a se muestra el proceso de validación de ensayo de tracción mediante el cual se obtuvieron las propiedades mecánicas del material.

Tabla 3*Propiedades físicas y mecánicas del Nylon*

Propiedad	Magnitud
Módulo de Young	739 GPa
Esfuerzo a la fluencia	33 MPa

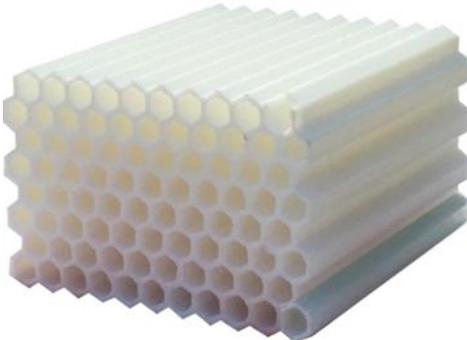
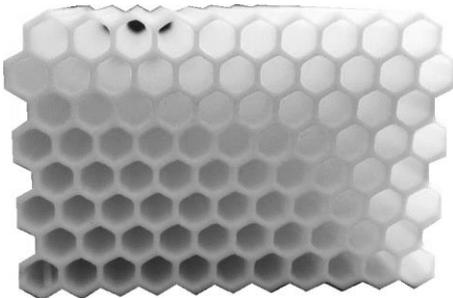
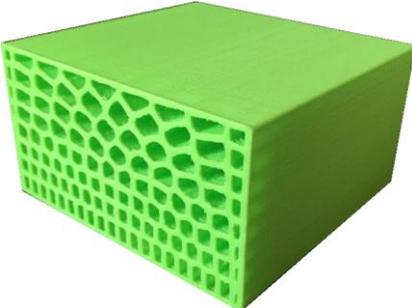
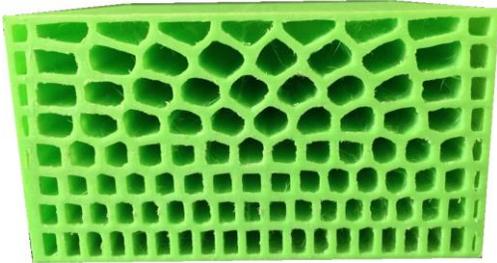
Coefficiente de Poisson	0,39
Densidad	1150 kg/m ³
Elongación a la rotura	130%

2.3 Manufactura de las estructuras celulares

El Diseño Asistido por Computadora (CAD) de todas las estructuras celulares se realizó mediante el software SolidWorks. Sin embargo, solo una parte de ellas, las correspondientes a las muestras del 30% de densidad relativa, fueron las que se fabricaron mediante AM para evaluar la manufacturabilidad de los diseños realizados. Esto con el fin de constatar la viabilidad de la fabricación de las probetas para futuras pruebas experimentales que permitan obtener una serie de resultados que sirvan de comparación y evaluación de la precisión de las predicciones obtenidas mediante el modelo de elementos finitos para el comportamiento de estas ante la presencia de cargas de impacto.

Se realizó el proceso de manufactura aditiva bajo la técnica de modelado por deposición fundida FDM, la cual consiste en extruir una arquitectura capa por capa, superpuestas entre sí, mediante material fundido, generalmente termoplástico. Para la impresión de las estructuras celulares se utilizaron las impresoras Artillery Sidewinder X1 y Anycubic 4max, con una altura de capa de 0,2 mm. Se utiliza una plataforma de impresión con superficie de cristal de carburo de silicio con revestimiento microporoso, que permite una excelente adherencia del material en la primera capa sin necesidad del uso de lacas. En la Tabla 4 se puede ver el resultado final del proceso de manufactura aditiva de los sólidos celulares.

Tabla 4*Sólidos celulares fabricados mediante manufactura aditiva*

Vista isométrica	Vista Frontal
	
Estructura hexagonal uniforme (sin graduación funcional)	
	
Estructura funcionalmente graduada mediante patrón de Voronoi	
	
Estructura hexagonal graduada funcionalmente	

Nota. Las estructuras celulares fueron fabricadas mediante el método 3D de modelado por deposición fundida FDM.

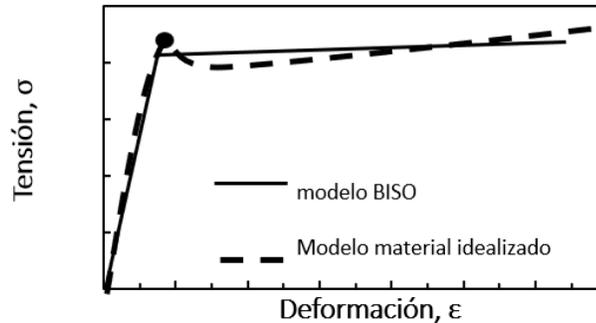
2.4 Método numérico

Se utilizó el software ANSYS Workbench 2020R1 para el análisis de las estructuras celulares funcionalmente graduadas mediante el método de los elementos finitos. Se utilizó un modelo de dinámica explícita por la naturaleza física de los fenómenos que se presentan durante un impacto, y que implica no solamente grandes desplazamientos y deformaciones en cortos períodos de tiempo, sino también no linealidades asociadas al material y contactos complejos. El método explícito para la integración en el tiempo puede ofrecer mayor precisión y eficiencia en simulaciones de impacto entre dos estructuras (Celik, 2017).

La definición del modelo de material dentro del programa ANSYS Workbench 2021R1 se realizó en el módulo denominado Engineering Data. Se creó el material Nylon 6, al cual se le estableció un modelo aproximado a elasto-perfectamente plástico a través de la opción Bilinear Isotropic Hardening (BISO). Es importante seleccionar un modelo material adecuado para el análisis FEM puesto que de esto dependerá la convergencia con la prueba realizada en el modelo real. De acuerdo con lo anterior, se justifica en cierta manera la prevalencia que tiene un modelo sencillo como el elasto-perfectamente plástico sobre otros modelos de mayor complejidad empleados en los materiales poliméricos como el Multilinear Isotropic Hardening, debido a su practicidad y cercanía con el modelo real, como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6

Curva característica de Tensión deformación para el Nylon



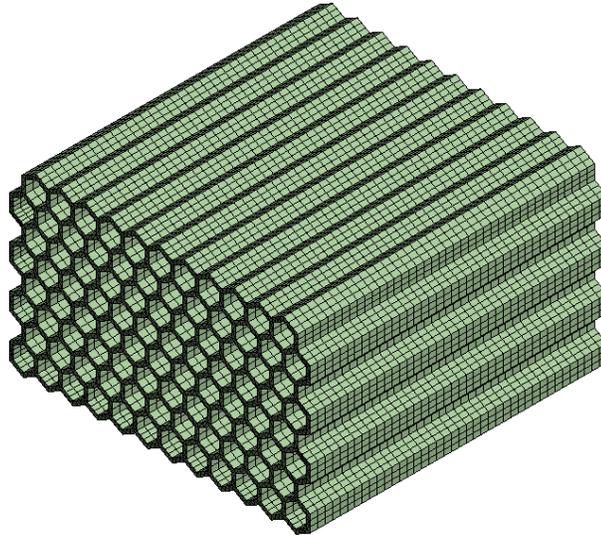
Nota. Gráfica comparativa de curva esfuerzo vs deformación entre el comportamiento real del Nylon y modelo simplificado elasto-perfectamente plástico.

Como fue mencionado en el apartado 2.3, el Diseño Asistido por Computadora se generó desde SolidWorks, y por tanto el componente Geometry del sistema Explicit Dynamics se importó como un archivo con extensión IGES desde este software. Adicionalmente, al archivo importado no se le realizaron modificaciones desde ninguno de los editores que ANSYS Workbench dispone para este fin.

El mallado de todas las estructuras celulares se llevó a cabo con el método MultiZone y con mapeo de malla tipo Prism, definiendo un tamaño del elemento de 0,0025 m, mientras que el impactador rígido fue mallado utilizando el método de refinamiento local body sizing, en donde el tamaño del elemento fue de 0,008 m y su tipo de elemento fue tetraedro. La Figura 7 muestra una de las estructuras celulares de este estudio con su respectivo mallado. El modelo fue sujeto a un estudio de independencia de malla en el modelo dinámico explícito con el fin de garantizar que los resultados convergen en el rango asintótico.

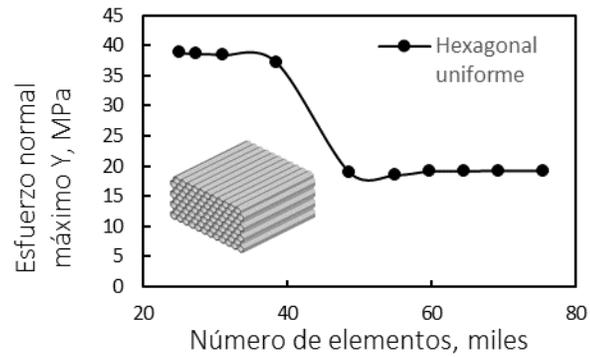
Figura 7

Mallado de la estructura celular

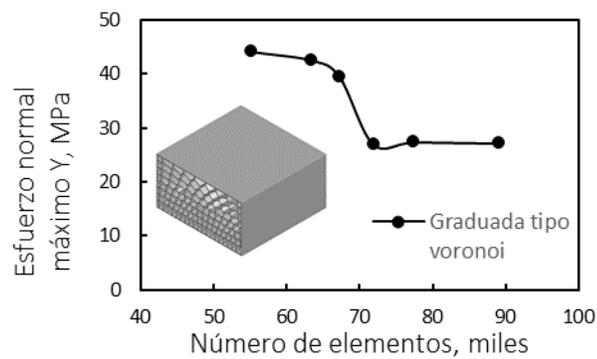


Nota. Mallado de las estructuras celulares en software ANSYS Workbench a través del método MultiZone y mapeo de malla tipo “prism”

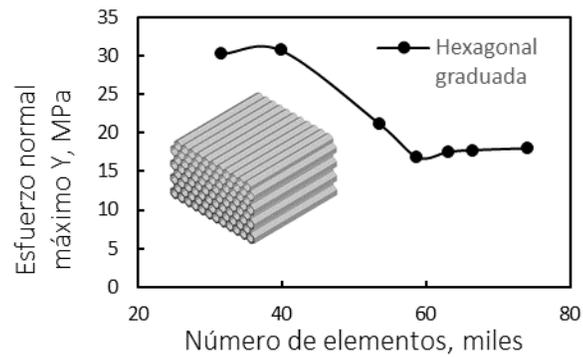
La Figura 8 muestra las curvas de número de elementos vs esfuerzo normal máximo para algunas de las topologías utilizadas en esta investigación. Es posible apreciar el punto a partir del cual un aumento significativo en el número de elementos no representa un cambio considerable en la magnitud física evaluada, por lo que es posible afirmar que dicho punto representa el tamaño del elemento óptimo con el cual se puede alcanzar el menor gasto computacional sin comprometer los resultados requeridos. El tamaño de malla óptima para cada tipo de arquitectura puede cambiar, por lo que se requiere realizar el análisis de convergencia de malla para cada caso en específico.

Figura 8*Convergencia de malla de las estructuras celulares*

(a)



(b)



(c)

Nota. (a) estructuras hexagonales uniformes, (b) estructuras graduadas tipo Voronoi y (c) estructuras hexagonales graduadas funcionalmente.

En cuanto a condiciones iniciales, se asigna una velocidad de 4,4 m/s al indentador de 8 kg de masa, correspondiente a la velocidad que toma el objeto dejado caer desde una altura de 1 metro. Como condición de contorno, se emplea un soporte fijo en la parte inferior de las estructuras, representando el efecto que tendría el sistema de fijación en una prueba experimental según la norma ASTM D3763 (ASTM, 2003).

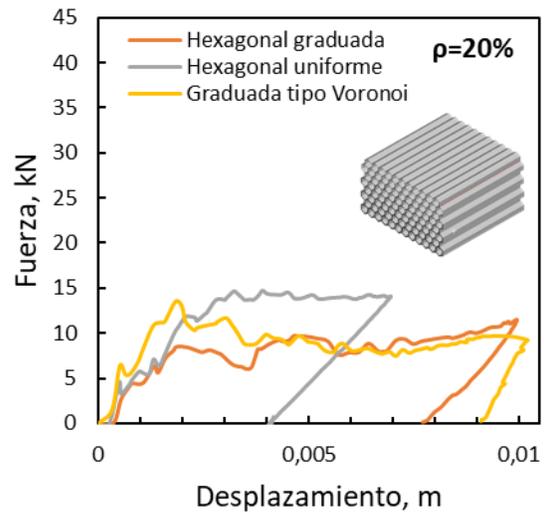
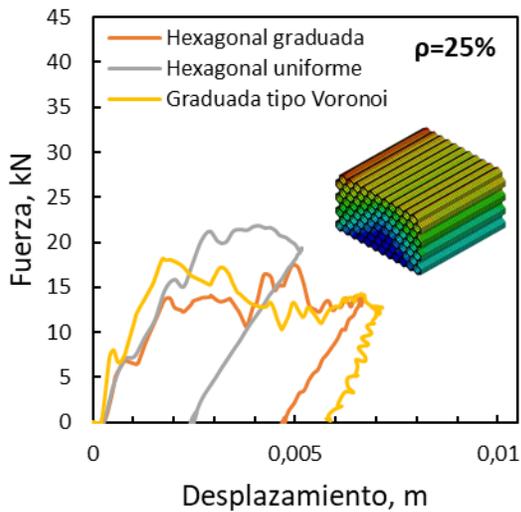
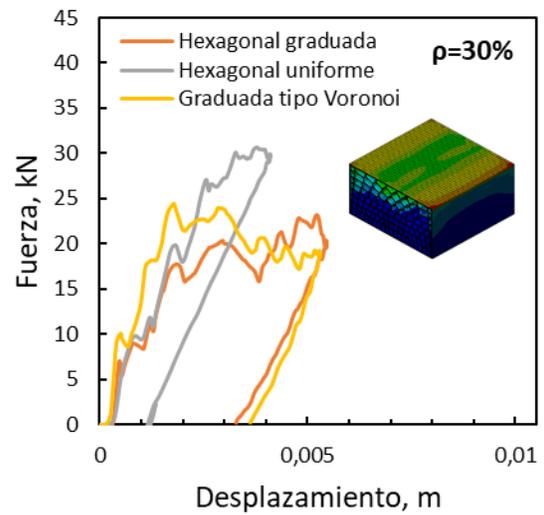
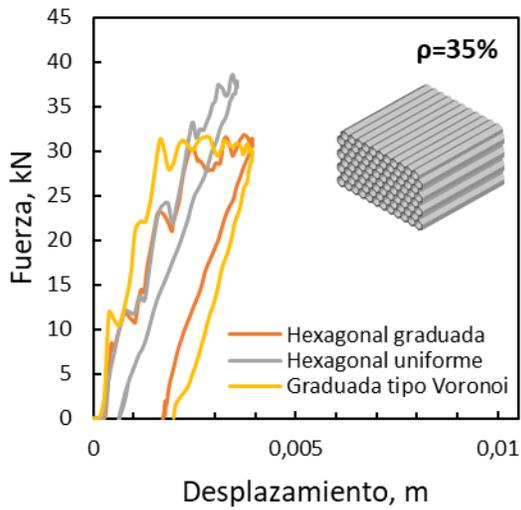
3. Resultados

Se estudiaron los efectos de las topologías, la densidad relativa y el tipo de graduación funcional de las estructuras celulares, haciendo uso del método de elementos finitos (FEM), en los resultados de fuerzas de contacto, desplazamientos, y la energía a las que son sometidas las probetas de ensayo durante la aplicación de una carga de impacto de baja velocidad. En este caso en particular, la energía aplicada sobre las muestras es de 78 J, correspondiente al valor de la energía cinética del indentador de 8 kg al momento del impacto.

La Figura 9 presenta las curvas de fuerza de reacción vs desplazamiento de cada una de las estructuras celulares hexagonales uniformes y funcionalmente graduadas (tipo Voronoi y hexagonal) para cada una de las cuatro densidades relativas seleccionadas. La gráfica fuerza vs desplazamiento resulta de gran interés considerando que, teóricamente, el área bajo la curva es una medida de la capacidad de absorción de energía del cuerpo durante la aplicación de fuerzas debido a cargas de impacto. Los resultados muestran que, la topología en conjunto con la graduación funcional, tienen influencia directa en la magnitud de la fuerza de reacción.

Figura 9

Fuerza vs desplazamiento para estructuras hexagonales uniformes y estructuras graduadas tipo Voronoi y graduada tipo hexagonal



Nota. Fuerza vs desplazamiento para estructuras hexagonales uniformes y estructuras graduadas tipo Voronoi y graduada tipo hexagonal a densidades relativas de (a) 35%, (b) 30%, (c) 25% y (d) 20%.

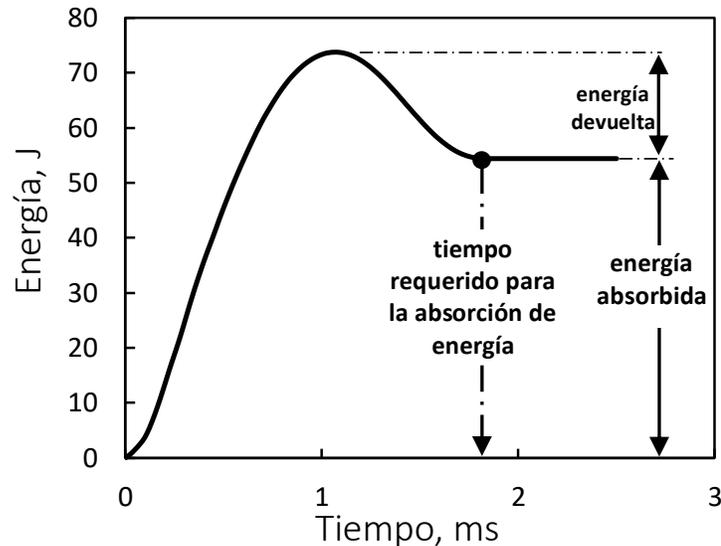
Como se puede observar en la Figura 9, las estructuras hexagonales uniformes son las que presentan, para cada una de las densidades relativas estudiadas, el valor más alto en la fuerza de reacción. Aunque las diferencias en las fuerzas de reacción entre las dos estructuras FG son pequeñas, las estructuras hexagonales graduadas funcionalmente, son las que exhiben las fuerzas de reacción más bajas, dejando a las estructuras graduadas tipo Voronoi en rangos intermedios de fuerzas de reacción.

En general, las estructuras hexagonales uniformes son las que alcanzan también los menores niveles de desplazamientos, comportamiento que se debe a la distribución uniforme de la rigidez a lo largo de toda la estructura, pues mantienen el mismo espesor de pared en todas las celdas unitarias que conforman el sólido. Mientras tanto, la graduación funcional implica variación de la rigidez a lo largo de toda la matriz, siendo las filas superiores las de menor valor.

Los resultados del análisis por elementos finitos permiten obtener de manera detallada información relevante sobre el comportamiento de la energía del sistema conforme avanza en el tiempo. Una revisión minuciosa de esta gráfica facilita la identificación de regiones de interés, tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Gráfica energía vs tiempo de una estructura celular aplicada una carga de impacto

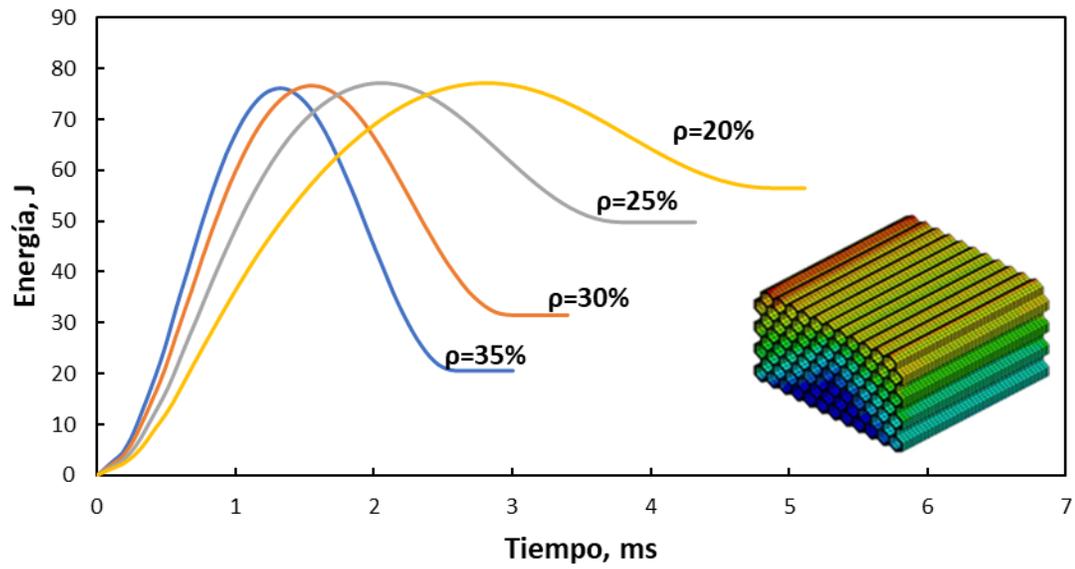


Nota. Identificación de regiones de interés en gráfica energía vs tiempo para estructuras celulares

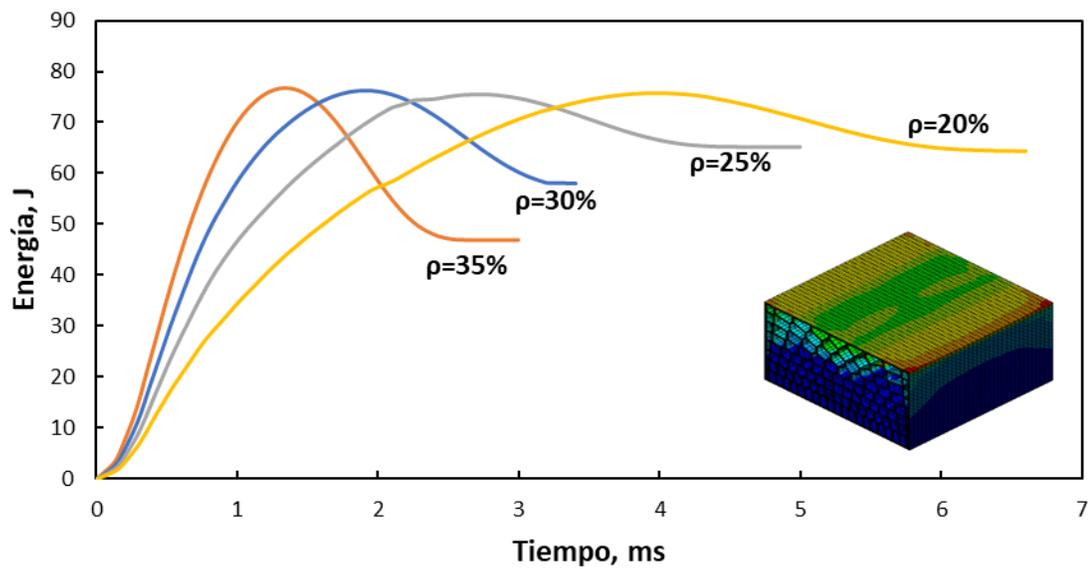
El pico de la función representa la energía máxima durante el impacto, mientras que, conforme avanza el tiempo, se alcanza un punto de estabilización en el que la energía permanece constante. Dicho punto representa la energía absorbida por las estructuras celulares durante la prueba. Por otra parte, la diferencia entre la máxima energía alcanzada y la absorbida, equivale al valor de la energía que las muestras no pudieron absorber como consecuencia de la elasticidad presente en este material. Finalmente, el tiempo transcurrido hasta que el sistema llega al punto de estabilización hace referencia al tiempo que le tomó a la estructura absorber la energía. La Figura 11 brinda una visión detallada de lo mencionado anteriormente para las diferentes arquitecturas celulares con sus respectivas densidades relativas, para la energía de impacto de 78J.

Figura 11

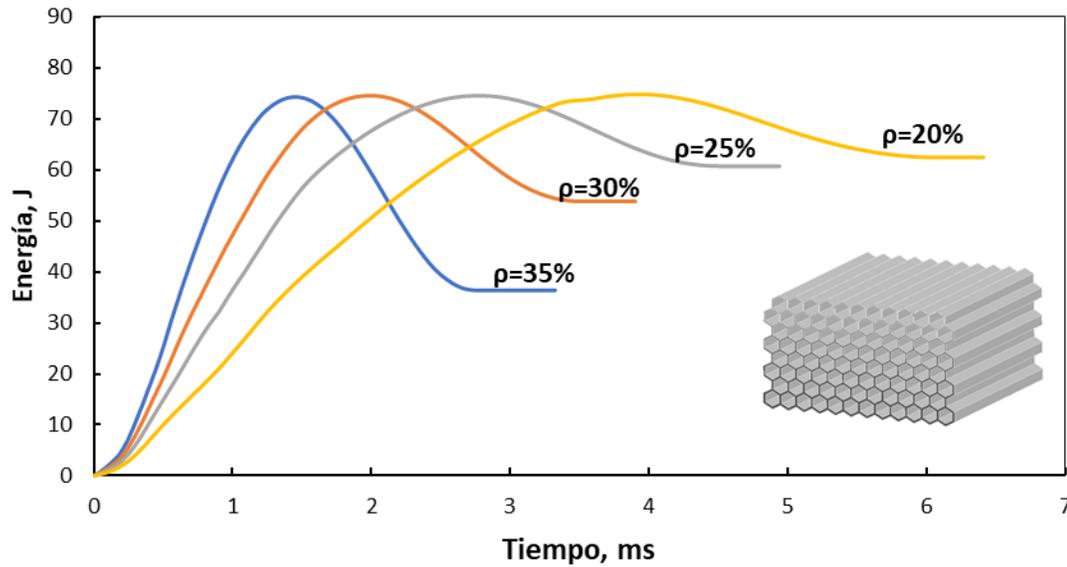
Energía vs tiempo de las estructuras celulares



(a)



(b)



(c)

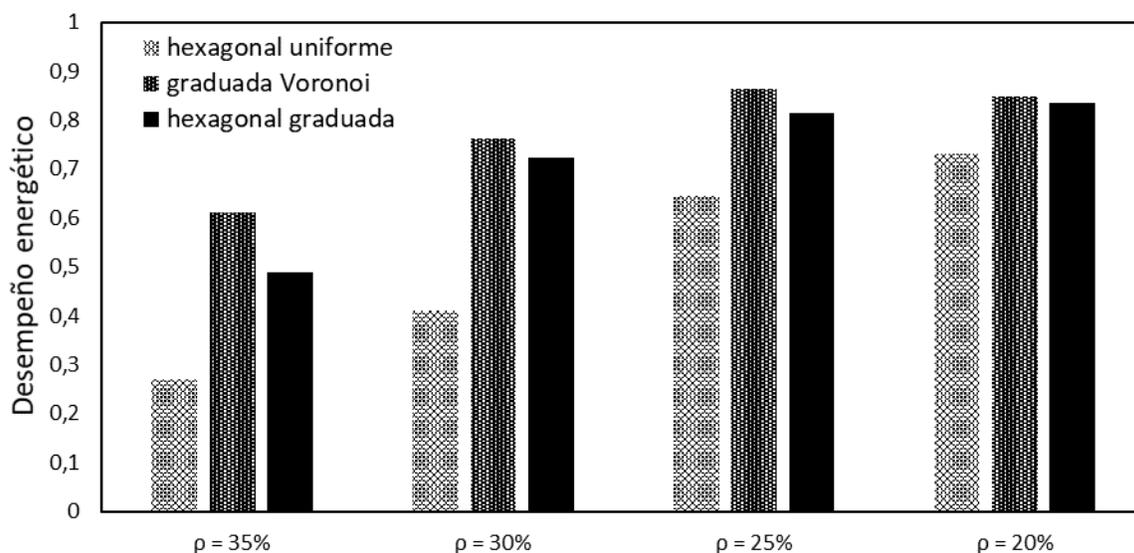
Nota. Energía vs tiempo para (a) estructuras hexagonales uniformes, (b) estructuras graduadas tipo Voronoi y (c) estructuras hexagonales graduadas.

Para la evaluación del rendimiento de las estructuras celulares en cuanto a su capacidad de absorción de energía, en este trabajo se hace uso del concepto de desempeño energético (Yazdani Sarvestani et al., 2018), el cual establece la relación entre la energía absorbida sobre la máxima energía de impacto. En la Figura 12 se muestra una comparación de la capacidad de absorción de energía de 12 estructuras celulares, definidas por el tipo de matriz y por el porcentaje de densidad relativa. Se observa que, en general, las estructuras graduadas tipo Voronoi y estructuras hexagonales graduadas tuvieron mayor capacidad de absorción de energía, obteniendo en algunos casos aumentos mayores al 30% con respecto a las estructuras hexagonales uniformes. Teniendo en cuenta cada una de las densidades relativas analizadas, las estructuras graduadas tipo Voronoi tienen una capacidad de absorción de energía ligeramente mayor a las estructuras hexagonales graduadas funcionalmente, alcanzando la mayor diferencia a

una densidad relativa de 35%, en la cual, la estructura tipo Voronoi presenta un desempeño energético del 60% y la estructura hexagonal graduada de 50%, aproximadamente. En base a lo observado se puede destacar que, para esta prueba en particular, la topología graduada tipo Voronoi al 25% y 20% de densidad relativa tienen los mejores resultados, comparada con las demás estructuras en términos de la capacidad de absorción de energía, con un desempeño aproximado del 85% para ambos casos.

Figura 12

Diagrama comparativo del desempeño energético de las diferentes estructuras celulares



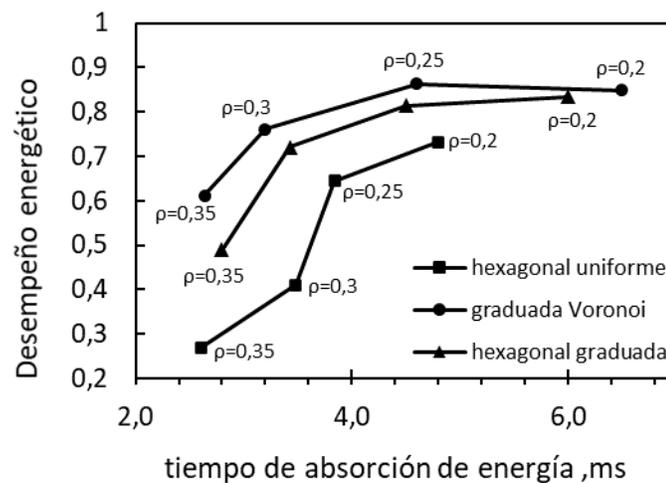
Nota. Diagrama comparativo del desempeño energético de las diferentes estructuras celulares a una energía de impacto de 78J.

En la Figura 13 se muestran las curvas de desempeño energético vs tiempo de absorción de energía para los tres tipos de estructura. En ella se puede observar que, para cualquier topología al aplicar una carga de impacto, la disminución del porcentaje de densidad relativa conlleva a un aumento del desempeño energético de la estructura celular, sin embargo, la

tendencia indica que dicho comportamiento se da hasta cierto punto, a partir del cual una disminución significativa en el porcentaje de densidad relativa no garantiza un aumento en el desempeño energético. Se puede observar también que una disminución de la densidad relativa propicia un aumento en el tiempo requerido para la absorción. La estructura graduada tipo Voronoi al 25% de densidad es la de mayor desempeño energético, con un 86,35% y tiempo de absorción de 4,6 ms, y la estructura hexagonal uniforme al 35% de densidad relativa es la de peor desempeño, con un 26,95% y tiempo de 2,6 ms. El período de tiempo en el que se llevan a cabo estos procesos es tan corto que resulta casi imperceptible, por lo que, para efectos prácticos en una aplicación de absorción de energía, este no constituye el factor determinante a la hora de elegir entre una arquitectura u otra.

Figura 13

Gráfica eficiencia energética vs tiempo requerido para absorber energía



Nota. Gráfica eficiencia energética vs tiempo requerido para absorber energía de las estructuras celulares.

Como resultado de los diversos análisis realizados a las diferentes estructuras celulares, cuando es aplicada una carga de 78 J, se determinó que las estructuras hexagonales funcionalmente graduadas y graduadas tipo Voronoi se encuentran por encima en términos de capacidad de absorción de energía con respecto a las estructuras hexagonales uniformes (no graduada). Sin embargo, la selección del mejor tipo de arquitectura celular puede diferir debido a variaciones en la energía aplicada durante un impacto, por ello, en este estudio se llevó a cabo un análisis comparativo entre diferentes valores de energía. Se seleccionó un rango de estudio de energías de impacto entre 10 J y 70 J, las cuales se obtuvieron manteniendo el mismo impactador de 8 kg, pero modificando la altura de caída de este, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Rango de energías de impacto simuladas

Altura [m]	Velocidad [m/s]	Energía [J]
0,1276	1,581	10
0,2551	2,236	20
0,3827	2,739	30
0,5102	3,162	40
0,6378	3,536	50
0,7653	3,873	60
0,8929	4,183	70
1,00	4,4	78,4

Nota. Cada rango de energía fue aplicado a cada una de las estructuras celulares analizadas.

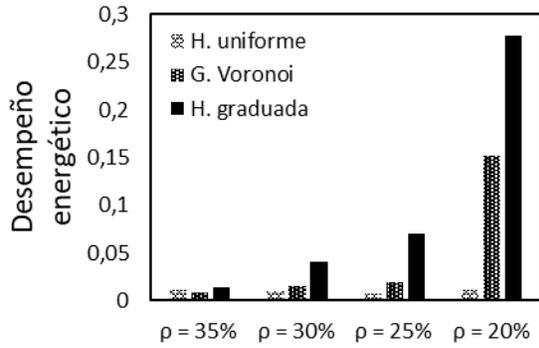
En la Figura 14 se plasman los desempeños energéticos de los sólidos celulares evaluados a diferentes densidades relativas y energías de impacto establecidas en la Tabla 5. De allí se puede inferir que, para bajas energías, como es el caso de 10 J, el desempeño energético de todas las arquitecturas es deficiente, siendo la estructura hexagonal uniforme la peor de todas, cuya capacidad de absorción es casi nula para todas las densidades evaluadas. Por su parte, aunque las estructuras hexagonal y Voronoi funcionalmente graduadas tuvieron mejor comportamiento, no se destacaron por el porcentaje de energía que fueron capaces de absorber, pues en el mejor de los casos, la estructura hexagonal funcionalmente graduada alcanza un desempeño de aproximadamente 28% para la densidad relativa de 0,2, valor que está muy por encima del mejor desempeño de la estructura celular graduada tipo Voronoi, con un 15% para la misma densidad relativa.

Para las energías de impacto intermedias analizadas, como son los casos de 20 J, 30 J y 40 J, se presenta una mejoría en el desempeño de los sólidos celulares funcionalmente graduados, pero los sólidos hexagonales uniformes siguen teniendo mal rendimiento.

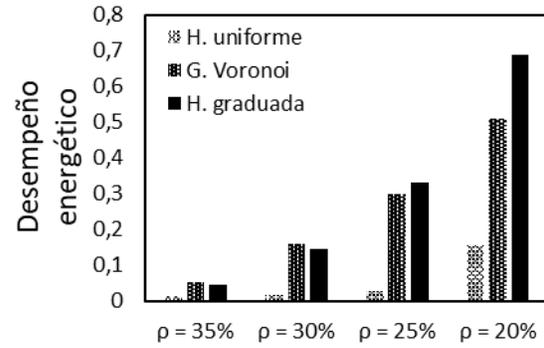
Para el rango comprendido entre 50 J y 78 J, que es el rango más alto de energía aplicado en este estudio, se evidencia un incremento generalizado en la capacidad de absorción de todas las arquitecturas, y específicamente, para 78 J a una densidad relativa del 0,25, se obtiene el mejor resultado de absorción de energía del estudio, con un desempeño del 86% en la estructura graduada tipo Voronoi, estando por delante de los mejores resultados de las estructuras hexagonal uniforme y hexagonal graduada, los cuales se dieron también a 78 J pero con densidad relativa de 0,2, con desempeños energéticos de 73 y 83%, respectivamente.

Figura 14

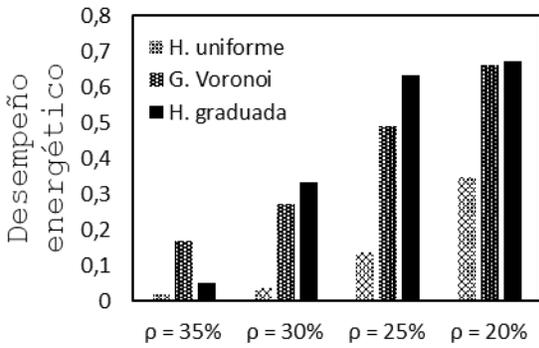
Eficiencias energéticas a diferentes energías de impacto



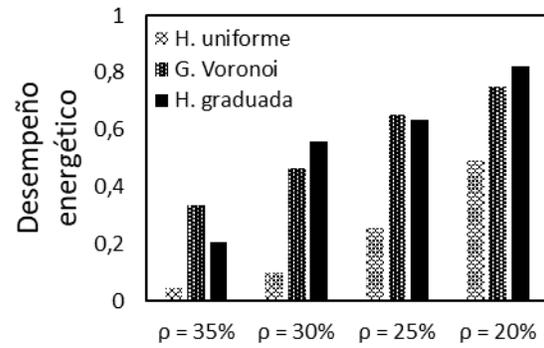
(a)



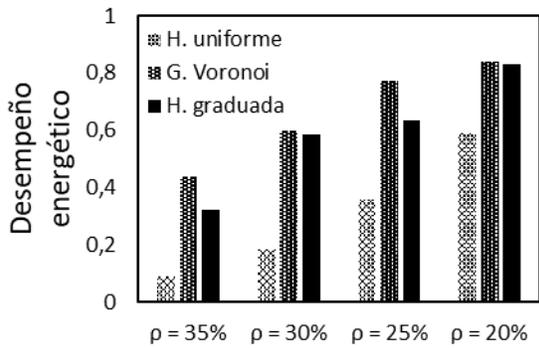
(b)



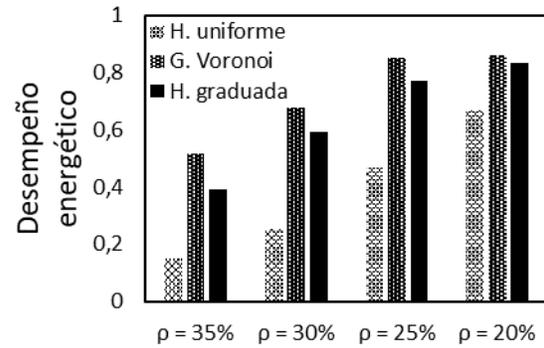
(c)



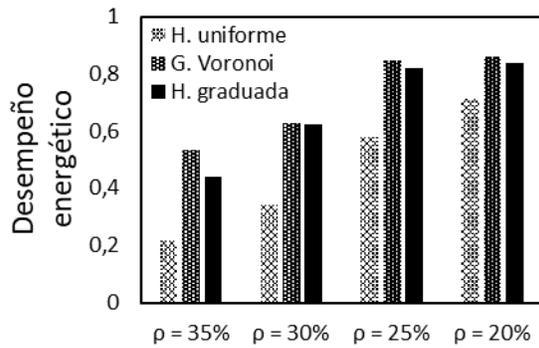
(d)



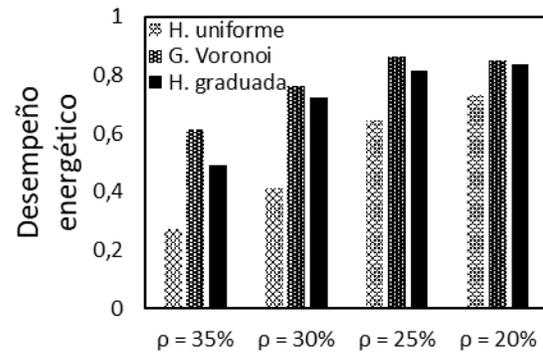
(e)



(f)



(g)



(h)

Nota. Eficiencias energéticas a energías de impacto de (a) 10J, (b) 20J, (c) 30J, (d) 40J, (e) 50J, (f) 60J, (g) 70J y (h) 78J.

En el Apéndice b se muestra el historial de energías para todas las densidades relativas de las estructuras celulares funcionalmente graduadas, quienes mostraron los mejores desempeños para todo el rango de energías aplicado.

Para futuras aplicaciones una clasificación cualitativa de acuerdo con el desempeño energético de las diferentes arquitecturas, en un rango de energías de impacto, ayudaría en el proceso de selección del tipo de geometría que se debería implementar, así como de la densidad relativa que mejor se amolde a los requerimientos. Es por ello, que se implementó el modelo presentado en la Figura 15.

Figura 15*Clasificación cualitativa del desempeño energético*

CALIFICACIÓN		DESEMPEÑO
E	Excelente	90 - 100
MB	Muy bueno	80-90
B	Bueno	60-80
R	Regular	40 - 60
M	Malo	15 - 40
MM	Muy malo	0 -15

En la Figura 16 se muestran los resultados de la calificación cualitativa. Se puede inferir que hay una clara tendencia que muestra que las estructuras funcionalmente graduadas en todos los rangos de energía establecidos, ofrecen la mejor respuesta al impacto, por lo tanto, son recomendables para aplicaciones de este tipo, mientras que las estructuras hexagonales uniformes son preferibles en aplicaciones estructurales en donde la relación peso-resistencia y un cierto nivel de rigidez, es un requerimiento importante.

Figura 16

Resultados de la clasificación cualitativa de las estructuras celulares estudiadas

Energía [J]	Estructura	Densidades relativas			
		0,2	0,25	0,3	0,35
10	H. uniforme	MM	MM	MM	MM
	G. Voronoi	M	MM	MM	MM
	H. graduada	M	MM	MM	MM
20	H. uniforme	M	MM	MM	MM
	G. Voronoi	R	M	M	MM
	H. graduada	B	M	MM	MM
30	H. uniforme	M	MM	MM	MM
	G. Voronoi	B	R	M	M
	H. graduada	B	B	M	MM
40	H. uniforme	R	M	MM	MM
	G. Voronoi	B	B	R	M
	H. graduada	MB	B	R	M
50	H. uniforme	R	M	M	MM
	G. Voronoi	MB	B	R	R
	H. graduada	MB	B	R	M
60	H. uniforme	B	R	M	M
	G. Voronoi	MB	MB	B	R
	H. graduada	MB	B	R	M
70	H. uniforme	B	R	M	M
	G. Voronoi	MB	MB	B	R
	H. graduada	MB	MB	B	R
78,4	H. uniforme	B	B	R	M
	G. Voronoi	MB	MB	B	B
	H. graduada	MB	MB	B	R

Nota. Resultados de la clasificación cualitativa de acuerdo con rangos de desempeño energético para cada tipo de estructura celular a diferentes energías de impacto y diferentes densidades relativas.

4. Conclusiones

Se demostró que las estructuras funcionalmente graduadas son mejores en términos de absorción de energía generadas por cargas de impacto de baja velocidad, en comparación con sólidos celulares uniformes.

El análisis computacional realizado mediante el método de elementos finitos a las diferentes arquitecturas propuestas, mostró una tendencia que indica que entre más alta sea la energía aplicada mayor será el desempeño energético de las estructuras celulares. Por ejemplo, en términos numéricos, para una energía de impacto de 10 J, las topologías funcionalmente graduadas tipo hexagonal y tipo Voronoi tuvieron desempeños energéticos de 27% y 15%, respectivamente, llegando a alcanzar desempeños de 83% y 85% para una energía de 78 J.

Para cualquier cantidad de energía aplicada, todas las topologías absorbieron mayor cantidad de energía conforme disminuyó la densidad relativa, además, lo hicieron con las menores fuerzas de contacto transferidas a la estructura. En este estudio en particular, las estructuras celulares funcionalmente graduadas a una densidad relativa de 20%, absorbieron mayores cantidades de energía a menores fuerzas de contacto, comparado con sus homólogas de 25, 30 y 35%.

Al realizar un análisis comparativo entre las dos geometrías que mejor se desempeñaron durante el estudio, es decir, los sólidos celulares funcionalmente graduados, se llegó a la conclusión que, a bajas energías, la estructura con celda tipo hexagonal ofrece una mejor respuesta en cuanto a absorción de energía de impacto que la geometría tipo Voronoi. Mientras que, al aplicar altas energías de impacto, el desempeño de ambas estructuras es semejante, sin embargo, factores como la dificultad en el diseño y el tiempo de impresión de las estructuras tipo

Voronoi supone un alto costo de manufactura, lo que deja a la geometría tipo hexagonal funcionalmente graduada como la mejor opción en aplicaciones de absorción de energía. Las estructuras uniformes fueron las de peor desempeño en todas las pruebas de impacto realizadas, sin embargo, estos sólidos resultan de gran utilidad en aplicaciones estructurales debido a su excelente relación peso-resistencia y rigidez uniforme.

5. Recomendaciones

Basados en las dificultades presentadas a la hora de obtener los recursos tecnológicos y científicos para realizar una prueba experimental debido a la ausencia de máquinas de testeo de impacto en Colombia, se recomienda la realización de un proyecto de diseño y construcción de este tipo de dispositivo que serviría no solo para validar mediante un modelo realista los resultados obtenidos en esta investigación, sino también para desarrollar conocimiento en esta área.

Para futuras investigaciones dirigidas al estudio de la capacidad de absorción de energía de estructuras celulares funcionalmente graduadas, se recomienda un enfoque principal en la topología de la célula, como por ejemplo en el uso de arquitecturas auxéticas, celdas rectangulares, triangulares, etc., para revisar el alcance que podría tener la geometría en el desempeño energético.

Se recomienda extender los estudios de esta investigación implementando nuevos materiales en las estructuras celulares aprovechando el avance en técnicas de manufactura aditiva en el que se admite el uso de diversos filamentos como el ABS, TPU, PET, filamentos a base de madera, fibra de carbono, entre otros.

Referencias Bibliográficas

- Ashby, M. F. (1983). Mechanical Properties of Cellular Solids. *Metallurgical Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 14 A(9), 1755–1769. <https://doi.org/10.1007/BF02645546>
- Avalle, M., Frascio, M., & Monti, M. (2018). An improved model to describe the repeated loading-unloading in compression of cellular materials. *Procedia Structural Integrity*, 12(January 2018), 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.110>
- Bates, S. R. G., Farrow, I. R., & Trask, R. S. (2019). Compressive behaviour of 3D printed thermoplastic polyurethane honeycombs with graded densities. *Materials and Design*, 162, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.019>
- Casas, B. Y., Carranza, J. C., Béjar, L., Aguilar, C., Figueroa, I. A., & Alfonso, I. (2020). Production of aluminum foams with hierarchical porosity by a combination of two different manufacturing methods. *Journal of Alloys and Compounds*, 831. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154780>
- Celik, H. K. (2017). Determination of bruise susceptibility of pears (Ankara variety) to impact load by means of FEM-based explicit dynamics simulation. *Postharvest Biology and Technology*, 128, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.015>
- Chen, D., Kitipornchai, S., & Yang, J. (2018). Dynamic response and energy absorption of functionally graded porous structures. *Materials and Design*, 140, 473–487. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.019>
- Cheneler, D., & Kennedy, A. R. (2020). A comparison of the manufacture and mechanical performance of porous aluminium and aluminium syntactic foams made by vacuum-assisted

- casting. *Materials Science and Engineering A*, 789(February), 139528.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139528>
- Duraibabu, R. V., Prithvirajan, R., Sugavaneswaran, M., & Arumaikkannu, G. (2020). Compression behavior of Functionally Graded Cellular Materials fabricated with FDM. *Materials Today: Proceedings*, 24, 1035–1041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.417>
- Gibson L., & Ashby M. (1997). *Cellular solids, Structure and properties*. (2da ed.). Cambridge University Press.
- Goel, A., & Anand, S. (2019). Design of functionally graded lattice structures using B-splines for additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 34, 655–665.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.193>
- Guerrero-De-Mier, A., Espinosa, M. M., & Domínguez, M. (2015). Azara: A New 32 bit RepRap with Improved Performance. *Procedia Engineering*, 132, 118–125.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.487>
- Han, C., Li, Y., Wang, Q., Wen, S., Wei, Q., Yan, C., Hao, L., Liu, J., & Shi, Y. (2018). Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 80(January), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.01.013>
- Hohe, J., Hardenacke, V., Fascio, V., Girard, Y., Baumeister, J., Stöbener, K., Weise, J., Lehmhus, D., Pattofatto, S., Zeng, H., Zhao, H., Calbucci, V., Rustichelli, F., & Fiori, F. (2012). Numerical and experimental design of graded cellular sandwich cores for multi-functional aerospace applications. *Materials and Design*, 39, 20–32.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.043>
- Lucero, M., Villagómez, Q., Castro, R. R., Alejandro, L., & Caracheo, A. (2018). Desarrollo y

- experimentación numérica de comportamiento mecánico de estructuras celulares FG. *Pistas Educativas Vol. 40*(130), 1830–1850. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2016-120613261600-203
- American Society for Testing and Materials. (2003). *Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement sensors*. (ASTM D3763-18). <https://doi.org/10.1520/D3763-18.2>
- Mohsenizadeh, S., Alipour, R., Ahmad, Z., & Alias, A. (2016). Influence of auxetic foam in quasi-static axial crushing. *International Journal of Materials Research*, *107*(10), 916–924. <https://doi.org/10.3139/146.111418>
- Nazir, A., Abate, K. M., Kumar, A., & Jeng, J. Y. (2019). A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *104*(9–12), 3489–3510. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04085-3>
- Niknam, H., & Akbarzadeh, A. H. (2020). Graded lattice structures: Simultaneous enhancement in stiffness and energy absorption. *Materials and Design*, *196*, 109129. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109129>
- Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D., & Ashcroft, I. (2018). Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, *19*, 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.008>
- Qi, D., Lu, Q., He, C. W., Li, Y., Wu, W., & Xiao, D. (2019). Impact energy absorption of functionally graded chiral honeycomb structures. *Extreme Mechanics Letters*, *32*, 100568. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100568>
- Rahman, O., & Koohbor, B. (2020). Optimization of energy absorption performance of polymer

- honeycombs by density gradation. *Composites Part C: Open Access*, 3(October), 100052. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100052>
- Shen, C. J., Lu, G., & Yu, T. X. (2014). Investigation into the behavior of a graded cellular rod under impact. *International Journal of Impact Engineering*, 74, 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.02.015>
- Shokri Rad, M., Hatami, H., Alipouri, R., Farokhi Nejad, A., & Omidinasab, F. (2019). Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures. *Mechanics and Industry*, 20(3). <https://doi.org/10.1051/meca/2019019>
- Smardzewski, J., & Kramski, D. (2019). Modelling stiffness of furniture manufactured from honeycomb panels depending on changing climate conditions. *Thin-Walled Structures*, 137(December 2018), 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.019>
- Smith, B. H., Szyniszewski, S., Hajjar, J. F., Schafer, B. W., & Arwade, S. R. (2012). Erratum: Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties (Journal of Constructional Steel Research (2012) 71 (1-10)). *Journal of Constructional Steel Research*, 72, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.02.001>
- Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., & Hermenean, K. (2018). 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. *Composite Structures*, 200, 886–909. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.002>
- Zhang, X., & Zhang, H. (2013). Optimal design of functionally graded foam material under impact loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 68, 199–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.01.016>

Apéndices

Apéndice a. Validación de curva tensión-deformación a través de método numérico

Se validó el modelo material seleccionado en el Engineering Data del software Ansys Workbench simulando el ensayo de tracción sobre muestras diseñadas bajo los parámetros señalados en la norma técnica ASTM D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics). En la figura A1 se muestra el modelo CAD generado en el complemento DesignModeler que Ansys Workbench dispone para este fin. Se realizó comparación entre los resultados obtenidos en el modelo numérico con los resultados de una prueba real encontrada en la literatura a través de la curva tensión-deformación como se muestra en la Figura A2. Se puede observar que existe gran concordancia entre los resultados obtenidos en la simulación y el método experimental.

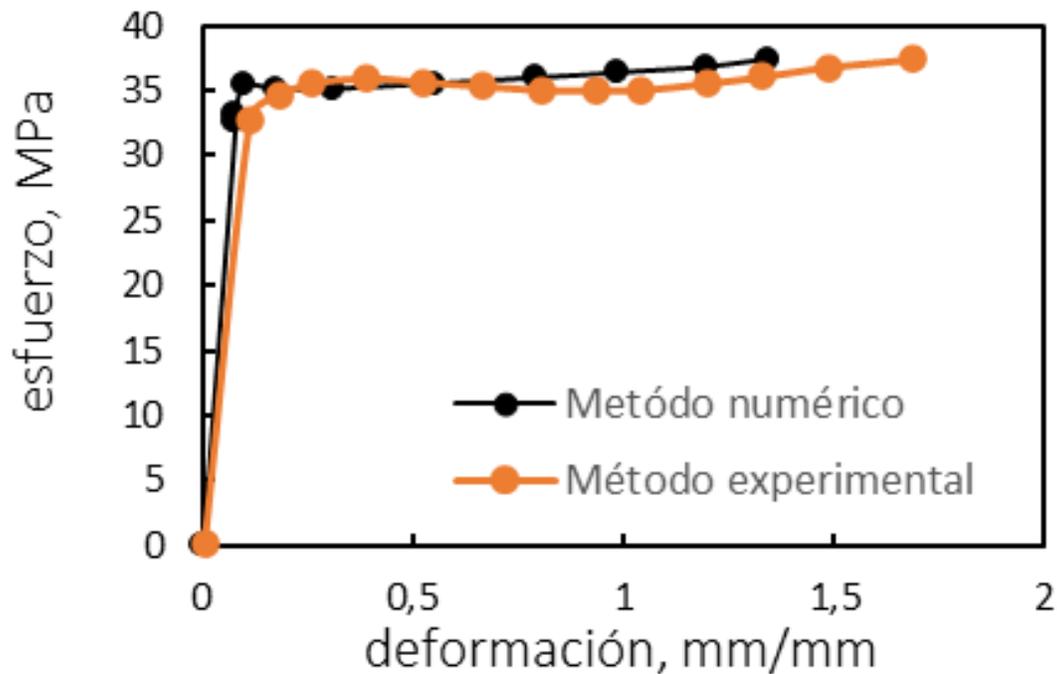
Figura A1

Probeta para validación del ensayo de tracción



Figura A2

Comparación de curvas esfuerzo vs deformación

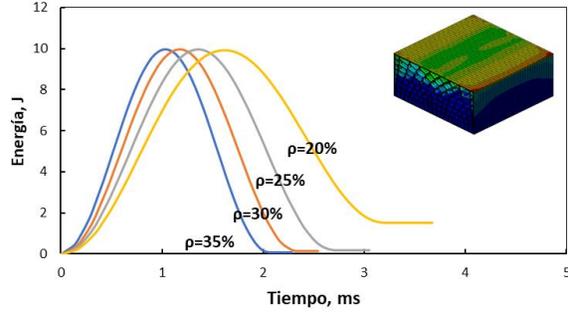
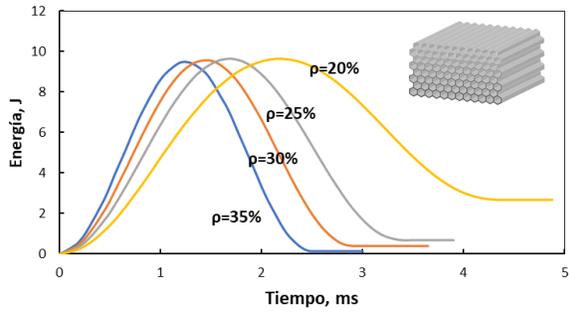


Apéndice b. Curvas de energía vs tiempo para el rango de energías evaluado

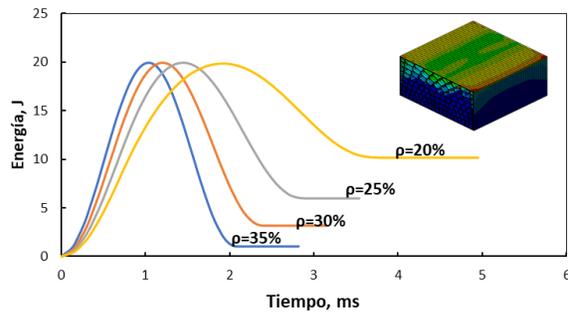
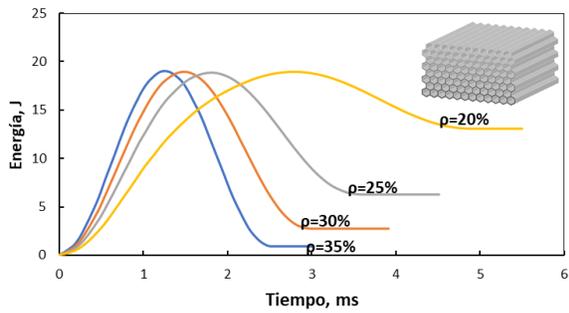
La figura B1 muestra las gráficas de energía vs tiempo de las estructuras celulares funcionalmente graduada tipo hexagonal y tipo Voronoi, ya que fueron las topologías con los mejores resultados de absorción de energía. En la columna de la izquierda se encuentran las estructuras graduadas tipo hexagonal para cada porcentaje de densidad relativa y para cada energía de impacto aplicada. De igual manera, en la columna derecha se encuentran las estructuras graduadas tipo Voronoi.

Figura B1

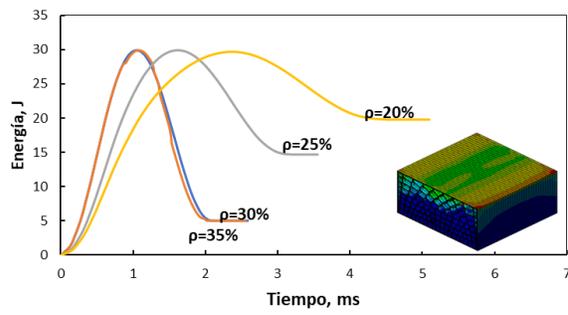
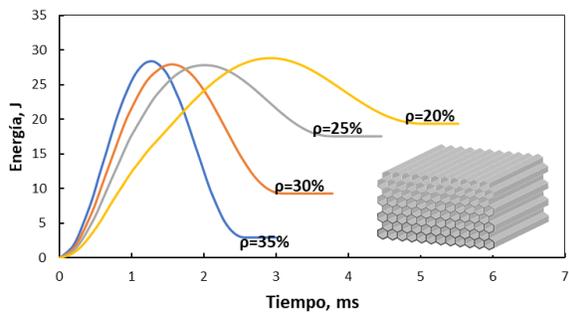
Curvas energía vs tiempo de las energías de impacto aplicadas



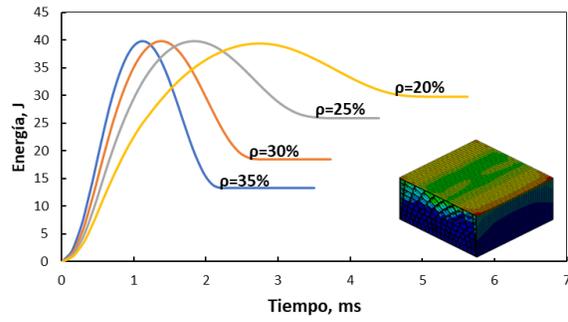
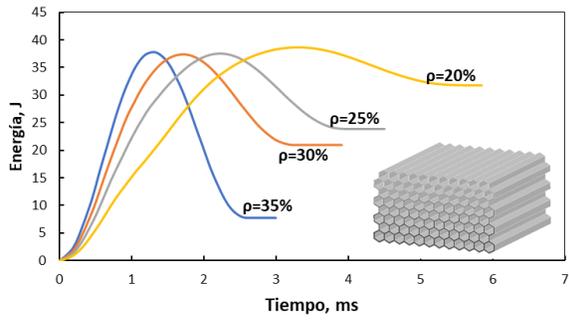
(a)



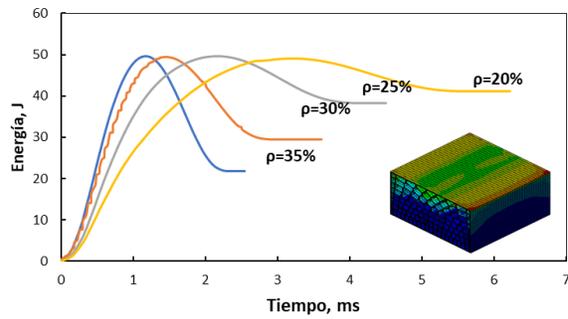
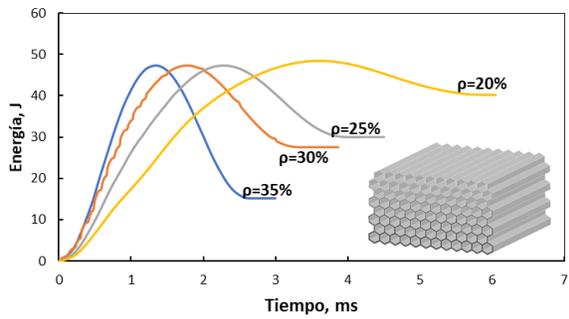
(b)



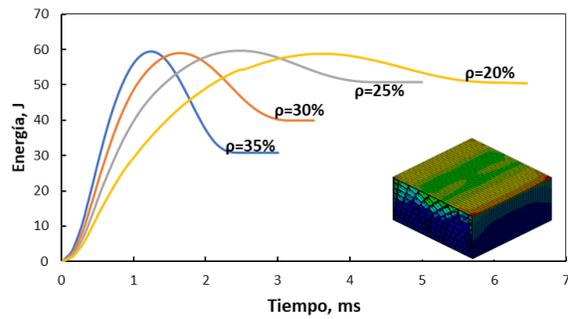
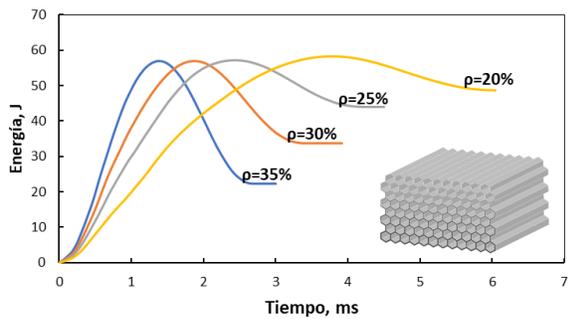
(c)



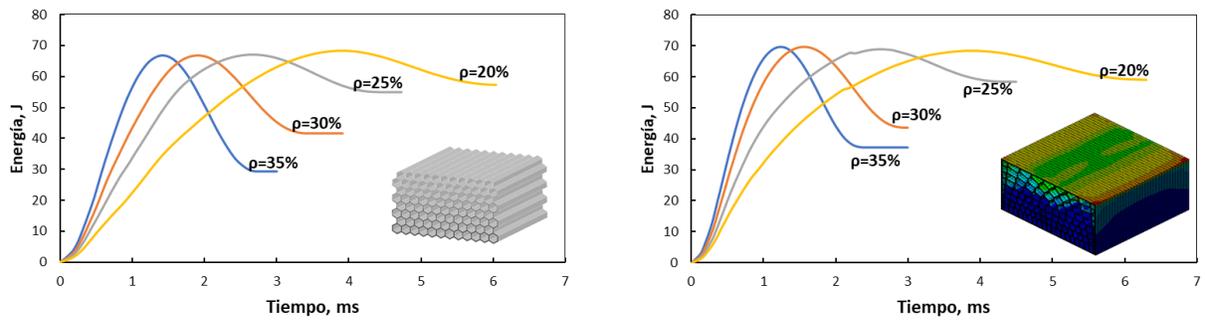
(d)



(e)



(f)



(g)

Nota. (a) 10 J, (b) 20 J, (c) 30 J, (d) 40 J, (e) 50 J, (f) 60 J y (g) 70 J

Apéndice c. Proceso de simulación

La figura C1 muestra las propiedades del material Nylon en el módulo de Engineering Data de ANSYS Workbench. Dentro de los recuadros rojos se encuentran las propiedades que fueron incluidas en el proceso de caracterización del material.

Figura C1

Propiedades mecánicas del Nylon utilizado en las simulaciones

The screenshot displays the ANSYS Workbench Engineering Data interface for a material named Nylon6. The interface is divided into a Toolbox on the left and a Properties table on the right.

Toolbox (Left Panel): Lists various material models. Red boxes highlight the following properties: Density, Linear Elastic, Isotropic Elasticity, Bilinear Isotropic Hardening, and Plastic Strain Failure.

Properties of Outline Row 5: Nylon6 (Right Panel): A table showing the material's properties. The table has columns for Property, Value, and Unit.

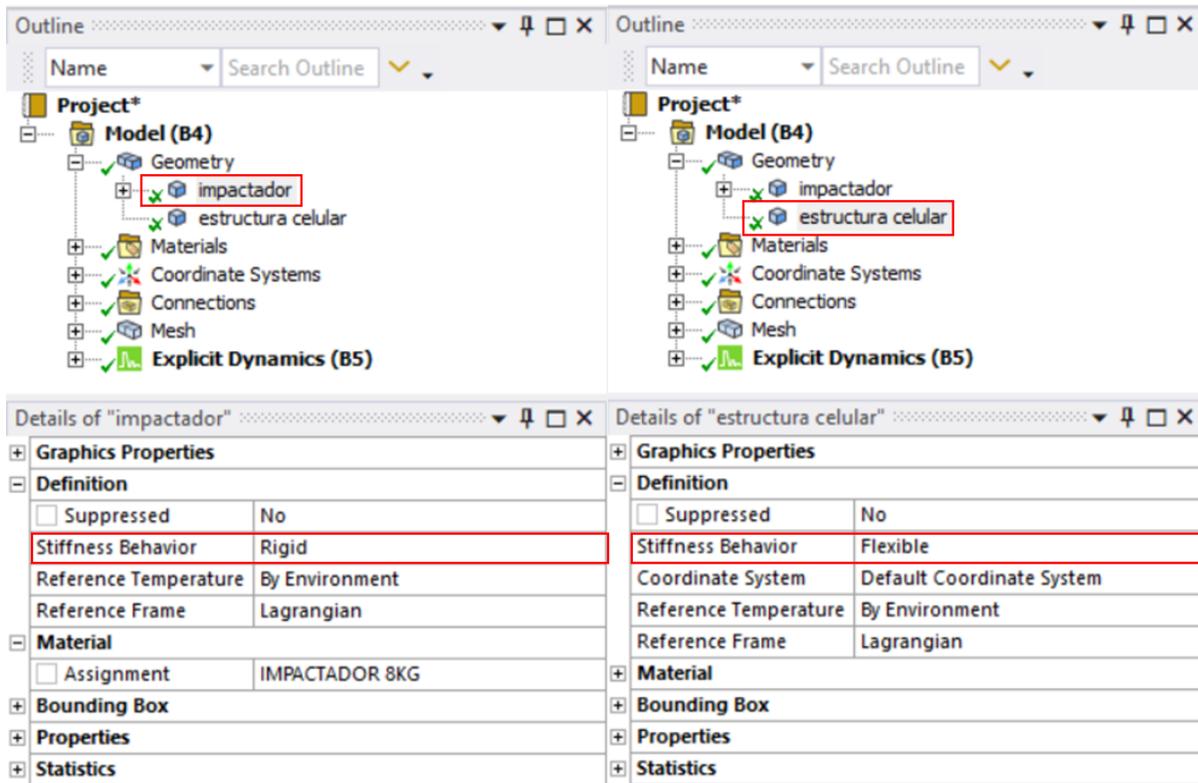
Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	1150	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus ...	
Young's Modulus	7,39E+08	Pa
Poisson's Ratio	0,39	
Bulk Modulus	1,1197E+09	Pa
Shear Modulus	2,6583E+08	Pa
Bilinear Isotropic Hardening		
Yield Strength	3,3E+07	Pa
Tangent Modulus	1,46E+06	Pa
Plastic Strain Failure		
Maximum Equivalent Plastic Strain EPS	1,3	

En la figura C2 se muestra el comportamiento de rigidez que se les asignó a las geometrías implicadas en el impacto. Los recuadros rojos indican la configuración realizada, en

la que al impactador se le asignó un comportamiento rígido y la estructura celular se definió como flexible.

Figura C2

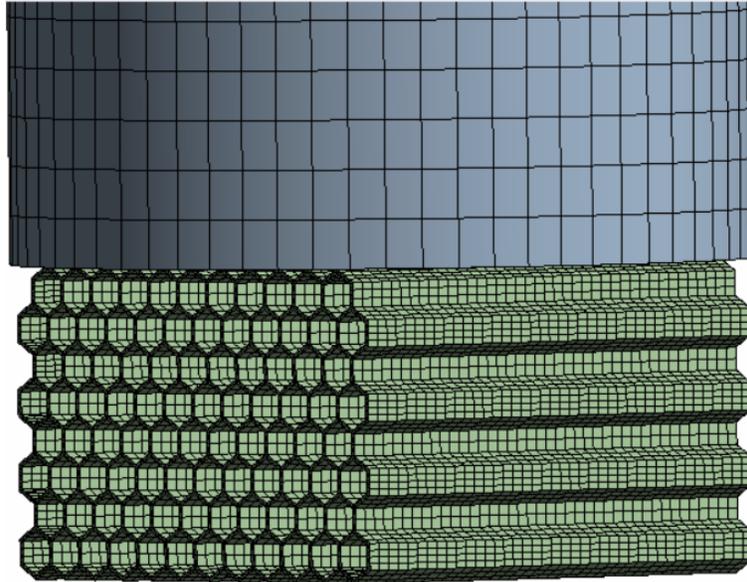
Configuración de la condición de rigidez del impactador y la estructura celular



En la figura C3 se muestra una representación de las mallas realizadas sobre las geometrías involucradas en el impacto. El mallado de las estructuras celulares se muestra en la figura C4, el cual se llevó a cabo con el método MultiZone y con mapeo de malla tipo Prism, definiendo un tamaño del elemento de 0,0025 m. En la figura C5 se muestra la configuración del mallado del impactador rígido, en donde se utilizó el método local body sizing, con tamaño del elemento de 0,008 m y tipo de elemento tetraedro.

Figura C3

Representación del mallado del impactador y la estructura celular

**Figura C4**

Configuración del mallado del impactador

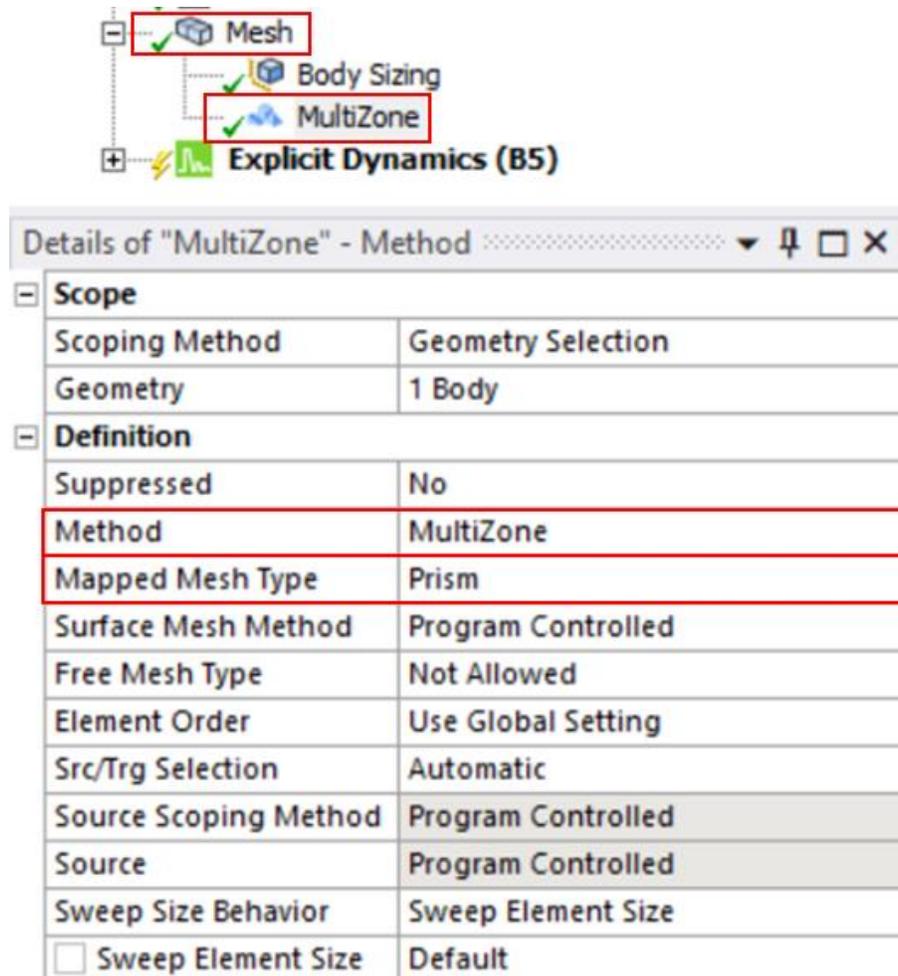
Mesh
 Body Sizing
 MultiZone
 Explicit Dynamics (B5)

Details of "Body Sizing" - Sizing

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	8,e-003 m
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Behavior	Soft

Figura C5

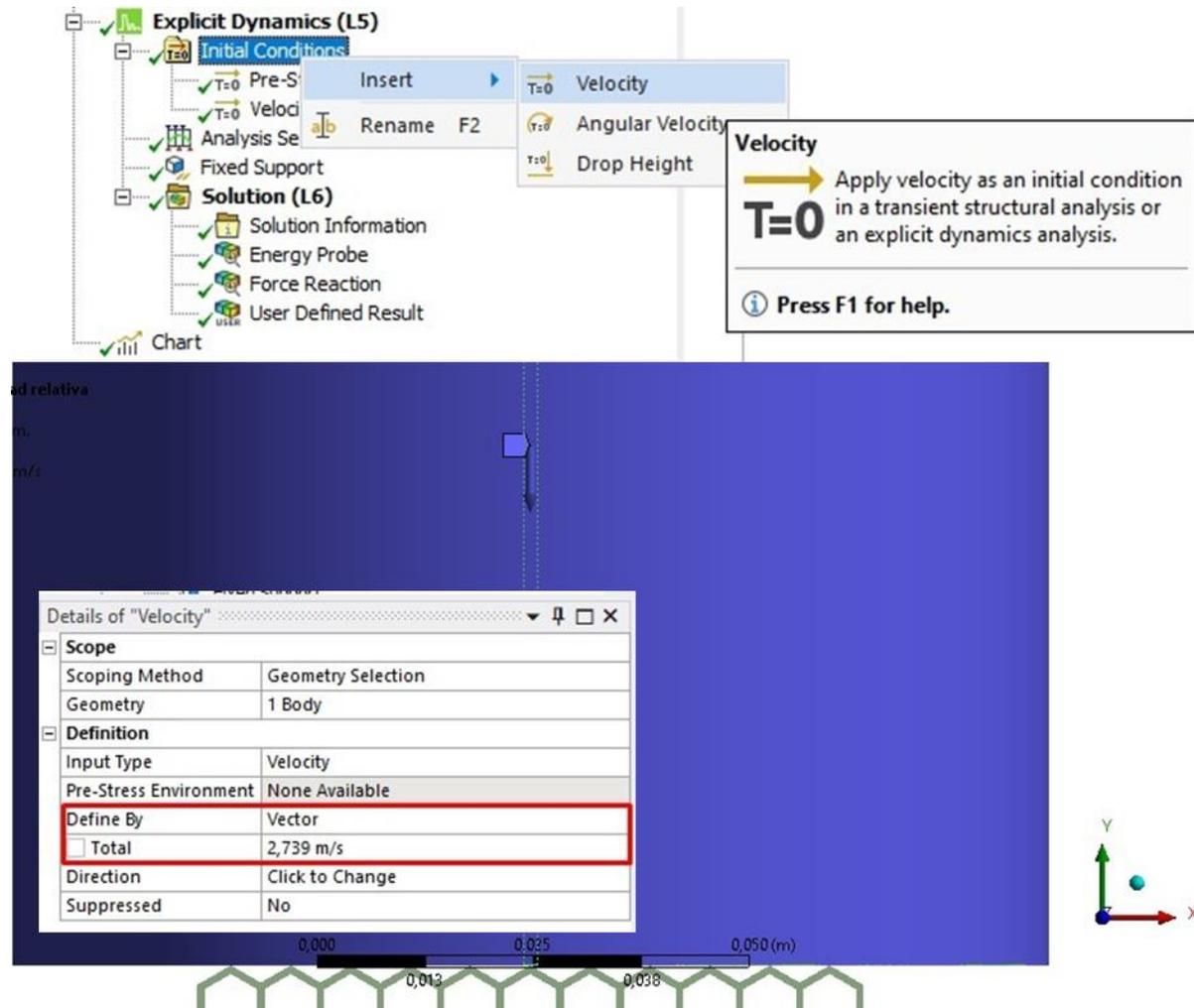
Configuración del mallado de las estructuras celulares



Como condiciones iniciales se estable soporte fijo en las caras inferiores de las estructuras celulares y se agrega condición de velocidad al impactador, La magnitud introducida en el campo resaltado en la figura C6 corresponde a la velocidad al instante en que se produce el impacto. Este valor es dependiente de la altura desde la cual cae este.

Figura C6

Condición inicial de velocidad



En la figura C6 se muestra la configuración en detalle del análisis realizado, en el cual se definió un "Number of steps" de 27 y un "Result number of points" de al menos 100 puntos con el fin de obtener la información suficiente de las variables con las que se realizó el análisis.

Figura C6

Configuración del “Analysis Settings”

Details of "Analysis Settings"	
Analysis Settings Preference	
Type	Custom
Step Controls	
Number Of Steps	27
Current Step Number	27
Load Step Type	Explicit Time Integration
End Time	5,5e-003
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No
Solver Controls	
Euler Domain Controls	
Damping Controls	
Erosion Controls	
Output Controls	
Step-aware Output Controls	No
Save Results on	Equally Spaced Points
Result Number Of Points	100
Save Restart Files on	Equally Spaced Points
Restart Number Of Points	5
Save Result Tracker Data on	Cycles
Tracker Cycles	1
Output Contact Forces	Off

La configuración del “Number of steps” se detalla en la figura C7, en la que se observa muchos más pasos y mucho más cortos en los primeros instantes del impacto debido a que es allí en donde se está generando la mayor transferencia de energía.

Figura C7

Configuración del “Number of steps”

