

DISEÑO DE UN METAMATERIAL PARA DISIPACIÓN DE VIBRACIONES
CON ANÁLISIS DE LA PROPIEDAD DE TRANSMISIBILIDAD

LINETH JOHANNA PÉREZ MONSALVE

JUAN NICOLÁS OLARTE RIVERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2021

DISEÑO DE UN METAMATERIAL PARA DISIPACIÓN DE VIBRACIONES
CON ANÁLISIS DE LA PROPIEDAD DE TRANSMISIBILIDAD

LINETH JOHANNA PÉREZ MONSALVE

JUAN NICOLÁS OLARTE RIVERO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

HELLER GUILLERMO SÁNCHEZ ACEVEDO

PhD en Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2021

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS.....	13
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. GENERALIDADES DE LOS METAMATERIALES.....	14
2.1.1. Metamateriales.....	14
2.1.2. Aplicaciones de los metamateriales	16
2.2. AISLANTES VIBRATORIOS	19
2.2.1. Aislantes de almohadilla.....	20
2.2.2. Aislantes de resorte.....	20
2.2.3. Aislantes de aire.....	21
2.2.4. Aislantes elastómeros	22
2.2.5. Aislantes de metamaterial	22
2.3. ANÁLISIS MODAL.....	23
2.3.1. Frecuencia natural (ω_n).....	23
2.3.2. Modos de vibración	24
2.3.3. Razón de amortiguamiento (ξ):	25
2.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	26
2.5. MANUFACTURA ADITIVA	28
2.5.1. Tipos de impresión 3D.....	29
2.5.2. Materiales para impresión 3D.....	30
3. DISEÑO CONCEPTUAL Y OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA BASE DE LA CELDA UNITARIA DEL MATERIAL	35
3.1. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS.....	36
3.1.1. Alternativa 1	37
3.1.2. Alternativa 2	37
3.1.3. Alternativa 3	38
3.1.4. Alternativa 4	39
3.1.5. Alternativa 5	40

3.1.6. Alternativa 6	41
3.2. ANÁLISIS ESTÁTICO.....	42
3.3. QFD Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVA	44
4. DISEÑO CONCEPTUAL DE LOS ELEMENTOS DISIPATIVOS DE LA CELDA UNITARIA DEL MATERIAL	47
5. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN FINAL DEL DISEÑO	65
6. CONCLUSIONES	74
7. RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77
ANEXOS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplos de estructuras de metamateriales.....	14
Figura 2. Metamaterial zurdo con índice de refracción negativo.....	15
Figura 3. Comparación de valores del coeficiente de Poisson.....	16
Figura 4. Antena con tamaño reducido fabricada con metamaterial.....	17
Figura 5. Celdas unitarias de metamaterial usadas en sensores a) Multiple SRR, b) Sierpinski SRR, c) Spiral Resonator.....	18
Figura 6. Celda unitaria de un metamaterial dendrítico absorbedor y su espectro de absorbtividades simuladas y medidas experimentalmente.....	18
Figura 7. Prototipo de metamaterial para el aislamiento de vibraciones.....	19
Figura 8. Aislante de vibración de resorte.....	21
Figura 9. Aislante de vibración de aire.....	21
Figura 10. Aislantes de vibración de metamaterial.....	23
Figura 11. Modos de vibración de una barra fija.....	24
Figura 12. Casos de amortiguamiento según el valor de ξ	26
Figura 13. Nodos y elementos en un análisis de elementos finitos.....	27
Figura 14. Esquema de una impresora 3D de deposición de material fundido (FDM).....	30
Figura 15. Impresión 3D en material PLA.....	31
Figura 16. Ejemplos de productos fabricados con TPU.....	33
Figura 17. Alternativa de metamaterial #1.....	37
Figura 18. Alternativa de metamaterial #2.....	38
Figura 19. Alternativa de metamaterial #3.....	39
Figura 20. Alternativa de metamaterial #4.....	40
Figura 21. Alternativa de metamaterial #5.....	41
Figura 22. Alternativa de metamaterial #6.....	41
Figura 23. Esquema del montaje para la simulación.....	47
Figura 24. Creación de un nuevo análisis de vibración.....	48
Figura 25. Selección del tipo de elemento y especificación de las propiedades del material.....	49
Figura 26. Mallado para el análisis de elementos finitos.....	50
Figura 27. Configuración del análisis modal.....	50
Figura 28. Ventana de ingreso de nueva carga.....	51
Figura 29. Restricciones de movimiento para el modelo.....	52
Figura 30. Configuración del cálculo de los resultados de la simulación.....	53
Figura 31. Modificación al espesor de la pared intermedia de la estructura seleccionada.....	55
Figura 32. Análisis estático de la estructura seleccionada con espesor $t=2$ mm.....	55
Figura 33. Desplazamiento en Z de la estructura con curva de espesor $t=5$ mm.....	56

Figura 34. Desplazamiento en Z de la estructura con curva de espesor $t=2$ mm.	57
Figura 35. Uso de resortes horizontales para disipación de energía vibratoria en metamaterial hexagonal.....	59
Figura 36. Alternativa de resortes horizontales.....	59
Figura 37. Uso de resortes verticales para disipación de energía vibratoria en láminas de metamaterial.....	60
Figura 38. Alternativa de resortes verticales.....	61
Figura 39. Esquema de funcionamiento de resonadores en voladizo.....	62
Figura 40. Alternativa de resonadores.....	62
Figura 41. Uso de hilos tensores para disipación de energía vibratoria en metaestructura.....	63
Figura 42. Alternativa de hilos tensores.....	64
Figura 43. Desplazamiento en Z de la estructura con pared de $t=2$ mm y resortes horizontales de $t=1$ mm.....	65
Figura 44. Desplazamiento en Z de la estructura con pared de $t=2$ mm y resortes verticales de $t=1$ mm.....	66
Figura 45. Desplazamiento en Z de la estructura con pared de $t=5$ mm y resortes verticales de $t=1$ mm.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 46. Desplazamiento en Z de la estructura con pared de $t=2$ mm y resonadores de $t=30$ mm.....	68
Figura 47. Desplazamiento en Z de la estructura con pared de $t=2$ mm e hilos tensores de $t=1$ mm.....	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del ácido poliláctico (PLA).....	35
Tabla 2. Propiedades físicas del poliuretano termoplástico (TPU).....	36
Tabla 3. Resultados del análisis estático de las alternativas 1,2 y 3.....	42
Tabla 4. Resultados del análisis estático de las alternativas 4, 5 y 6.....	43
Tabla 5. Volúmenes de las alternativas	45
Tabla 6. QFD para la selección de la estructura del metamaterial.....	45

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Resultados del análisis estático de las alternativas con materiales PLA y TPU, y carga de 150 N.....	80
Anexo B. Modos de vibración del diseño final entre 10 y 100 Hz.	92

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN METAMATERIAL PARA DISIPACIÓN DE VIBRACIONES CON ANÁLISIS DE LA PROPIEDAD DE TRANSMISIBILIDAD*

AUTORES: LINETH JOHANNA PÉREZ MONSALVE, JUAN NICOLÁS OLARTE RIVERO**

PALABRAS CLAVE: METAMATERIAL, VIBRACIONES, DISIPACIÓN DE ENERGÍA, IMPRESIÓN 3D

DESCRIPCIÓN:

Los metamateriales son materiales diseñados para obtener propiedades que no se encuentran en la naturaleza, a partir de cambios en su estructura a nivel microscópico o macroscópico. El desarrollo de estos materiales se ha incrementado en la última década debido a la aparición de nuevos métodos de fabricación como la manufactura aditiva, y al potencial que presentan estas estructuras para solucionar problemas en diversos campos de la ingeniería. Sin embargo, la investigación sobre el diseño de metamateriales para su uso como aislantes vibratorios se encuentra en sus primeras etapas y los estudios son relativamente escasos. Por lo tanto, es pertinente evaluar su eficiencia con el objetivo de aumentar el conocimiento en dicha área.

En la presente investigación se describe el proceso de diseño de un metamaterial para aislamiento de vibraciones. Se inicia con la recopilación de información y el planteamiento de alternativas para las estructuras del material. Posteriormente, se realiza un análisis estático usando el método de elementos finitos, para determinar las deformaciones y la resistencia de las estructuras. Una vez seleccionada la estructura que mejor se comporta bajo las cargas, se procede a diseñar los elementos para disipar las energías de vibración, simular y verificar el comportamiento del diseño bajo cargas dinámicas. El diseño final consiste en una curva armónica con soportes verticales fabricados en TPU y con resonadores como elementos disipativos. La transmisibilidad mínima de la estructura es de 35,2%.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo PhD en Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A METAMATERIAL FOR DISSIPATION OF VIBRATIONS WITH ANALYSIS OF THE PROPERTY OF TRANSMISSIBILITY*

AUTHORS: LINETH JOHANNA PÉREZ MONSALVE, JUAN NICOLÁS OLARTE RIVERO**

KEYWORDS: METAMATERIAL, VIBRATIONS, ENERGY DISSIPATION, 3D PRINTING

DESCRIPTION:

Metamaterials are materials engineered to obtain properties that are not found in nature, from structural changes at a microscopic or macroscopic level. The development of these materials is increasing recently due to emergence of new manufacturing methods like the additive manufacturing, and the potential that these structures present to solve problems in many engineering fields. However, the investigation of metamaterial design for vibration isolation is in its early stages, and the studies are relatively scarce. Therefore, it is important to evaluate its efficiency in order to increase knowledge of this area.

In the present investigation, the design process of a metamaterial for vibration isolation is described. It begins with the information gathering and the proposal of alternatives for the material structure. Later, a static analysis is carried out using the finite element method, to determine the strains and resistance of the structures. Once the structure that has the best behavior under the loads has been selected, we proceed to design the dissipative elements and to simulate and check the behavior of the design under dynamic loads. The final design consists of a TPU structure with a harmonic curve mounted between vertical supports, with resonators as dissipative elements. The minimum transmissibility of the structure is 35,2%.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo PhD en Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional.

INTRODUCCIÓN

El interés en la investigación sobre metamateriales se ha incrementado en gran medida en las últimas décadas debido al potencial que estos materiales poseen para aplicaciones en diversos campos de ingeniería, desde la óptica hasta la acústica. El valor de estos materiales radica en sus propiedades electromagnéticas o mecánicas inusuales, las cuales no se encuentran en la naturaleza, y que son útiles para solucionar problemas específicos.

Uno de esos problemas es el de la transmisión de vibraciones mecánicas. Las vibraciones mecánicas están presentes en casi la totalidad de maquinarias o estructuras y representan una de las principales causas de falla en componentes determinados o en la funcionalidad de un sistema en conjunto. Debido a esto, es importante mantener un control de vibraciones con el fin de aumentar la vida útil de las máquinas y sus componentes.

A lo largo de los años se han usado diversos dispositivos para el aislamiento y el control de las vibraciones entre los que se encuentran almohadillas, resortes y elastómeros. Cada uno de ellos varía en eficiencia y se usan en aplicaciones diferentes. Sin embargo, desde hace poco se ha evaluado la posibilidad de usar materiales diseñados con propiedades mecánicas que permitan la absorción de la energía de vibración para lograr una transmisibilidad baja. La transmisibilidad es una propiedad de los materiales que mide el desplazamiento de una superficie de un cuerpo con respecto al desplazamiento de su superficie opuesta. Cuando se trata de aislantes vibratorios, se deben buscar dispositivos o estructuras que posean transmisibilidades bajas que supriman la transmisión de vibraciones desde el entorno hacia la máquina y viceversa.

El estudio de metamateriales en el campo de las aplicaciones mecánicas no es amplio y se encuentra en sus primeras etapas. Por lo anterior se decide realizar un proyecto de investigación sobre diseño de metamateriales para aislamiento de vibraciones, con el fin de contribuir al crecimiento del estado del arte. En este proyecto se plantearon diversas alternativas de estructuras de metamaterial, las

cuales fueron evaluadas por medio de un análisis estático con ayuda del *software* Fusion 360. Teniendo en cuenta que el método de fabricación de estas estructuras es mediante manufactura aditiva, los materiales a analizar fueron polímeros generalmente usados para impresión 3D, como el ácido poliláctico (PLA) y el poliuretano termoplástico (TPU). Luego de determinar la estructura que mejor se comporta frente a las demás, se procedió a diseñar componentes que permitan una mejor disipación de la energía de vibración en la estructura. Finalmente se evaluó y verificó el diseño al realizar una simulación y un análisis modal para determinar sus modos de vibración.

Toda la información relacionada con este trabajo de investigación se mostrará en el presente libro, cuyos capítulos contienen los siguientes temas:

Capítulo 1, en este capítulo se plantea el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto de investigación.

Capítulo 2, en este capítulo se expone el marco teórico del proyecto, en donde se especifican las generalidades de los metamateriales y los aislantes vibratorios, se describe el análisis modal, el método de los elementos finitos y finalmente se habla sobre la manufactura aditiva.

Capítulo 3, en este capítulo se plantean las diferentes alternativas de estructura de metamaterial y se muestran los resultados del análisis estático realizado en Fusion 360. Posteriormente se selecciona la estructura en base a los resultados obtenidos de las simulaciones.

Capítulo 4, en este capítulo se describe el procedimiento para la ejecución de la simulación dinámica y se plantean mejoras para la alternativa seleccionada en el capítulo 3.

Capítulo 5, en este capítulo se exponen los resultados de las simulaciones de los elementos disipativos con el fin de evaluar y verificar su funcionamiento. Luego se selecciona el elemento que hará parte del diseño final del metamaterial.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la transmisibilidad en una dirección de un metamaterial cuya arquitectura celular es diseñada para ser fabricada mediante modelado por deposición fundida.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

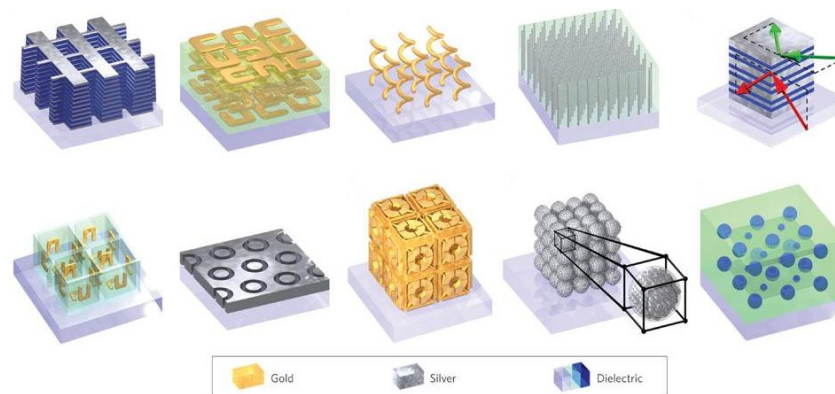
- Definir la geometría de la celda unitaria para el metamaterial, optimizando su estructura para el desempeño estático ante una carga específica a través de un software de simulación.
- Diseñar los elementos geométricos adicionales de la celda unitaria del metamaterial que conduzcan al mejoramiento de las propiedades de disipación de vibraciones mecánicas.
- Evaluar la respuesta dinámica de la celda unitaria del metamaterial a través del análisis modal y la valoración de la transmisibilidad por medio de herramientas de simulación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. GENERALIDADES DE LOS METAMATERIALES

2.1.1. Metamateriales: Los metamateriales son materiales que se caracterizan por tener propiedades físicas inusuales que se obtienen principalmente mediante la manipulación artificial de su estructura¹. De esta manera, se pueden modelar propiedades tales como permitividad, permeabilidad, índices de refracción, rigidez, resistencia, densidad, entre otros. Los metamateriales pueden estar fabricados a partir de materiales compuestos tales como metales y polímeros, y están usualmente organizados en patrones repetitivos que pueden ser estructuras reticulares, láminas perforadas, láminas arrugadas o dobladas, unidades rotativas rígidas o con cavidades, ya sea a nivel microscópico (usados mayormente para aplicaciones ópticas y electromagnéticas) o a nivel macroscópico (usados en aplicaciones que requieren propiedades de físicas y mecánicas más resistentes).

Figura 1. Ejemplos de estructuras de metamateriales.



Fuente: SOUKOLIS, Costas y WEGENER, Martin. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials. Nature Photonics 5, 2011. p. 523-530.

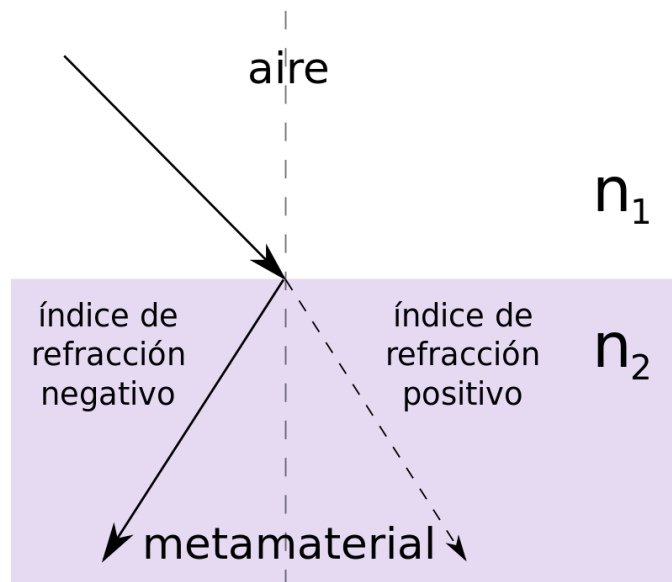
¹ ATRIA INNOVATION. ¿Qué son los metamateriales? Propiedades, beneficios y en qué campos se pueden emplear. Artículo [en línea]. 2020 [citado el 16 dic. 2020]. Disponible en internet: <http://bit.ly/3ajIPVY>

El avance obtenido a partir de investigaciones a metaestructuras ha permitido diseñar metamateriales con propiedades cuyos índices son negativos, como los que se muestran a continuación:

- **Metamateriales zurdos**

Los metamateriales zurdos o metamateriales con índice de refracción negativo (NRM por sus siglas en inglés) son compuestos artificiales caracterizados por celdas unitarias de un tamaño considerablemente menor al de la longitud de onda de la radiación electromagnética aplicada y un valor efectivo negativo del índice de refracción², obtenido como consecuencia de valores negativos de permeabilidad y permitividad eléctrica.

Figura 2. Metamaterial zurdo con índice de refracción negativo.



Fuente: WIKIPEDIA. Metamaterial. Artículo [en línea]. Citado el 16 dic. 2020. Disponible en internet: <http://bit.ly/3anl9Pz>

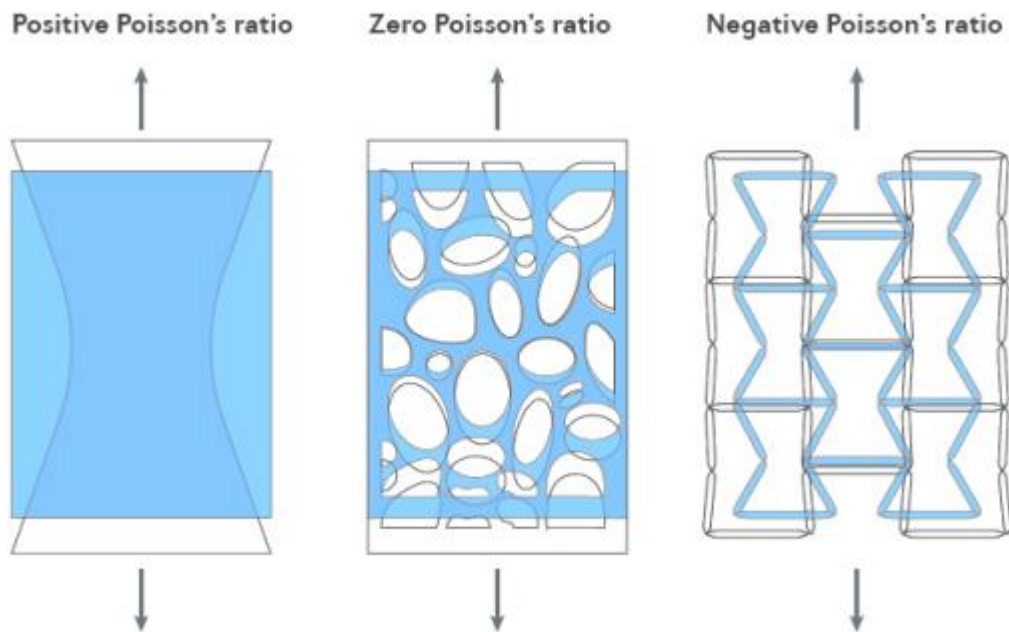
- **Metamateriales auxéticos**

Un metamaterial auxético es aquel que presenta un coeficiente de Poisson negativo, lo que implica que, al producir una tracción en una dirección, la sección perpendicular del material aumenta. Del mismo modo, si se somete a una carga

² JAKSIC, Zoran; DALARSSON, Nils y MAKSIMOVIC, Milan. Negative refractive index metamaterials: principles and applications. Microwave Review, junio 2006. p. 36-37.

de compresión, la sección perpendicular a la dirección de aplicación de la fuerza se reducirá³. Esta característica se obtiene mediante geometrías específicas que permiten este comportamiento, a pesar de que el material del que está hecha la estructura tenga un coeficiente de Poisson positivo.

Figura 3. Comparación de valores del coeficiente de Poisson.



Fuente: BERTOLDI, Katia, et al. Flexible mechanical metamaterials. Nature Reviews Materials, 2017. Volume 2. Article number 17066. p. 3.

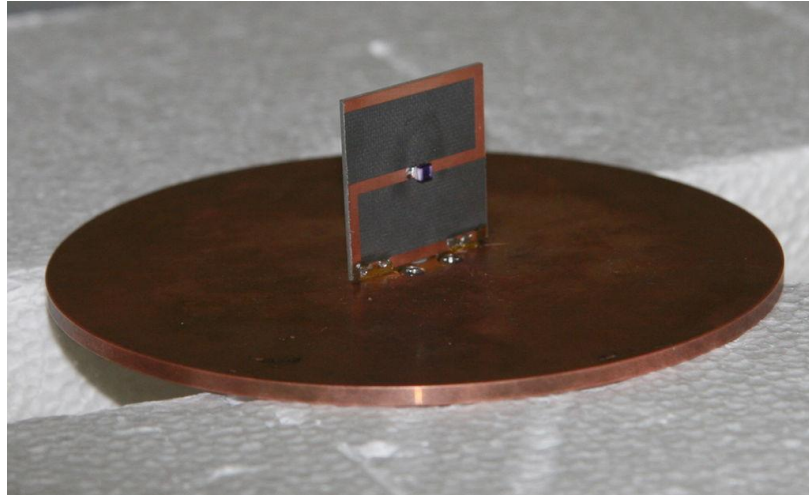
2.1.2. Aplicaciones de los metamateriales: En las últimas décadas, los metamateriales han sido objeto de investigación en diversos sectores científicos, tales como la óptica, la nanotecnología y las telecomunicaciones. Sin embargo, últimamente se han encontrado beneficios en campos como la acústica y las vibraciones mecánicas lo cual ha ampliado en gran medida su campo de acción.

- **Antenas:** Actualmente, se han fabricado diversos dispositivos de antena con metamaterial tipo EBG (Electromagnetic Band-Gap), los cuales presentan una notable mejora en tamaño y peso en comparación con los dispositivos tradicionales. La investigación de metamateriales para la

³ SIERRA SORALUCE, Andrés. Diseño y construcción de un material auxético. Trabajo de grado Ingeniería en tecnologías industriales. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. 2017. p. 5.

fabricación de antenas está orientada a la creación de antenas pequeñas con anchos de banda y ganancias superiores a los diseños convencionales⁴.

Figura 4. Antena con tamaño reducido fabricada con metamaterial.



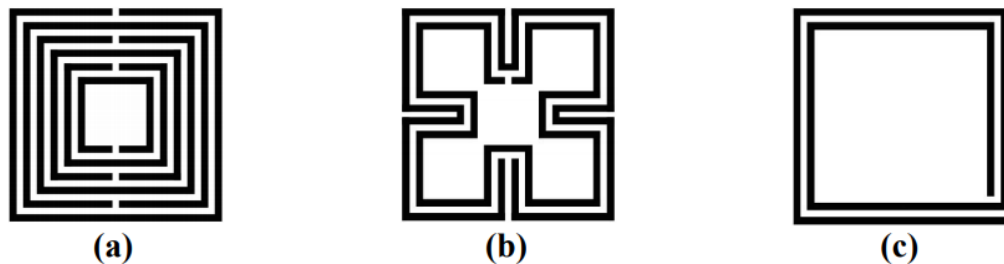
Fuente: WIKIPEDIA. Metamaterial Antenna. Artículo [en línea]. Citado el 16 dic. 2020. Disponible en internet: <http://bit.ly/3r3hXj0>

- **Sensores:** Los metamateriales abren una puerta para el diseño de sensores con una sensibilidad específica. Estos materiales proveen herramientas para aumentar significativamente la sensibilidad y la resolución de los sensores. Dichos sensores son usados en agricultura o aplicaciones biomédicas⁵.

⁴ GONZÁLEZ-ARBESÚ, J.M.; ÚBEDA, E. y ROMEU, J. Metamateriales en microondas y antenas. Universitat Politècnica de Catalunya, diciembre 2003. Buran N° 20. p. 32-38.

⁵ GANGWAR, Kaushal y GANGWAR, R. P. S. Metamaterials: Characteristics, Process and Applications. Research India Publications, 2014. Volume 4, Number 1. p. 104.

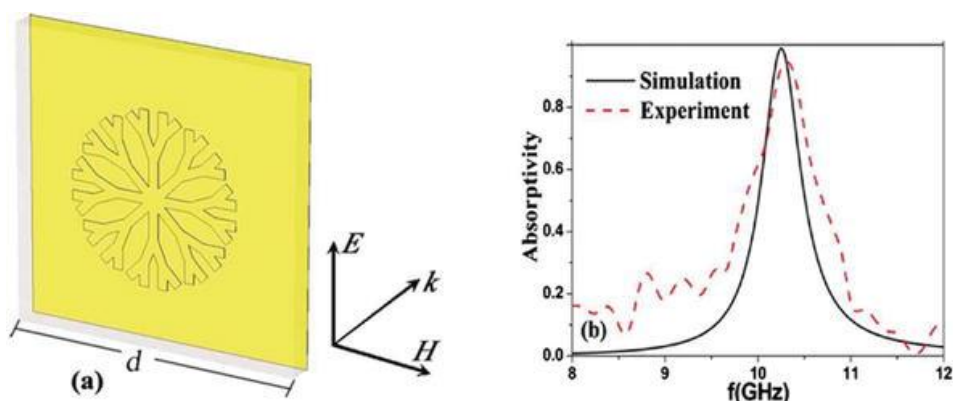
Figura 5. Celdas unitarias de metamaterial usadas en sensores a) Multiple SRR, b) Sierpinski SRR, c) Spiral Resonator



Fuente: GANGWAR, Kaushal y GANGWAR, R. P. S. Metamaterials: Characteristics, Process and Applications. Research India Publications, 2014 [citado el 16 dic. 2020]. Volume 4, Number 1. p. 104.

- **Absorbedores de radiación:** Los metamateriales absorbentes han recibido una atención significativa debido a su habilidad de alcanzar una absorción completa de ondas electromagnéticas mediante el uso de celdas unitarias con tamaños inferiores a sus respectivas longitudes de onda. Diversos metamateriales absorbentes presentan absorptividades cercanas al 100%⁶.

Figura 6. Celda unitaria de un metamaterial dendrítico absorbente y su espectro de absorptividades simuladas y medidas experimentalmente.

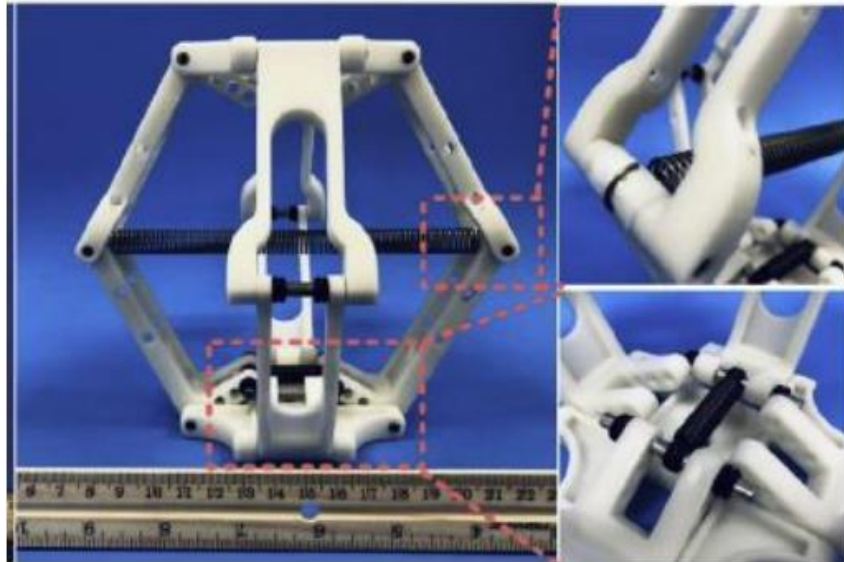


Fuente: ZHU, Weiren. Electromagnetic Metamaterial Absorbers: From Narrowband to Broadband. IntechOpen, 2018. p. 6.

⁶ ZHU, Weiren. Electromagnetic Metamaterial Absorbers: From Narrowband to Broadband. IntechOpen, 2018. p. 1. DOI: 10.5772/intechopen.78581

- **Atenuadores de vibraciones:** Muchas aplicaciones interesantes han sido propuestas recientemente para metamateriales en el campo de la propagación de ondas elásticas. Experimentos con prototipos fabricados mediante impresión 3D y simulaciones por computador, demuestran que las fuerzas transferidas desde un entorno vibratorio a través de metamateriales no exceden límites de diseño correspondientes a las amplitudes o frecuencias de las vibraciones⁷. Estos materiales pueden ser usados como protección ante vibraciones sísmicas, vibraciones por trenes, entre otros.

Figura 7. Prototipo de metamaterial para el aislamiento de vibraciones.



Fuente: WU, Lingling. Mechanical metamaterials for full-band mechanical wave shielding. Arizona State University. 2020 [citado el 17 dic. 2020]. Elsevier. 8p.

2.2. AISLANTES VIBRATORIOS

La vibración excesiva es un problema frecuente que puede provocar fallos prematuros en componentes de maquinarias, fatiga estructural de soportes y aumento de ruido en el entorno de operación. Con el fin de disminuir los efectos

⁷ BENICHO, Itamar y GIVLI, Sefi. Force-sensitive metamaterials for vibration mitigation and mechanical protection. Elsevier: Extreme Mechanics Letters, 2020. Volume 40. p. 1.

de las vibraciones se hace uso de los aislantes vibratorios, los cuales garantizan una función estática, permitiendo una mejor distribución de las cargas y una función dinámica, realizando un aislamiento de vibraciones y choques que mejora el confort vibratorio circundante y el tiempo de vida de los equipos.

Existen aislantes vibratorios de tipo activo y pasivo, cuya diferencia radica en la naturaleza de su accionamiento. Los aislantes vibratorios activos son estructuras mecánicas activas que están equipadas con sensores y actuadores de una forma que, gobernados por un controlador, puede reaccionar a las perturbaciones del entorno⁸. Los aislantes vibratorios pasivos usan las propiedades naturales de dispositivos elásticos (por ejemplo, resortes o amortiguadores) para reducir las vibraciones⁹. Cuando se aplica una vibración, la energía se transfiere de la manera más eficiente a la frecuencia natural, algo eficientemente por debajo de la frecuencia natural, y con una creciente ineficiencia por encima de la frecuencia natural.

A continuación, se listan algunos ejemplos de aislantes vibratorios pasivos.

2.2.1. Aislantes de almohadilla: Están hechos de capas de materiales flexibles diseñados para amortiguar los niveles de vibración en aplicaciones que no son críticas, tales como generadores montados en exteriores. Los aislantes de almohadilla varían en su efectividad, pero en promedio son aproximadamente 75% eficientes.

2.2.2. Aislantes de resorte: Los aislantes vibratorios de resorte se utilizan para reducir la transmisión de ruido, choque y vibración producidos por equipos mecánicos, industriales o por procesos sobre o dentro de una estructura de edificio. Son usados en bombas, ventiladores, torres de enfriamiento, calderas, compresores, entre otros.

⁸ ACCURION. Compendium: Principles of Halcyonics Active Vibration Isolation Technology. 2020 [citado el 18 dic. 2020]. p. 1.

⁹ VIBRATION ENGINEERING CONSULTANTS. Active vs. Passive Vibration Isolation. Artículo [en línea]. 2020. Disponible en Internet: <https://vibeng.com/active-vs-passive-vibration-isolation/>

Figura 8. Aislante de vibración de resorte



Fuente: SILENTIUM. Aisladores de resorte. Artículo [en línea]. 2020 [citado el 19 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://bit.ly/34vvJkH>.

2.2.3. Aislantes de aire: Un aislante de aire o un resorte de aire es una columna de gas confinada en un contenedor diseñado para utilizar la presión del gas como el medio de fuerza del resorte. Una de las aplicaciones más importantes de los aislantes de aire es la de los amortiguadores de automóviles, motocicletas y bicicletas.

Figura 9. Aislante de vibración de aire.



Fuente: MALPA. Amortiguadores de aire ajustables MONROE Max-Air. Artículo [en línea]. 2017 [citado el 19 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://bit.ly/3hazmSo>

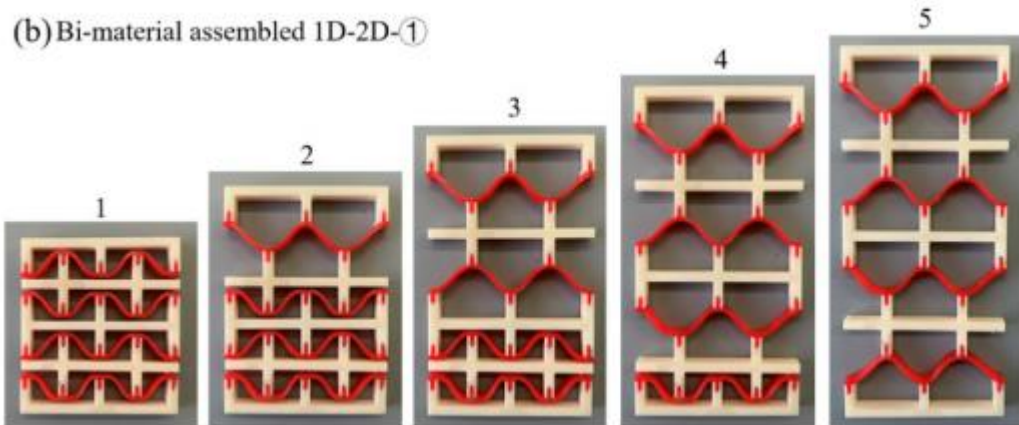
2.2.4. Aislantes elastómeros: Un elastómero es un polímero que cuenta con la particularidad de ser muy elástico pudiendo incluso recuperar su forma luego de ser deformado. Estos aislantes presentan altos valores del factor de amortiguamiento, pero varían dependiendo de la temperatura a la que estén expuestos. El rendimiento de los aislantes elastoméricos típicos cambia con las variaciones en la entrada dinámica (el nivel de vibración al que está siendo sometido el sistema). La sensibilidad a la tensión de los elastómeros hace que sus características dinámicas cambien¹⁰.

2.2.5. Aislantes de metamaterial: En adición a los metamateriales electromagnéticos, el concepto de metamateriales mecánicos ha atraído considerable interés en los últimos años. Se pueden diseñar metamateriales que proveen aislamiento de vibraciones y recolección de energía mediante análisis de elementos finitos e impresión 3D. La energía de vibración transportada por la onda elástica es transferida a las estructuras resonantes del metamaterial y allí se localiza. Macroscópicamente, se observa que la onda elástica es suprimida. Además, es posible instalar películas piezoeléctricas en las estructuras del material con el fin de convertir la energía cinética de las vibraciones en energía eléctrica¹¹.

¹⁰ PARKER LORD. How to Select a Vibration Isolator. Artículo [en línea]. 2020 [citado el 19 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://bit.ly/37xMfTd>

¹¹ LI, Ying, et al. Design of mechanical metamaterials for simultaneous vibration isolation and energy harvesting. American Institute of Physics. Applied Physics Letters, 2017. Volume 111, p. 1-2.

Figura 10. Aislantes de vibración de metamaterial.



Fuente: YANG, Hang y MA, Li. 1D to 3D multi-stable architected materials with zero Poisson's ratio and controllable thermal expansion. *Materials and Design*, 2020. Volume 188. p. 13.

2.3. ANÁLISIS MODAL

El análisis modal es el estudio de las propiedades dinámicas de una estructura, sobre la base de pruebas estructurales o de la simulación de elementos finitos. Entre estas propiedades dinámicas se encuentran las frecuencias de resonancia (también denominadas "frecuencias naturales") y los modos estructurales. Las propiedades dinámicas dependen de la masa, la rigidez y la distribución de la amortiguación en la estructura, y determinan la respuesta de la vibración estructural durante la exposición a las cargas operativas. Los resultados de las pruebas y los análisis modales se utilizan en diferentes aplicaciones de simulación y pruebas, entre las que se encuentran los cálculos de la respuesta de vibración, el análisis de causa raíz de los problemas de vibración y la detección de daños.¹²

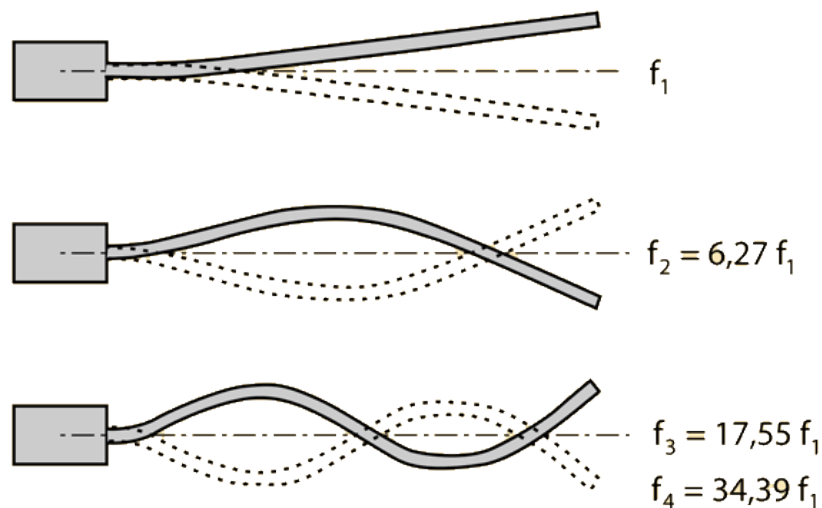
2.3.1. Frecuencia natural (ω_n): Propiedad inherente del sistema que mide el número de oscilaciones por unidad de tiempo, y se presenta cuando un cuerpo

¹² SIEMENS. Análisis modal. Artículo [en línea]. 2020 [citado el 20 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://sie.ag/34vIbRx>

vibra en condición libre, es decir, sin excitaciones externas ni amortiguamientos. La frecuencia natural no depende de la amplitud ni del impulso inicial del movimiento. Un sistema físico con n grados de libertad posee n frecuencias naturales, debido a que cada grado de libertad puede vibrar como un oscilador armónico.

2.3.2. Modos de vibración: Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema mecánico. La mayoría de los sistemas tienen muchos modos de vibración y es la tarea del análisis modal determinar la forma de esos modos. La vibración de una estructura es siempre una combinación o una mezcla de todos los modos de vibración. Pero no todos están excitados al mismo grado. Por ejemplo, si se toca una campana suavemente, lo primero que se va oír es el modo fundamental de vibración, pero si se la toca más fuerte, otros modos son excitados y se oyen los modos parciales superiores del tono¹³.

Figura 11. Modos de vibración de una barra fija.



Fuente: HYPERPHYSICS. Bar Resonances. Artículo [en línea]. Georgia State University, 2016 [citado el 20 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/index.html>

¹³ AZIMA DLI. Modo de vibración. Artículo [en línea]. 2020 [citado el 20 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://azimadli.com/vibman-spanish/mododevibracin1.htm>

2.3.3. Razón de amortiguamiento (ξ): El amortiguamiento es la pérdida de energía que se produce en un sistema mecánico en movimiento o vibración como consecuencia de efectos disipativos debidos al movimiento relativo entre sus componentes o a la deformación de los mismos¹⁴. El coeficiente de amortiguamiento (c) es una medida de la energía disipada en un ciclo de vibración libre. El coeficiente de amortiguamiento crítico (c_{cr}) es el más pequeño valor de c que anula completamente la vibración y representa la línea divisoria entre oscilación y no oscilación¹⁵. En la práctica, se suele usar el valor de la razón de amortiguamiento, el cual se define como el cociente entre el coeficiente de amortiguamiento y su valor crítico.

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad (2.1)$$

El coeficiente de amortiguamiento crítico está definido por la siguiente expresión.

$$c_{cr} = 2 * m * \omega_n \quad (2.2)$$

Donde m y ω_n son la masa y la frecuencia natural del sistema respectivamente.

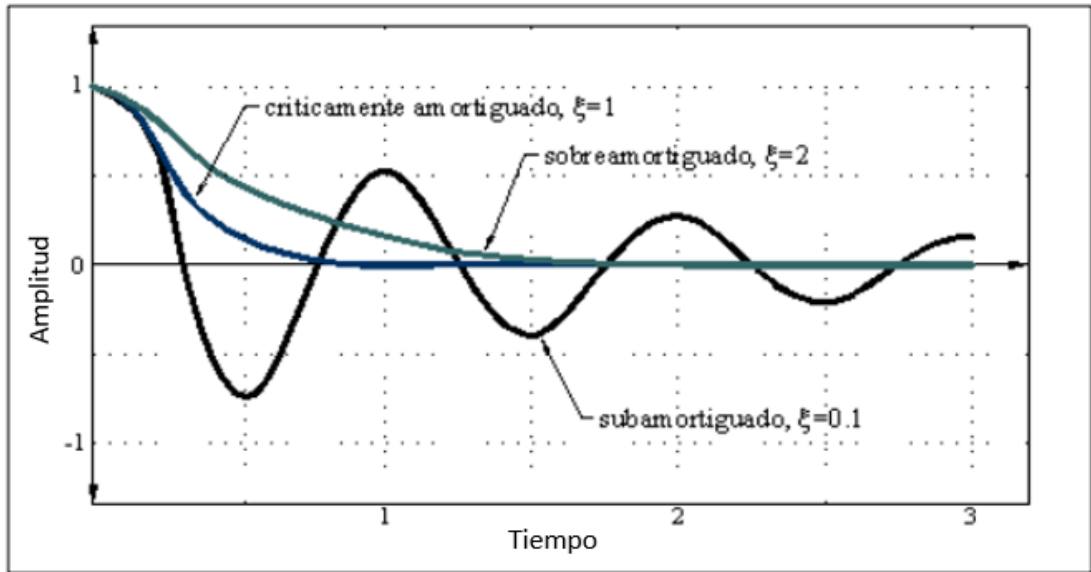
Existen tres casos de sistemas mecánicos según del valor de la razón de amortiguamiento:

- Sistema sub-amortiguado ($\xi < 1$): El sistema oscila con amplitudes decrecientes.
- Sistema críticamente amortiguado ($\xi = 1$)
- Sistema sobre-amortiguado ($\xi > 1$): El amortiguamiento elimina cualquier posibilidad de oscilación.

¹⁴ MECAPEDIA. Amortiguamiento. Artículo [en línea]. Universitat Jaume I, 2006 [citado el 20 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://www.mecapedia.uji.es/amortiguamiento.htm>

¹⁵ ALARCÓN CAMPOS, Sergio Carlos. Determinación de la razón de amortiguamiento en vigas de madera para uso en paneles CLT. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Concepción: Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental, 2015. p. 8-10.

Figura 12. Casos de amortiguamiento según el valor de ξ .



Fuente: ALARCÓN CAMPOS, Sergio Carlos. Determinación de la razón de amortiguamiento en vigas de madera para uso en paneles CLT. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Concepción: Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental, 2015. p. 10. Modificado por los autores.

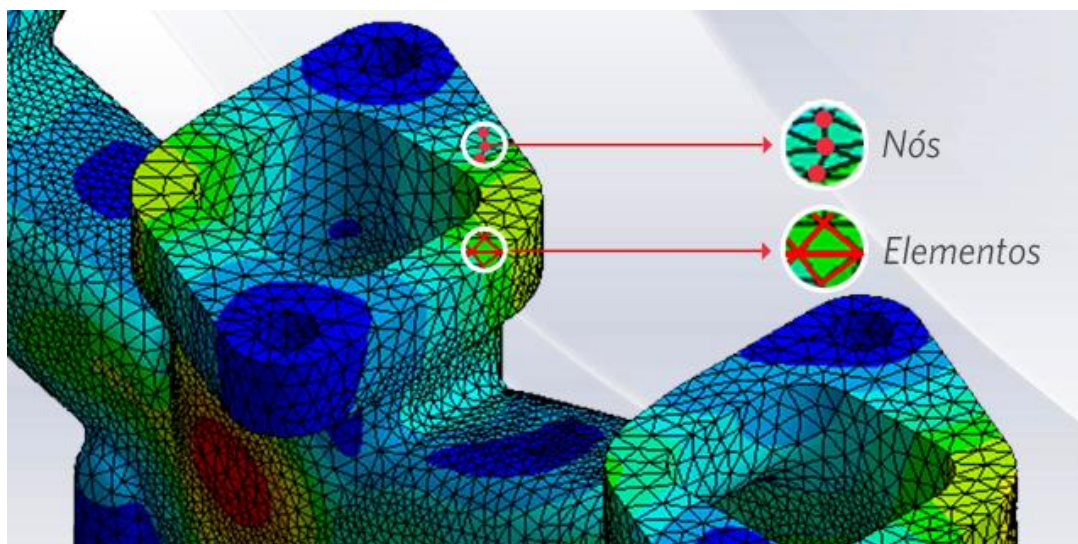
2.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El método de los elementos finitos permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico de un determinado fenómeno¹⁶. Se basa en la consideración de que cualquier cuerpo puede ser descrito por un conjunto de varios elementos, de geometría simple y por tanto un comportamiento físico conocido, logrando así evaluar estructuras de más de una dimensión (modelos de áreas y volúmenes). La precisión de los resultados dependerá del tamaño y forma de los trozos en los que se divida la pieza.

¹⁶ INGEOEXPERT. Fundamento y origen del Método de los Elementos Finitos (MEF). Artículo [en línea]. 2020 [citado el 23 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://bit.ly/34Ud3vp>

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados “nodos”. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama “malla”. Los cálculos se realizan sobre esta malla de nodos, que sirven a su vez de base para discretización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina preproceso. Los softwares de simulación computacional están evolucionando y mejorando los análisis fundamentados en este método, gracias a las mejoras en la selección de tipos y generación de las mallas, solución de errores, criterios de aceptación, técnicas de modelado y la presentación de resultados, haciendo más fácil el uso de estas herramientas.

Figura 13. Nodos y elementos en un análisis de elementos finitos.



Fuente: ESSS. Método de los elementos finitos. ¿Qué es? Artículo [en línea]. 2016 [citado el 21 dic. 2020]. Disponible en Internet: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>

Se puede lograr una mayor eficiencia y calidad en los proyectos mediante el uso del método de los elementos finitos, puesto que permiten predecir posibles errores y corregirlos antes de crear prototipos o producirlos en serie, además reduce costos debido a que el desarrollo de prototipos es más caro que la simulación, y posibilita realizar cambios rápidamente al proyecto. La combinación de los softwares utilizados en el diseño, conocidos como CAD

(Computer-Aided Design), con los basados en el Método de los Elementos Finitos, llamados CAE (Computer-Aided Engineering), permite lograr mejores resultados en un menor tiempo y con menos esfuerzo.

Actualmente hay distintos programas que permiten hallar soluciones en distintas aplicaciones, como la dinámica de fluidos computacional, mecánica estructural, electromagnetismo, simulación multifísica, y vibraciones. Los principales son los ofrecidos por ANSYS y AUTODESK; dentro de los programas que ofrece AUTODESK se encuentran Inventor y Fusion 360, en este último destaca la función del Diseño Generativo, el cual elabora alternativas de diseño de alto rendimiento (optimizadas) a partir de un conjunto de limitaciones de fabricación y materiales; además posee estudios de simulación de esfuerzo estático, frecuencias modales, pandeo estructural, esfuerzo estático no lineal y optimización de forma, entre otros.

Llevar a cabo una simulación exitosa necesita de tres componentes básicos, primero es formular el problema a resolver en función de modelos que permitan hacer un análisis matemático y entender el fenómeno de una forma conceptual. Los siguientes dos componentes son los algoritmos y el conocimiento de lenguajes y técnicas de programación, los primeros facilitan desarrollar una secuencia de pasos lógicos para que el *software* pueda solucionar el modelo y el último es el que permite realizar las simulaciones. A partir de los resultados obtenidos se debe realizar un proceso iterativo, descubriendo a través de éste nuevos aspectos del problema real, para así lograr optimizar el modelo.

2.5. MANUFACTURA ADITIVA

Históricamente los procesos de manufactura y producción han estado en un constante estado de evolución e innovación. Esto se debe en gran medida a que las necesidades y exigencias de los consumidores cambian a lo largo del tiempo, de manera que la industria debe adaptarse a estos cambios y con ella deben hacerlo sus procesos de producción. Es así como surge la manufactura aditiva, el término formal para el prototipado rápido y comúnmente se le conoce como

impresión 3D. Se usa para describir tecnologías que crean un prototipo físico directamente desde el modelo digital, aunque con la mejora de la calidad de salida de estas máquinas ya no es posible describir las partes que se hacen en ellas como “prototipo”, es por esto que las normas de la ASTM recientemente adoptadas ahora usan el término de manufactura aditiva. A pesar de que las primeras patentes de la impresión 3D se registraron en los años 80, no fue sino hasta que expiraron entre 2008 y 2009 que se comenzó a avanzar en la investigación y a bajar los costos.

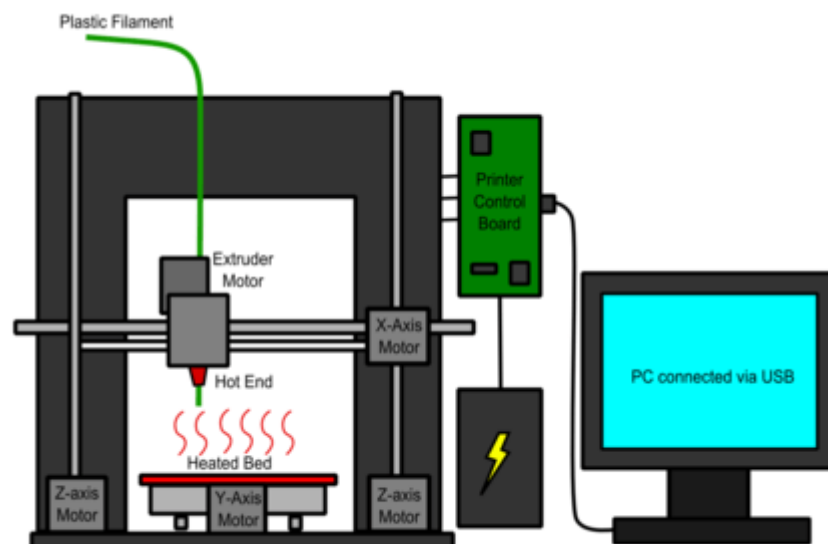
2.5.1. Tipos de impresión 3D¹⁷: En la actualidad existen diversos tipos de tecnologías para impresión en 3D. Varias de ellas se mencionan a continuación.

- **Estereolitografía (SLA):** Esta técnica fue la primera en utilizarse. Consiste en la aplicación de un haz de luz ultravioleta a una resina líquida (contenida en un cubo) sensible a la luz. La luz UV va solidificando la resina capa por capa. La base que soporta la estructura se desplaza hacia abajo para que la luz vuelva a ejercer su acción sobre el nuevo baño, así hasta que el objeto alcance la forma deseada.
- **Sinterización Selectiva por Láser (SLS):** También conocido en inglés como *Selective Laser Sintering*, esta tecnología se nutre del láser para imprimir los objetos en 3D. Nació en los años 80, y pese a tener ciertas similitudes con la tecnología SLA, ésta permite utilizar un gran número de materiales en polvo (cerámica, cristal, nylon, poliestireno, etc.). El láser impacta en el polvo, funde el material y se solidifica. Todo el material que no se utiliza se almacena en el mismo lugar donde inició la impresión por lo que, no se desperdicia nada.
- **Inyección:** Este es el sistema de impresión 3D más parecido a una impresora habitual (de tinta en folio), pero en lugar de inyectar gotas de tinta en el papel, inyectan capas de fotopolímero líquido que se pueden curar en la bandeja de construcción.

¹⁷ IMPRESORAS 3D. Tipos de impresoras 3D. Artículo [en línea]. 2017 [citado el 22 dic. 2020]. Disponible en Internet: <https://www.impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/>

- **Deposición de material fundido (FDM):** La técnica aditiva del modelado por deposición fundida es una tecnología que consiste en depositar polímero fundido sobre una base plana, capa a capa. El material, que inicialmente se encuentra en estado sólido almacenado en rollos, se funde y es expulsado por la boquilla en minúsculos hilos que se van solidificando conforme van tomando la forma de cada capa. Para este tipo de impresión se utilizan una gran variedad de materiales, entre los que predominan el ABS, el PLA y el TPU.

Figura 14. Esquema de una impresora 3D de deposición de material fundido (FDM).



Fuente: IMPRESORAS 3D. Tipos de impresoras 3D. Artículo [en línea]. 2017 [citado el 22 dic. 2020]. Disponible en Internet: <https://www.impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/>

2.5.2. Materiales para impresión 3D:

- **Ácido poliláctico**

El ácido poliláctico es un polímero derivado del ácido láctico. Se fabrica a partir de recursos renovables al 100%, como son el maíz, la remolacha, el trigo, raíces de mandioca o caña de azúcar y otros productos ricos en almidón. Su

producción industrial es un proceso sostenible y renovable por su naturaleza biodegradable, soluciona los problemas de eliminación de residuos sólidos y reduce nuestra dependencia de las materias primas derivadas del petróleo¹⁸.

Figura 15. Impresión 3D en material PLA.



Fuente: 3DNATIVES. Guía completa: el filamento PLA en la impresión 3D. Artículo [en línea]. 2019 [citado el 21 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://bit.ly/3pdbvUW>

El PLA es un termoplástico, lo que significa que puede ser fundido, situado en donde se requiera al enfriarse y recalentarlo de nuevo para formar otras formas sin ninguna degradación. El punto de fusión del material varía entre 150 y 160 grados Celsius lo que permite que sea utilizado en un rango amplio de trabajo.

Entre las aplicaciones del PLA se encuentra la producción de envases como botellas de agua y contenedores de alimentos, su utilización como fibra sintética en la industria textil y en la industria médica para implantes de hueso y tejido. Actualmente es el segundo bioplástico más producido y consumido en el mundo en términos de volumen.

El ácido poliláctico (PLA) es uno de los materiales más populares en la impresión 3D, particularmente en la tecnología de impresión FDM gracias a la

¹⁸ <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html>

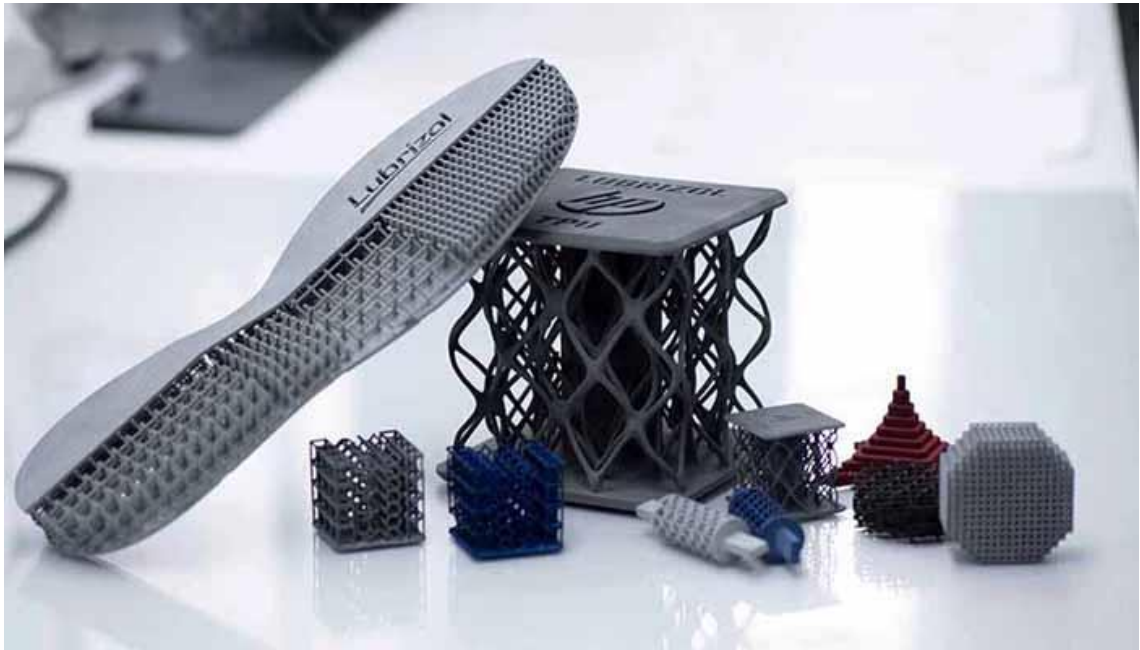
popularización de las impresoras de escritorio con este tipo de tecnología. Este material se caracteriza por ser de los materiales más manejables y prácticos de impresión 3D debido a que la deformación del material es mínima y hace del PLA el punto perfecto de entrada al mundo de la impresión 3D. Sin embargo, la fragilidad del material lo hace más apropiado para prototipos no funcionales, impresiones decorativas o aplicaciones en las que este expuesto a poco estrés.

- **Poliuretano termoplástico**

El denominado poliuretano termoplástico (TPU) es un tipo de elastómero que se caracteriza por su alta flexibilidad y durabilidad en la transformación. En su composición química encontramos que su adaptabilidad se debe a la presencia de secuencias alternas de segmentos duros y blandos, es decir que variando la proporción de estos segmentos la dureza y flexibilidad del material pueden ser personalizadas. El TPU puede ser tan suave como el caucho o tan duro como los plásticos rígidos. La apariencia y tacto del material es igual de versátil, puede ser transparente o coloreado, también puede ser suave al tacto o puede brindar adhesión.

El TPU cuenta con diversas ventajas que hacen la diferencia cuando se emplea para la manufactura aditiva, algunas de estas son su resistencia a la abrasión y al impacto, la elevada flexibilidad (incluso a bajas temperaturas), posee bajos coeficientes de fricción lo que lo hace suave, tiene la capacidad de soportar fuerzas de compresión y tracción mucho más altas que materiales como el PLA y el ABS, es resistente a grasas y aceites, también tiene una cohesión de capa bastante avanzada que consigue una homogeneidad mecánica excelente en las piezas fabricadas, haciendo que éstas sean isotrópicas.

Figura 16. Ejemplos de productos fabricados con TPU.



Fuente: 3DNATIVES. Guía completa: el TPU en la impresión 3D. Artículo [en línea]. 2020 [citado el 21 dic. 2020]. Disponible en Internet: <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-tpu-040620202>

Sin embargo, este tipo de material tiene limitaciones que debemos tener en cuenta, el TPU no se adapta bien a los entornos calurosos a pesar de tener un rango de trabajo amplio, no soporta altas temperaturas. Es un material higroscópico (se degradará en condiciones de humedad) y cuando se emplea en manufactura aditiva las condiciones de impresión deberán variar según la tecnología utilizada y tener en cuenta la resolución que se requiere, por ejemplo, la velocidad de impresión rara vez es superior a 30mm/s, esto se debe a que es difícil empujar la cantidad adecuada de filamento a través de la punta caliente, lo que hace que las impresiones tomen mucho más tiempo en realizarse.

El TPU es un elastómero sumamente versátil con propiedades especiales que ofrece tanto rendimiento superior como estabilidad y consistencia en el proceso, su uso y extrusión se ven facilitadas por ser un poco más rígido que muchos de los otros tipos de filamentos flexibles.

En la industria de la fabricación aditiva este material abre un mundo de posibilidades a distintos mercados como el del calzado, en la creación de suelas elásticas, creación de neumáticos, piezas o envolturas flexibles, así como para piezas que necesitan tener resistencia a los impactos y movimientos repentinos; y también para aplicaciones como la amortiguación de vibraciones y la absorción de impactos. El TPU es ideal para piezas de uso final, prototipos funcionales, modelos conceptuales y componentes personalizados.

3. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA FORMA BASE DE LA CELDA UNITARIA DEL MATERIAL

El primer paso para el diseño del metamaterial consiste en la identificación y caracterización de los materiales con los que se fabricarán las estructuras. El método de fabricación de los metamateriales es la manufactura aditiva, específicamente la deposición de material fundido (FDM), debido a que la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander maneja esta tecnología. Los materiales más usados en este tipo de impresoras son el ácido poliláctico (PLA) y el poliuretano termoplástico (TPU) y sus propiedades se describen en las siguientes tablas.

Tabla 1. Propiedades físicas del ácido poliláctico (PLA).

Propiedad	Valor
Densidad	$1,21 * 10^{-6} \left[\frac{kg}{mm^3} \right]$
Módulo de Young	0,35 <i>GPa</i>
Coefficiente de Poisson	0,36
Esfuerzo de fluencia	59 <i>MPa</i>
Resistencia última de tensión	70 <i>MPa</i>
Conductividad térmica	$1,3 * 10^{-4} \left[\frac{W}{mm * C} \right]$
Coefficiente de expansión térmica	$41 * 10^{-6} \left[\frac{m}{m * K} \right]$
Calor específico	$1800 \left[\frac{J}{Kg * K} \right]$

Fuente: FARAH, Shady; ANDERSON, Daniel y LANGER, Robert. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications – A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2016. Volume 107. p. 5.

Tabla 2. Propiedades físicas del poliuretano termoplástico (TPU).

Propiedad	Valor
Densidad	$1,23 * 10^{-6} \left[\frac{kg}{mm} \right]$
Módulo de Young	0,0094 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0,36
Esfuerzo de fluencia	29 MPa
Resistencia última de tensión	29 MPa
Conductividad térmica	$2,5 * 10^{-4} \left[\frac{W}{mm * C} \right]$
Coefficiente de expansión térmica	$30 * 10^{-6} \left[\frac{m}{m * K} \right]$
Calor específico	$1700 \left[\frac{J}{Kg * K} \right]$

Fuente: PLATEK, Pawel, et al. Deformation Process of 3D Printed Structures Made from Flexible Material with Different Values of Relative Density. MDPI Polymers, 2020. Volume 12, Issue 9. p. 5.

Las alternativas de estructuras se analizan bajo estos dos materiales, con el objetivo de elegir el polímero cuyas propiedades ayuden a la disipación de la energía como se desea. A continuación, se listan las diferentes alternativas para su posterior análisis.

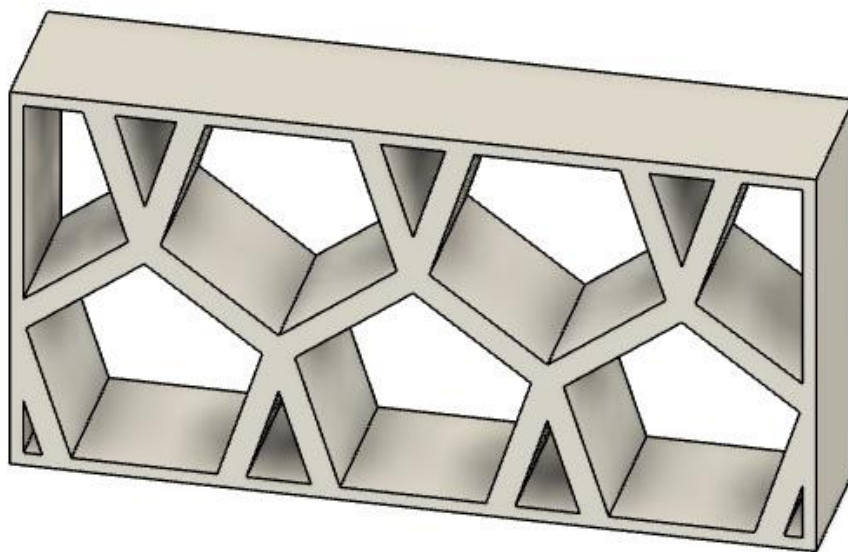
3.1. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

Las estructuras de metamaterial seleccionadas para el análisis fueron recopiladas de diversos estudios realizados para aislamiento de vibraciones con metamateriales, libros sobre sólidos con patrones en su estructura y algunas fueron planteadas por los autores. Para la selección de estas se tuvo en cuenta que las alternativas debían cumplir con los siguientes parámetros:

1. Las alternativas consisten en un grupo de 5 células unitarias de un área aproximada de $10,8 \text{ cm}^2$ y con una profundidad de 3 cm, las cuales contienen el patrón sugerido para cada alternativa.
2. Los espesores para esta etapa y para que sea equitativo con las alternativas se define como 5 mm.

3.1.1. Alternativa 1: Esta alternativa consiste en una estructura compuesta de un patrón de pentágonos regulares y triángulos en los espacios entre ellos. Las dimensiones de esta muestra son $145 \times 74,5 \times 30$ mm. Esta alternativa fue propuesta por los autores, con base en estructuras similares con otros patrones de polígonos regulares, donde posición de los pentágonos permite la deformación en el ecuador de la estructura y los triángulos proporcionan rigidez en los extremos.

Figura 17. Alternativa de metamaterial #1.



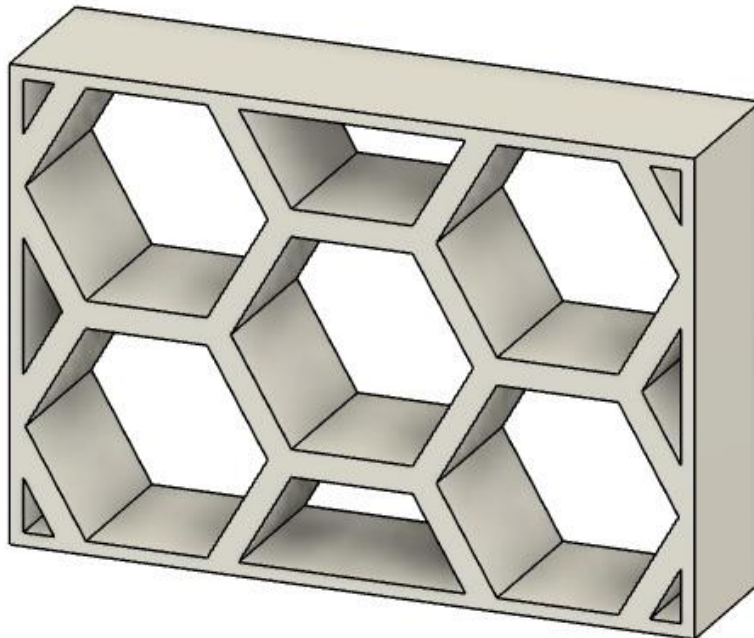
Fuente: Autores

3.1.2. Alternativa 2: Esta alternativa consiste en una estructura compuesta de un patrón de hexágonos adyacentes que se distribuyen en la totalidad de la muestra. Las dimensiones de esta muestra son $125 \times 86,6 \times 30$ mm. Esta alternativa fue recopilada del libro “Cellular Solids”¹⁹ y del artículo “Deformation Process of 3D Printed Structures Made from Flexible Material with Different

¹⁹ GIBSON, Lorna y ASHBY, Michael. Cellular Solids: Structure and properties. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 97.

Values of Relative Density”²⁰, en los cuales se observa como las estructuras compuestas por hexágonos presentan una excelente resistencia y una distribución de esfuerzos favorable a la hora de deformarse.

Figura 18. Alternativa de metamaterial #2.



Fuente: Autores

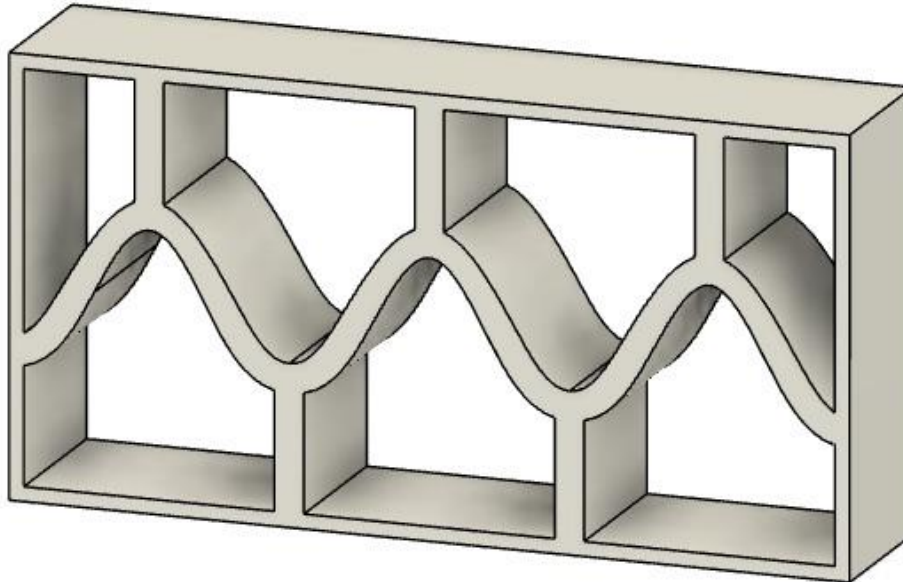
3.1.3. Alternativa 3: Esta alternativa consiste en una estructura compuesta de una curva de forma sinusoidal que atraviesa horizontalmente la muestra por la mitad y permite que los esfuerzos se distribuyan mejor a lo largo de la misma. En cada pico y valle de la curva se encuentran soportes verticales que le proporcionan estabilidad a la estructura. Las dimensiones de esta muestra son 144x75x30 mm. Esta alternativa fue recopilada de los artículos “1D to 3D multi-stable architected materials with zero Poisson's ratio and controllable thermal expansion”²¹ y “Parameters analysis and optimization of a typical multistable

²⁰ PLATEK, Pawel, et al. Deformation Process of 3D Printed Structures Made from Flexible Material with Different Values of Relative Density. MDPI Polymers, 2020. Volume 12, Issue 9. p. 4.

²¹ YANG, Hang y MA, Li. 1D to 3D multi-stable architected materials with zero Poisson's ratio and controllable thermal expansion. Materials and Design, 2019. Volume 188. p. 13.

mechanical metamaterial”²²

Figura 19. Alternativa de metamaterial #3.



Fuente: Autores

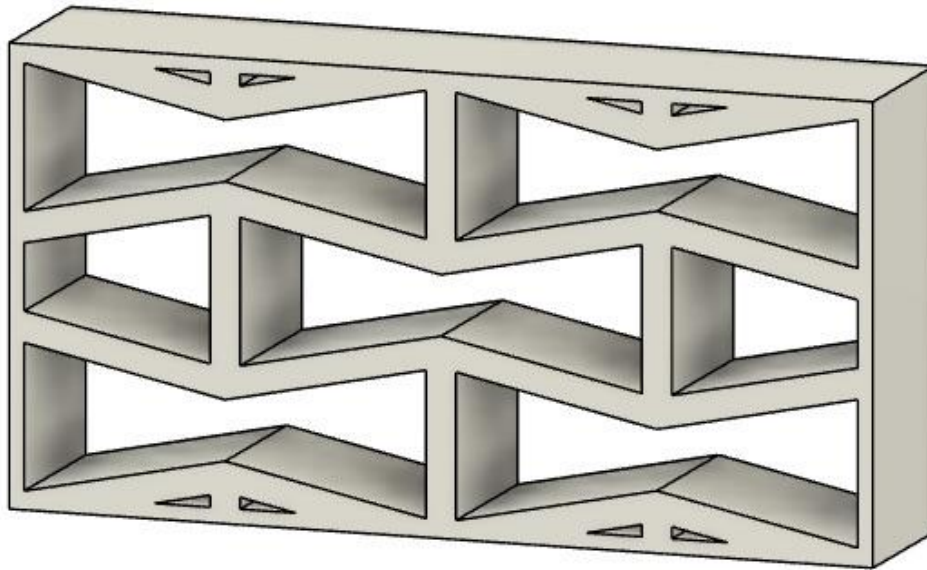
3.1.4. Alternativa 4: Esta alternativa consiste en una estructura compuesta de un patrón de formas hexagonales deformadas y adyacentes, la forma en la que esta construida hace que sea una geometría deformable y flexible. Las dimensiones de esta muestra son 144x75x30 mm. Esta alternativa fue recopilada del libro “Cellular Solids”²³ y del artículo “Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review”.²⁴

²² HUA, Jian, et al. Parameters analysis and optimization of a typical multistable mechanical metamaterial. *Extreme Mechanics Letters*, 2020. Volume 35. p. 3.

²³ GIBSON, Lorna y ASHBY, Michael. *Cellular Solids: Structure and properties*. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 97.

²⁴ YU, Xianglong, et al. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review. *Progress in Materials Science*, 2018. Volume 94. p. 162.

Figura 20. Alternativa de metamaterial #4

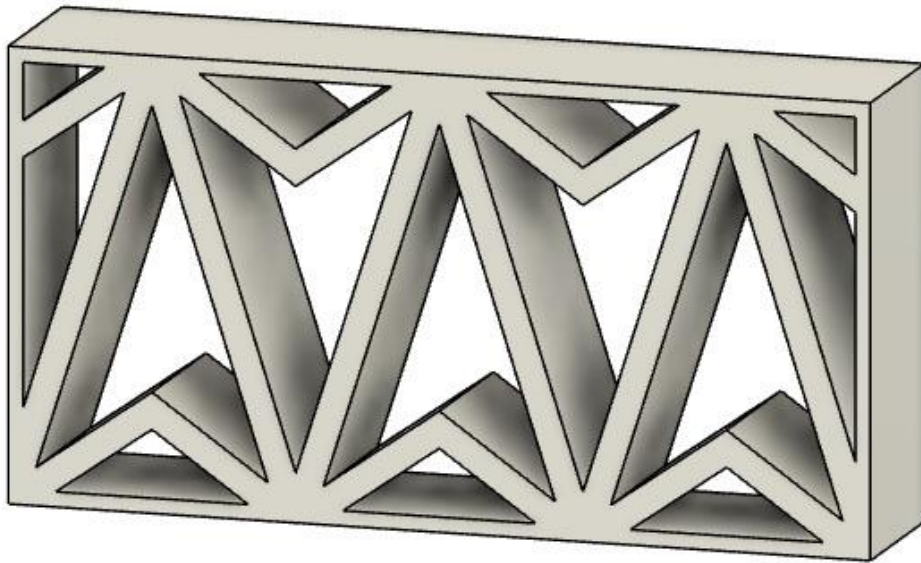


Fuente: Autores

3.1.5. Alternativa 5: Esta alternativa consiste en una estructura compuesta de un patrón de formas agudas y opuestas a lo largo de la muestra que dan rigidez y resistencia a grandes cargas. Las dimensiones de esta muestra son 144x75x30 mm. Esta estructura fue planteada basándose en las formas presentadas en el artículo “Novel origami-inspired metamaterials: Design, mechanical testing and finite element modelling”²⁵

²⁵ WICKELER, Anastasia y NAGUIB, Hani. Novel origami-inspired metamaterials: Design, mechanical testing and finite element modelling. *Materials and Design*, 2020. Volume 186. p. 3.

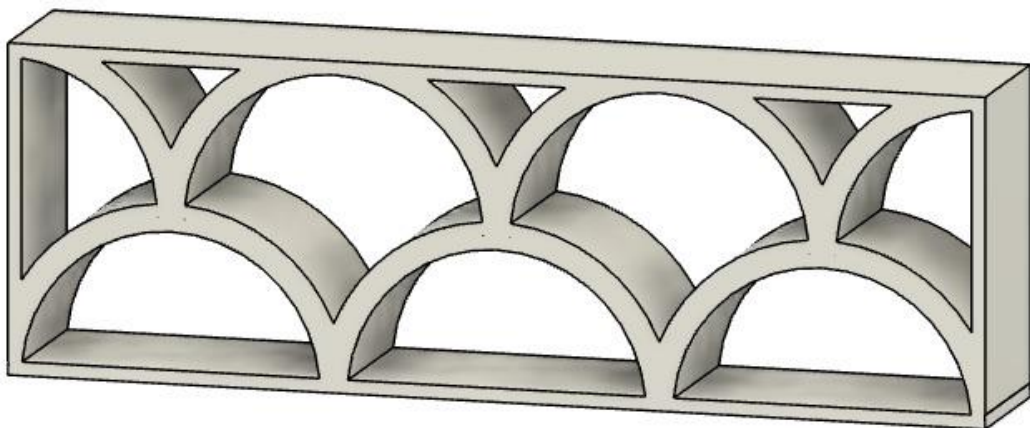
Figura 21. Alternativa de metamaterial #5.



Fuente: Autores

3.1.6. Alternativa 6: Esta alternativa consiste en una estructura compuesta de filas de semicírculos ubicadas alternadamente con el fin de obtener resistencia y una distribución de esfuerzos a lo largo de toda la muestra. Las dimensiones de esta muestra son 180x60x30 mm. Esta alternativa fue propuesta por los autores.

Figura 22. Alternativa de metamaterial #6.



Fuente: Autores

3.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

Una vez planteadas las alternativas, se procede a realizar el análisis estático de cada una de ellas para los materiales de PLA y TPU. Las simulaciones de carga se realizaron en el programa Fusion 360 de Autodesk, en donde se modelaron las alternativas y se ubicó una carga distribuida en la superficie superior de éstas. Se analizaron 3 casos de cargas distribuidas, equivalentes a 80, 100 y 150 N. A continuación, se presentan los resultados de desplazamiento máximo, deformación unitaria máxima y factor de seguridad mínimo para cada alternativa.

Tabla 3. Resultados del análisis estático de las alternativas 1,2 y 3.

Alternativa	Material	Carga [N]	Desplazamiento [mm]	Deformación unitaria	Factor de seguridad
			Max	Max	Min
#1	PLA	80	0,05446	0,00209	15
		100	0,06808	0,002612	15
		150	0,1021	0,003919	15
	TPU	80	1,656	0,06315	15
		100	2,07	0,07894	4,62
		150	3,104	0,1184	3,08
#2	PLA	80	0,1008	0,002459	15
		100	0,126	0,003074	15
		150	0,189	0,004611	10,31
	TPU	80	2,615	0,09256	3,139
		100	3,269	0,1157	2,511
		150	4,984	0,1692	1,678
#3	PLA	80	0,08622	0,002056	15
		100	0,1086	0,00257	15
		150	0,1629	0,003856	15
	TPU	80	2,973	0,07658	5,163
		100	3,716	0,09572	4,13
		150	5,671	0,1425	3,666

Fuente: Autores

Tabla 4. Resultados del análisis estático de las alternativas 4, 5 y 6.

Alternativa	Material	Carga [N]	Desplazamiento [mm]	Deformación unitaria	Factor de seguridad
			Max	Max	Min
#4	PLA	80	0,2694	0,002324	9,34
		100	0,3368	0,002905	7,472
		150	0,5052	0,004358	4,981
	TPU	80	4,396	0,09069	1,21
		100	5,496	0,1134	0,983
		150	8,757	0,1694	0,86
#5	PLA	80	0,01885	7,034*10-4	15
		100	0,02357	8,793*10-4	15
		150	0,03535	0,001319	15
	TPU	80	0,697	0,02765	15
		100	0,8713	0,03456	15
		150	1,318	0,05163	15
#6	PLA	80	0,0423	0,002242	15
		100	0,0529	0,002802	15
		150	0,0794	0,004204	15
	TPU	80	1,566	0,08318	15
		100	1,958	0,104	15
		150	2,937	0,156	15

Fuente: Autores.

A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que las deformaciones de las muestras fabricadas con PLA son considerablemente menores que las de las muestras de TPU, lo que es esperado debido a que las propiedades del material muestran que es muy resistente y tiene un módulo de Young alto, que permite soportar cargas con valores pequeños de deformación.

Muchos casos presentaron un factor de seguridad de 15, esto se debe al límite máximo para el cálculo de factor de seguridad que maneja Fusion 360 (cualquier factor mayor a 15 se muestra como 15 en el programa). De todos los casos evaluados, la alternativa #4 con material TPU presenta factores de seguridad menores a 1 al ser cargada con 100 y 150 N. Las imágenes de la simulación y el análisis estático por método de elementos finitos para la carga de 150 N se

pueden observar en el anexo A. En las simulaciones, se usó una placa de acero para distribuir uniformemente la carga en la superficie superior de la estructura.

3.3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

Una vez planteadas las alternativas, se procede a hacer selección de la que mejor se adapte a nuestros requerimientos como aislante de vibraciones. Para esto, se deben especificar los factores que se analizarán y evaluarán en cada una de ellas. La selección de la mejor alternativa se realizará mediante una tabla QFD, en donde se dará un porcentaje de importancia y una puntuación de uno (1) a cinco (5) a cada uno de los factores. La alternativa con mayor puntuación será seleccionada. Los factores por analizar se listan a continuación.

- **Deformación:** La deformación de la estructura indica que la energía cinética de la vibración puede ser transferida y localizada satisfactoriamente al interior de la muestra. En estructuras rígidas, el movimiento vibratorio atraviesa la estructura sin ninguna supresión y no se logra el aislamiento, lo cual provoca transmisibilidades altas.
- **Esfuerzos:** La estructura seleccionada debe tener la capacidad de soportar la carga estática y dinámica de los elementos que va a aislar. Por ello se debe verificar que los esfuerzos no sobrepasen la resistencia de fluencia del material. En otras palabras, el factor de seguridad no debe ser menor a 1 en ningún punto de la geometría.
- **Volumen:** El volumen de la pieza representa la cantidad de material necesario y el tiempo de fabricación. Un volumen elevado acarrea mayores costos de fabricación y un mayor tiempo de impresión 3D. Por ende, se deben buscar alternativas que requieran una cantidad de material baja.

El QFD se construye a partir de los resultados obtenidos del análisis estático. Debido a la baja deformación que presentan los prototipos de PLA, se debe descartar esta opción como material para un aislante vibratorio. De las alternativas con TPU, la mayor deformación se obtuvo con la alternativa número

4, sin embargo, falló bajo la carga estática. Además, estas deformaciones de gran magnitud pueden hacer que se choquen las estructuras internas del material, lo cual no es deseado. Las alternativas con mejores factores de seguridad son la 5 y 6, pero presentan las estructuras más rígidas. En la siguiente tabla se muestran los volúmenes de las alternativas.

Tabla 5. Volúmenes de las alternativas

Alternativa	Volumen [cm^3]
1	99,76
2	93,9
3	78,7
4	120
5	136
6	97,78

Fuente: Autores

En términos del volumen, la mejor alternativa es la número 3, la cual necesitará menos cantidad de material de impresión. Las alternativas 4 y 5 necesitarán más material y, por ende, mayores tiempos de impresión. A continuación, se muestran los puntajes de cada alternativa para cada uno de los criterios de evaluación.

Tabla 6. QFD para la selección de la estructura del metamaterial.

Criterio	Deformación	Esfuerzos	Volumen	Total
%	40	35	25	100
1	3	4	3	3,35
2	3	3	3	3
3	4	4	5	4,25
4	5	1	1	2,6
5	1	5	1	2,4
6	2	5	3	3,3

Fuente: Autores

Según las puntuaciones del QFD, el mejor comportamiento se obtiene con la alternativa número 3, por lo tanto, será la estructura seleccionada. Ahora, se procede a realizar mejoras en la estructura que faciliten el aislamiento de vibraciones de esta celda unitaria.

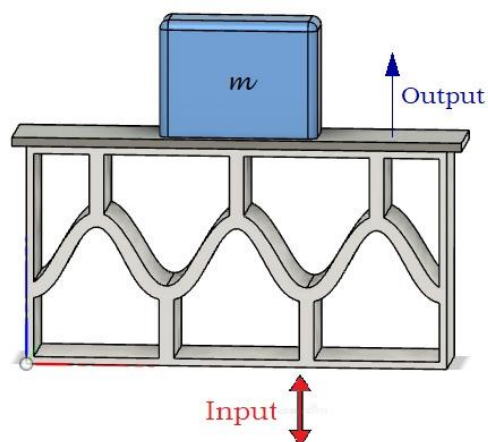
4. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE LA CELDA UNITARIA DEL METAMATERIAL

Con el fin de incrementar la eficiencia del metamaterial, se deben diseñar mejoras que aumenten la capacidad de disipación de la energía cinética de las vibraciones. Cada una de estas mejoras se debe simular y evaluar mediante un *software* que permita el estudio de la respuesta dinámica de una estructura, como es el caso de Inventor de Autodesk. A continuación, se describirá la metodología usada para la simulación vibratoria en este *software*, mediante el método de los elementos finitos (MEF).

4.1. SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL METAMATERIAL

El *software* Inventor posee un complemento denominado NASTRAN, usado para el estudio estructural por medio de elementos finitos. El montaje que se evaluará consiste en una masa ubicada sobre la superficie superior del metamaterial y una fuerza externa de vibración en la superficie inferior. El objetivo principal de la simulación es medir el desplazamiento de la estructura en el eje vertical (Z) producto de la vibración.

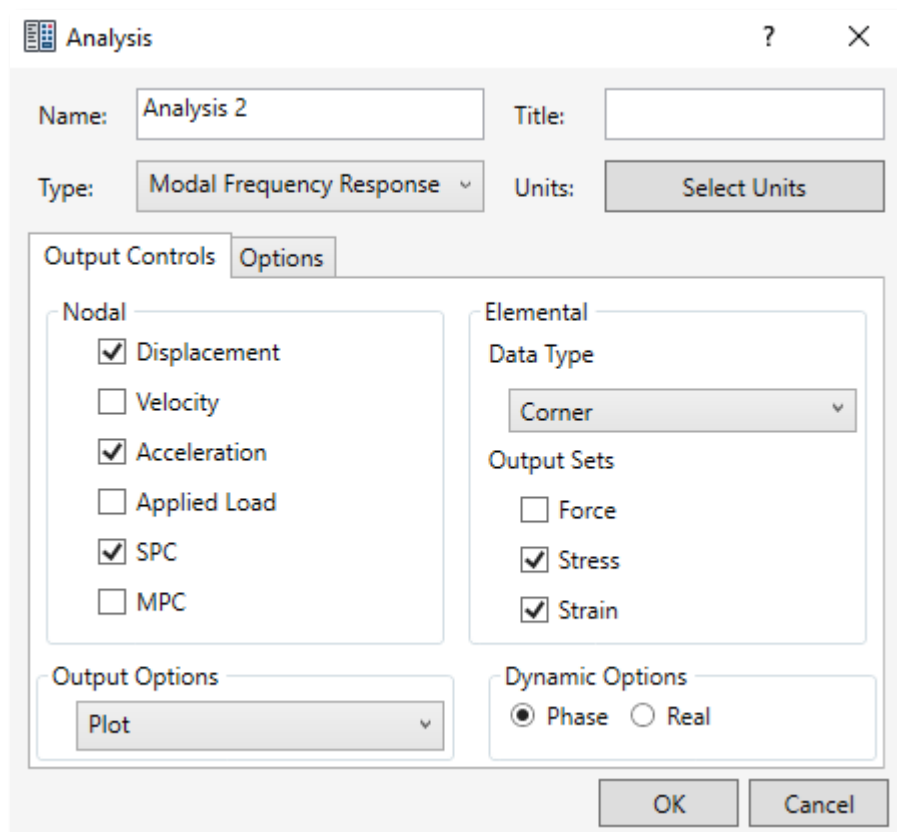
Figura 23. Esquema del montaje para la simulación



Fuente: Autores

Se importan los modelos 3D realizados en Fusion 360 hacia el entorno de diseño de Inventor, usando archivos del tipo .step. Una vez que el complemento NASTRAN sea activado, se debe crear un nuevo análisis del tipo “*Modal Frequency Response*”, el cual permite obtener resultados de desplazamiento, velocidad, aceleración, esfuerzos y deformaciones, en un rango de frecuencias determinado.

Figura 24. Creación de un nuevo análisis de vibración.



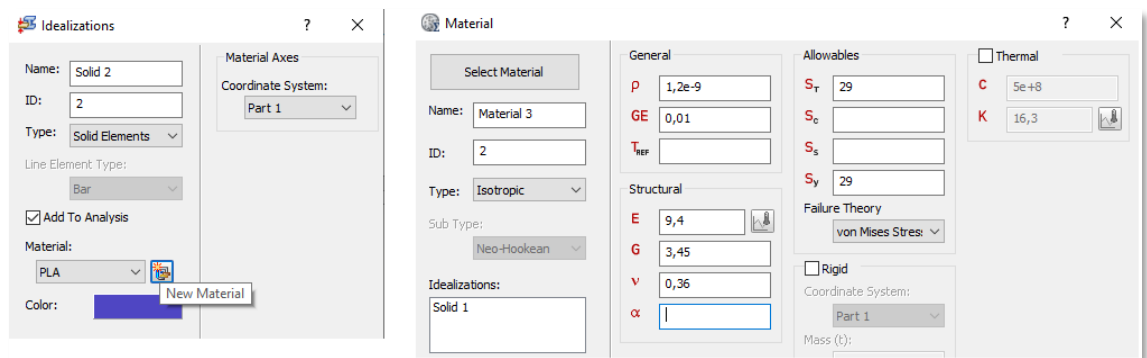
Fuente: Autores

Previo a la ejecución de la simulación, se deben configurar ciertos parámetros para el cálculo correcto de esfuerzos y deformaciones en la estructura. En primer lugar, se deben determinar las superficies de contacto en el modelo 3D y para ello, se usará la herramienta automática de asignación de condiciones de contacto. Luego, se debe determinar el tipo de elemento que se usará en el análisis dependiendo de la geometría de la estructura, en la sección

“Idealizations”. Para cuerpos con espesores considerables como el de la metaestructura seleccionada, se deben usar elementos sólidos (*Solid elements*).

Se debe asignar el material deseado al sólido a evaluar. En este caso, el material es el poliuretano termoplástico (TPU). Con el botón de “*New material*”, se abre una ventana en donde se pueden especificar las propiedades mecánicas del material.

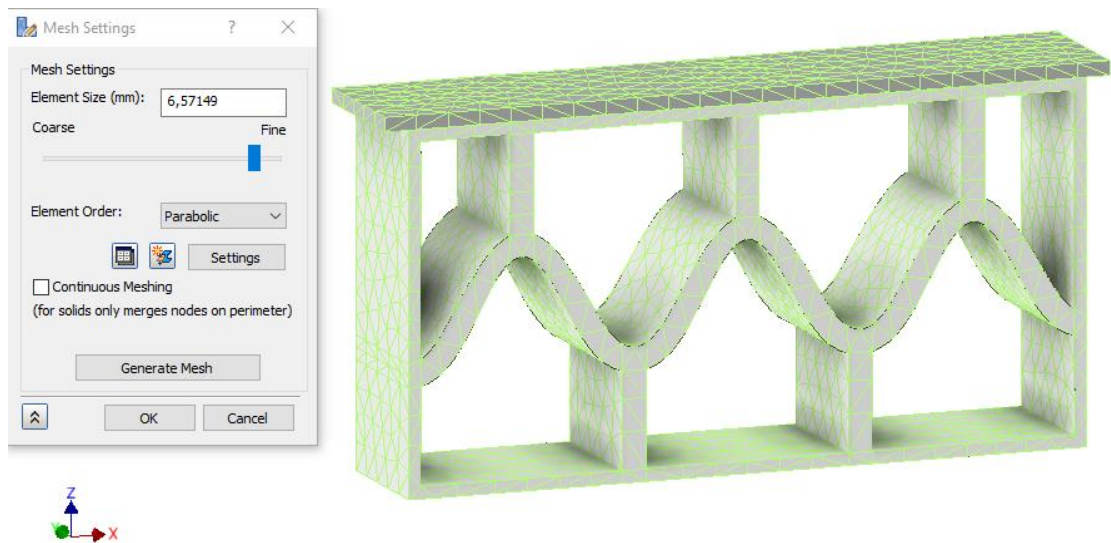
Figura 25. Selección del tipo de elemento y especificación de las propiedades del material.



Fuente: Autores

Posteriormente se debe configurar el mallado que el programa usará para el análisis de elementos finitos. Se debe seleccionar un tamaño de elemento lo suficientemente pequeño para lograr resultados más precisos, pero teniendo en cuenta las restricciones de desempeño del computador en donde se corre el programa.

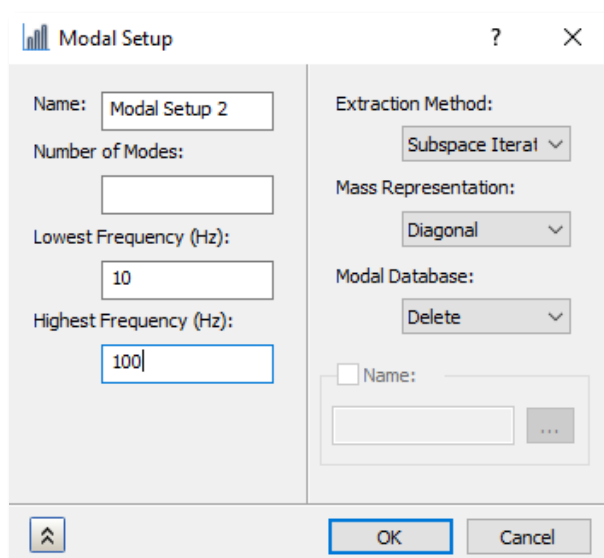
Figura 26. Mallado para el análisis de elementos finitos.



Fuente: Autores

En la configuración del análisis modal, se deben especificar los límites del rango de frecuencias que se analizarán en la simulación. En este caso, se hará un estudio desde una frecuencia mínima de 10 Hz, hasta una frecuencia máxima de 100 Hz, debido a que en este rango trabajan la mayoría de los elementos de aplicaciones industriales.

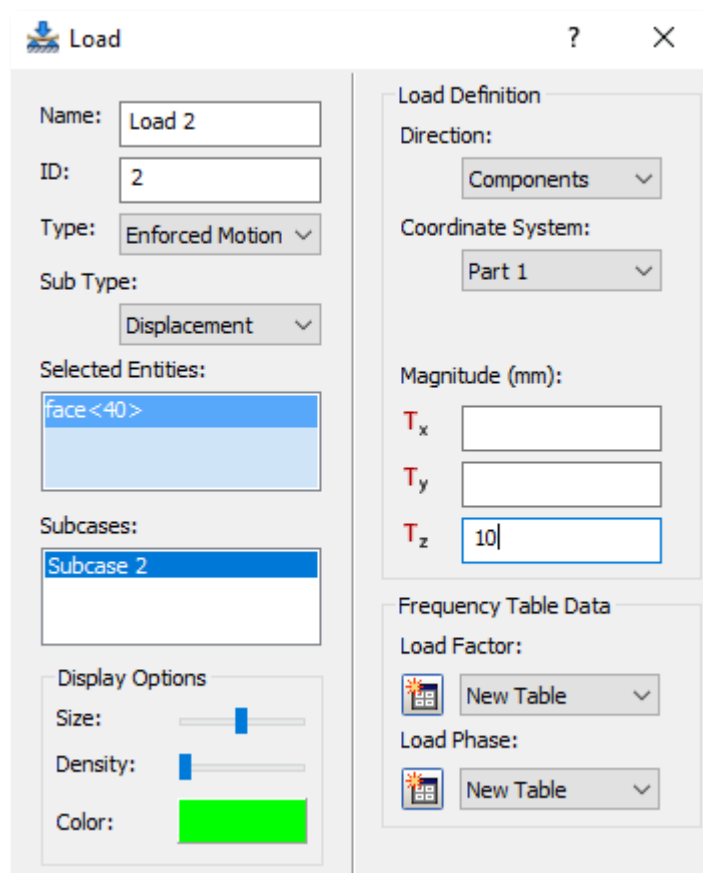
Figura 27. Configuración del análisis modal



Fuente: Autores

Después de configurar el análisis modal, se procede a determinar la dirección, posición y magnitud de las cargas. El modelo estará sometido a 3 cargas: una carga de excitación, una carga debido a la masa ubicada sobre la estructura y una carga del peso de la estructura debida a la gravedad. Para ingresar una nueva carga se debe hacer clic en “New” en la sección “Loads”. Allí se especifica el tipo de carga, la cara donde se aplicará dicha carga, su magnitud y dirección en cada componente de las coordenadas rectangulares.

Figura 28. Ventana de ingreso de nueva carga



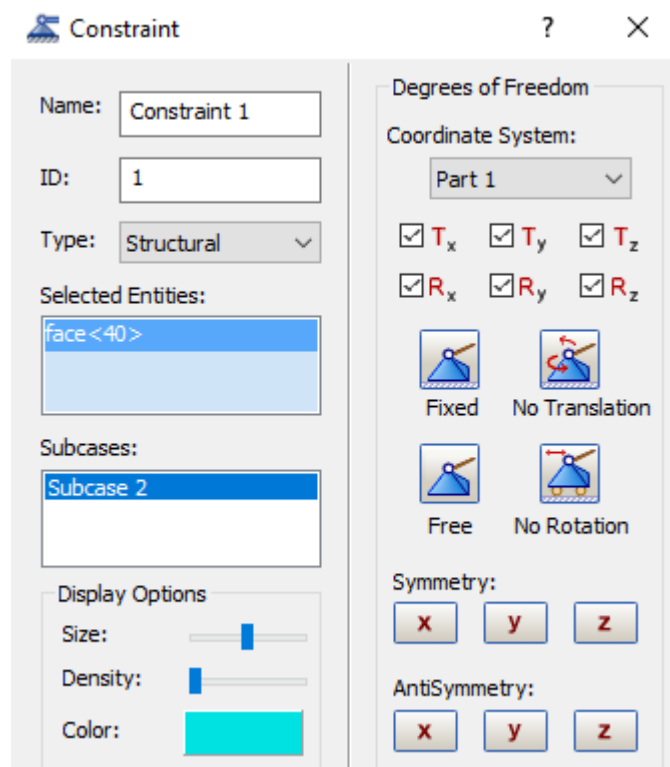
Fuente: Autores

La carga de excitación se define como un movimiento de la base del material, producto del accionamiento del pistón de un excitador (“*shaker*”). Para la simulación, se seleccionó movimiento forzado (“*Enforced motion*”) como el tipo de carga, con una magnitud de 10 mm en el eje Z+, que corresponde con el

rango de movimiento del *shaker* TIRA TV 51120²⁶, el cual es muy usado para pruebas experimentales de laboratorio. Para la fuerza de gravedad, se selecciona el tipo “Gravity” y se especifica la aceleración de 9,81 m/s² en el eje Z-, mientras que la carga de la masa ubicada sobre el material es de tipo “Force” y tiene un peso de 150 N en dirección de Z-.

Luego de agregar las 3 cargas, se debe especificar la restricción de movimiento en la superficie inferior de la muestra. Esta restricción representa la acción de fijar la muestra al dispositivo que realizará la excitación.

Figura 29. Restricciones de movimiento para el modelo.



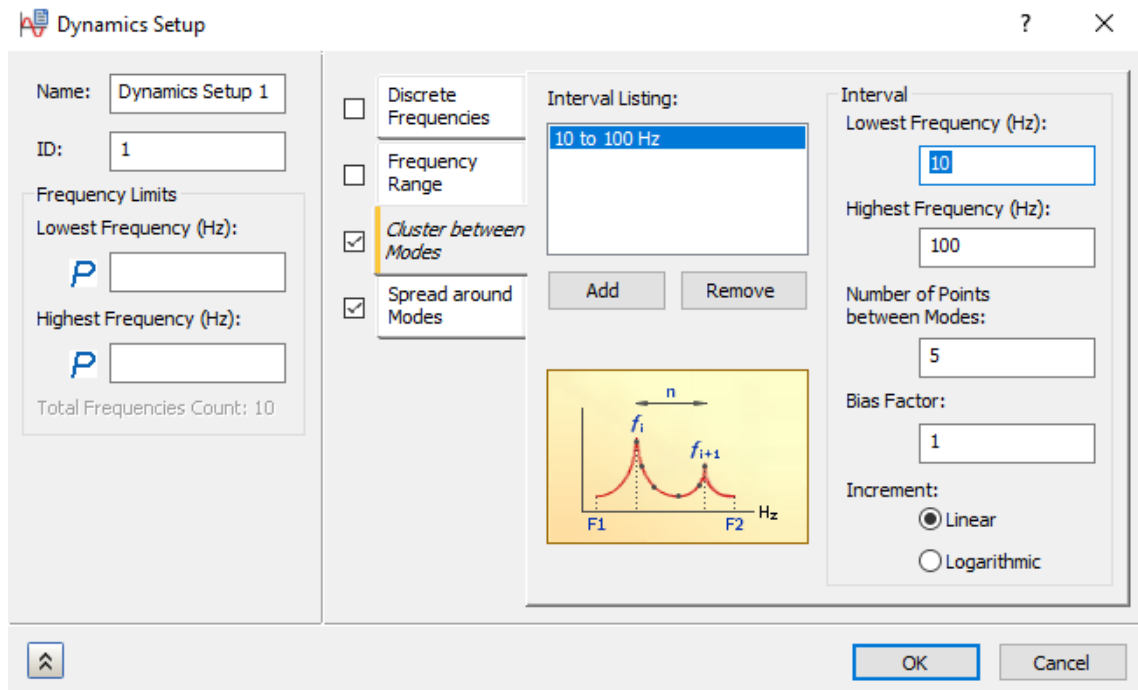
Fuente: Autores

El último paso antes de correr la simulación consiste en configurar el orden en el que el programa presenta los resultados. Se seleccionan dos tipos de organización: “Cluster between modes” calcula resultados en un determinado

²⁶ TIRA Vibration Test Systems. Vibration Test System TV 51120. Datasheet. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2XmI5Zy>

número de puntos entre los modos de vibración del cuerpo y “*Spread around modes*” calcula resultados en puntos cercanos a los modos de vibración.

Figura 30. Configuración del cálculo de los resultados de la simulación.



Fuente: Autores

Finalmente, se ejecuta la simulación haciendo clic en el botón de “*Run*”.

4.2. CÁLCULO DE LA TRANSMISIBILIDAD DE LA ESTRUCTURA

Una vez ha finalizada la simulación, se pueden obtener los valores de transmisibilidad a partir de los resultados obtenidos con el *software*. La transmisibilidad se define como la razón entre la magnitud del desplazamiento de la muestra y la magnitud del desplazamiento de la excitación. Se puede escribir de forma porcentual mediante la siguiente fórmula.

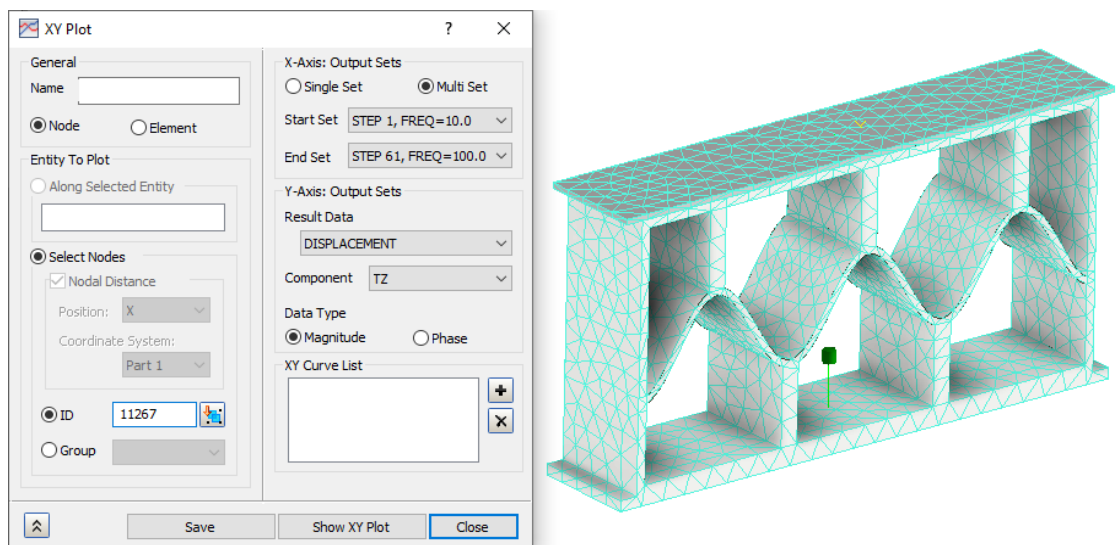
$$\text{Transmisibilidad (\%)} = \frac{\text{Desplazamiento de la muestra}}{\text{Desplazamiento de la excitación}} * 100\%$$

La carga de excitación sobre la muestra indica que el desplazamiento generado por la fuerza externa será de 10 mm en el eje Z+, por ende, la transmisibilidad

se mide con respecto a este valor (si el desplazamiento de la muestra es igual a 10 mm, la transmisibilidad es del 100%).

Para obtener los valores del desplazamiento de la muestra para todas las frecuencias analizadas, se debe realizar una nueva gráfica en la sección “XY Plot” de la simulación. Allí se debe seleccionar cualquier nodo de la superficie superior de la muestra y se debe especificar la variable de estudio y su respectivo eje, que en este caso es desplazamiento en el eje Z.

Figura 31. Creación de la gráfica de desplazamiento en Z de la muestra.



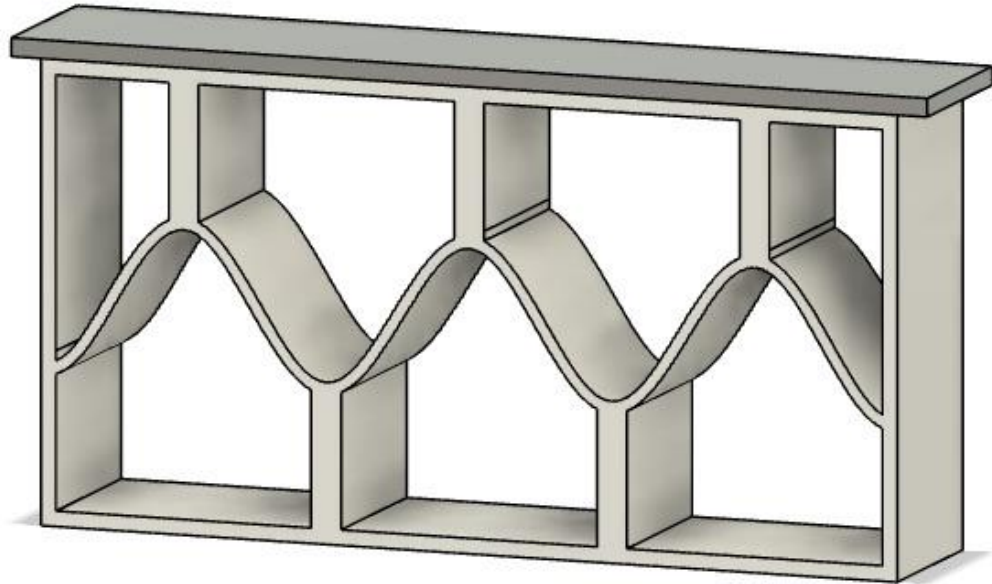
Fuente: Autores

A partir de los datos de la gráfica, se pueden obtener fácilmente los valores de transmisibilidad para el rango de frecuencias entre 10 y 100 Hz.

4.3. MODIFICACIONES A LA ESTRUCTURA SELECCIONADA

Con el fin de evaluar el funcionamiento de la estructura seleccionada, se realizará un estudio de cargas dinámicas para dos espesores distintos de la pared intermedia curva, con el fin de seleccionar el que presente mejores transmisibilidades. Se plantea una disminución del espesor de la pared intermedia de la alternativa original de 5 a 2 mm, para reducir aún más la cantidad de material usada y aumentar la flexibilidad de esta alternativa. En la siguiente figura se muestra la alternativa modificada.

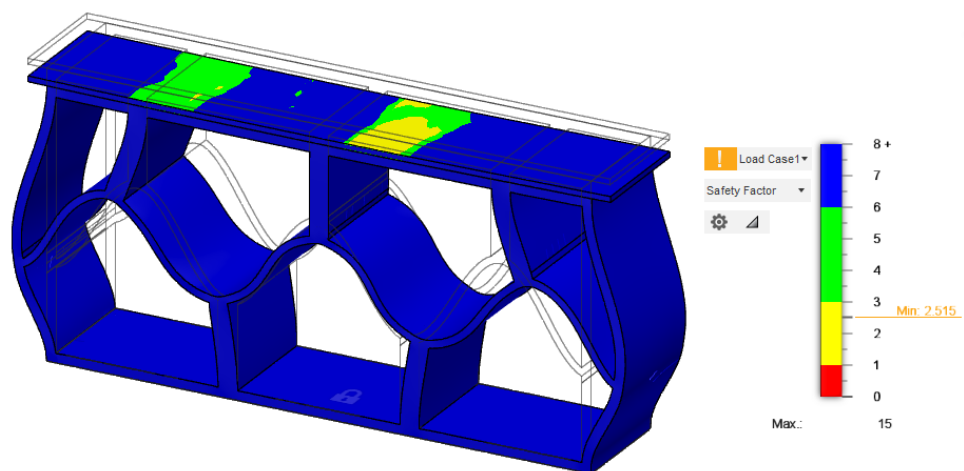
Figura 32. Modificación al espesor de la pared intermedia de la estructura seleccionada.



Fuente: Autores

Se debe evaluar si la estructura soporta las cargas estáticas a pesar de la reducción del espesor. Para ello se realiza un análisis estático en Fusion 360 y los resultados se encuentran en la siguiente figura.

Figura 33. Análisis estático de la estructura seleccionada con espesor $t=2$ mm.



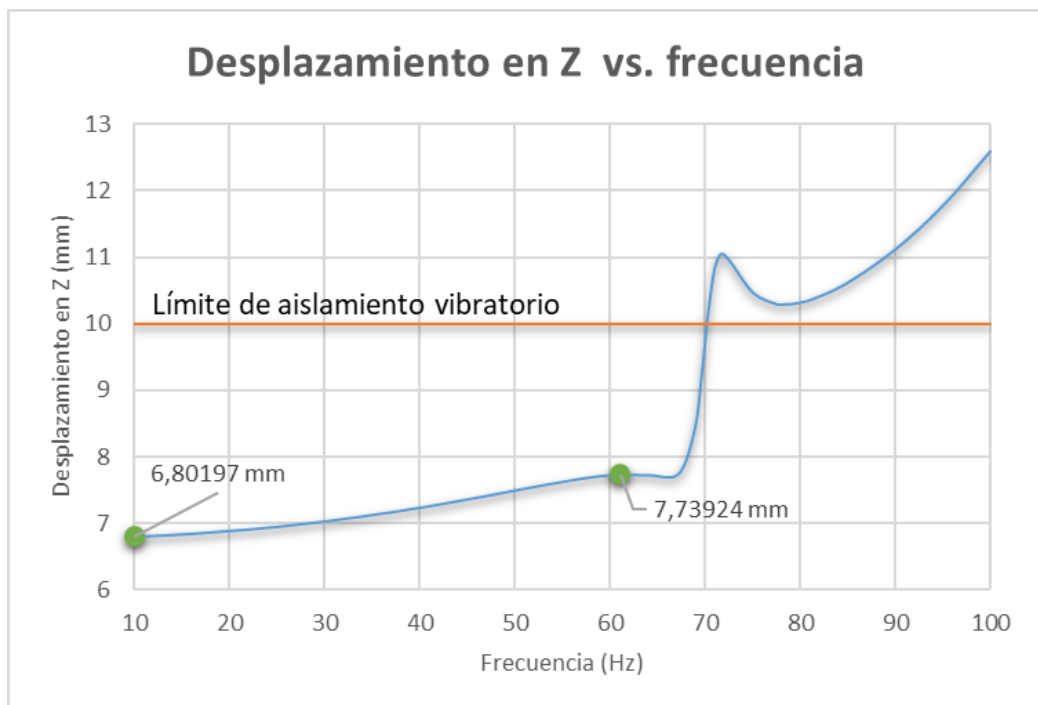
Fuente: Autores

El factor de seguridad mínimo calculado es de 2,5, sin embargo, este valor se encuentra en la placa que sostiene la carga en la superficie superior del metamaterial. La estructura presenta factores de seguridad mayores a 8 en toda su geometría.

Ahora, se procede a ejecutar las simulaciones para evaluar la respuesta dinámica de ambas estructuras. En las figuras 34 y 35 se grafican los resultados obtenidos de desplazamiento en Z (mm) vs. Frecuencia (Hz) para ambas muestras.

La estructura con una curva armónica de espesor $t=5$ mm presenta transmisibilidades menores al 100% para frecuencias menores a 70 Hz, por lo tanto, este es el límite máximo en el que esta estructura puede amortiguar vibraciones. En este rango, la estructura presenta transmisibilidades entre 68% y 77,4%.

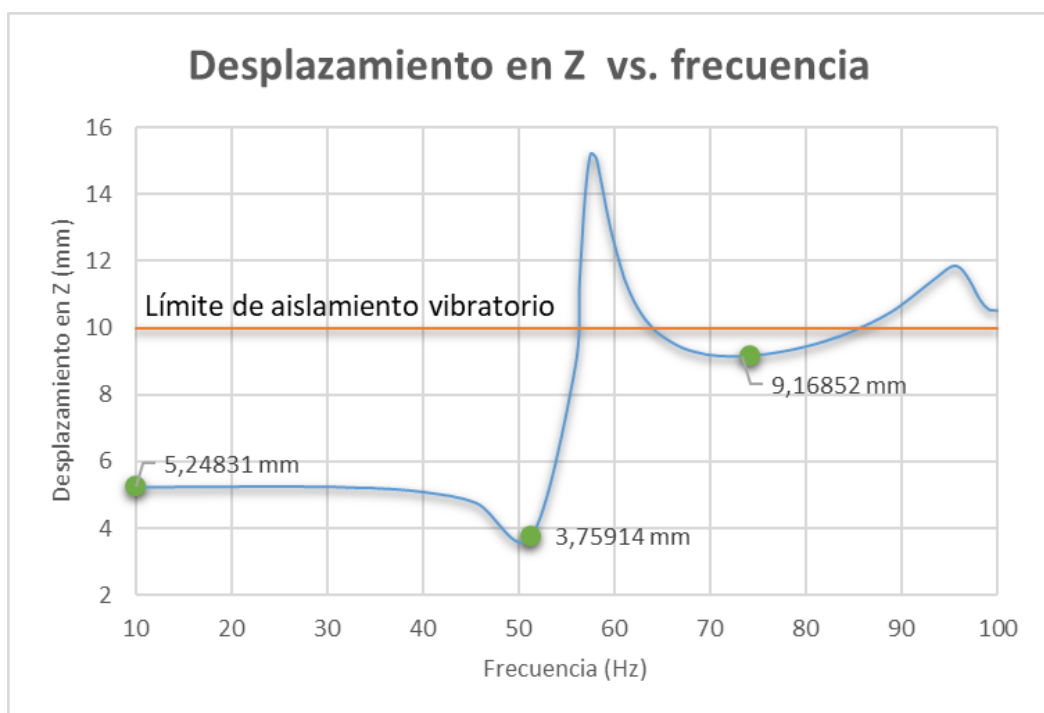
Figura 34. Desplazamiento en Z de la estructura con curva armónica de espesor $t=5$ mm.



Fuente: Autores

La estructura con espesor de 2 mm presenta transmisibilidades menores al 100% para frecuencias menores a 56 Hz. En el inicio de la operación, la transmisibilidad se estabiliza en un 52,5% y luego alcanza un pico mínimo de 37,6% en una frecuencia de 51,5 Hz. Después de entrar en resonancia, esta estructura presenta transmisibilidades menores al 100% en un pequeño rango de frecuencias desde 65 a 85 Hz, donde se alcanza una transmisibilidad del 91,7%.

Figura 35. Desplazamiento en Z de la estructura con curva armónica de espesor $t=2$ mm.



Fuente: Autores

De acuerdo con los resultados obtenidos de las simulaciones, se puede afirmar que la estructura con un espesor de 2 mm logra disminuir la transmisión de vibraciones de manera más eficiente que la estructura con espesor de 5 mm, debido a que logra valores de transmisibilidad mucho más bajos. Sin embargo, cabe recalcar que para frecuencias entre 56 y 70 Hz, el comportamiento de la estructura de espesor de 5 mm es mejor. El uso de cualquier estructura dependerá de la frecuencia de operación que presente la aplicación. En el

estudio dinámico de los elementos disipativos adicionales, se evalúa la estructura con curva armónica con espesor de 2 mm.

4.4. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA ELEMENTOS DISIPATIVOS

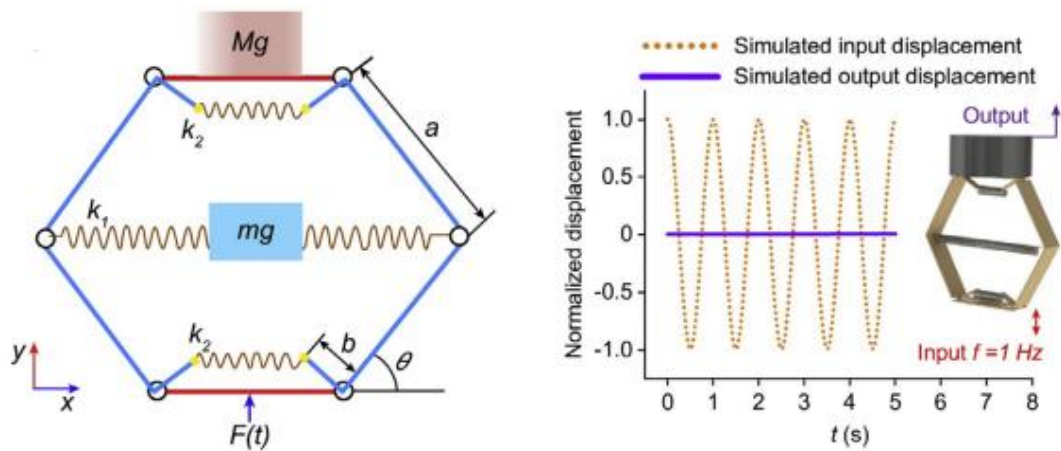
Los elementos disipativos pueden ser de tipo resorte, resonadores o hilos tensores. Se evaluará el comportamiento de cada una de estas alternativas mediante simulaciones de vibración con el fin de seleccionar la que presente el mejor comportamiento bajo carga dinámica. Se busca que la estructura recupere su forma original en el menor tiempo posible en cada ciclo de la vibración.

Las alternativas fueron recopiladas de diversos artículos sobre disipación de energía de vibración, y consisten en elementos adicionales que se ubicarán en la estructura seleccionada en el capítulo 3.

4.4.1. Resortes horizontales: El uso de resortes horizontales en estructuras de metamaterial para supresión de vibraciones ya ha sido demostrado y estudiado en diversos artículos. En un estudio reciente de estructuras hexagonales de metamaterial con resortes horizontales como elementos disipativos²⁷, se logra una transmisibilidad aproximadamente igual a cero. La idea de esta alternativa es que la energía cinética de entrada sea convertida en energía potencial almacenada en los resortes de la estructura.

²⁷ WU, Lingling, et al. Mechanical metamaterials for full-band mechanical wave shielding. Applied Materials Today, 2020. Volume 20. 8 p.

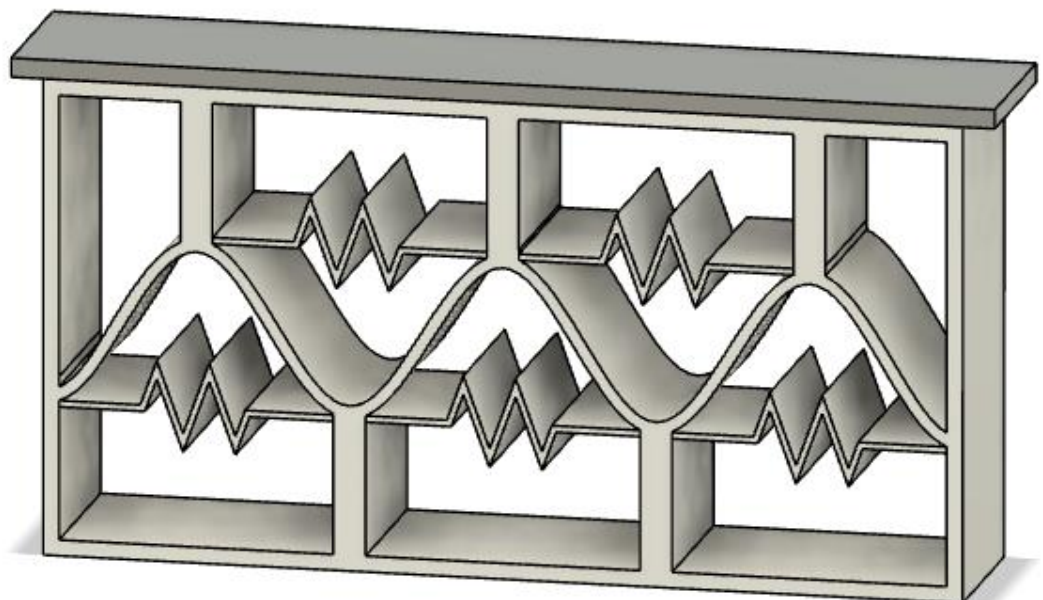
Figura 36. Uso de resortes horizontales para disipación de energía vibratoria en metamaterial hexagonal.



Fuente: WU, Lingling, et al. Mechanical metamaterials for full-band mechanical wave shielding. Applied Materials Today, 2020. Volume 20. p. 2.

En la estructura seleccionada, se ubican los resortes de manera que queden sujetos entre los soportes verticales, justo por encima y por debajo de la estructura curva media, tal como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 37. Alternativa de resortes horizontales

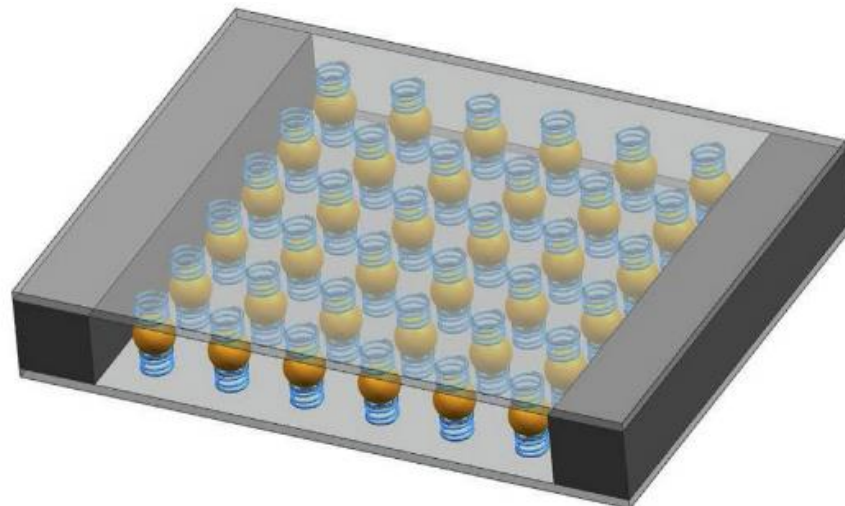


Fuente: Autores

La posición de los resortes en la estructura se debe a que en la zona intermedia se presentan las deformaciones más pronunciadas (Anexo A).

4.4.2. Resortes verticales: El uso de resortes verticales para suprimir vibraciones en metamateriales también ha sido documentado en varios artículos. En “Design for structural vibration suppression in laminate acoustic metamaterials”²⁸, se describe el uso de sistemas masa-resorte verticales con el fin de distribuir la energía de vibración en estos elementos.

Figura 38. Uso de resortes verticales para disipación de energía vibratoria en láminas de metamaterial

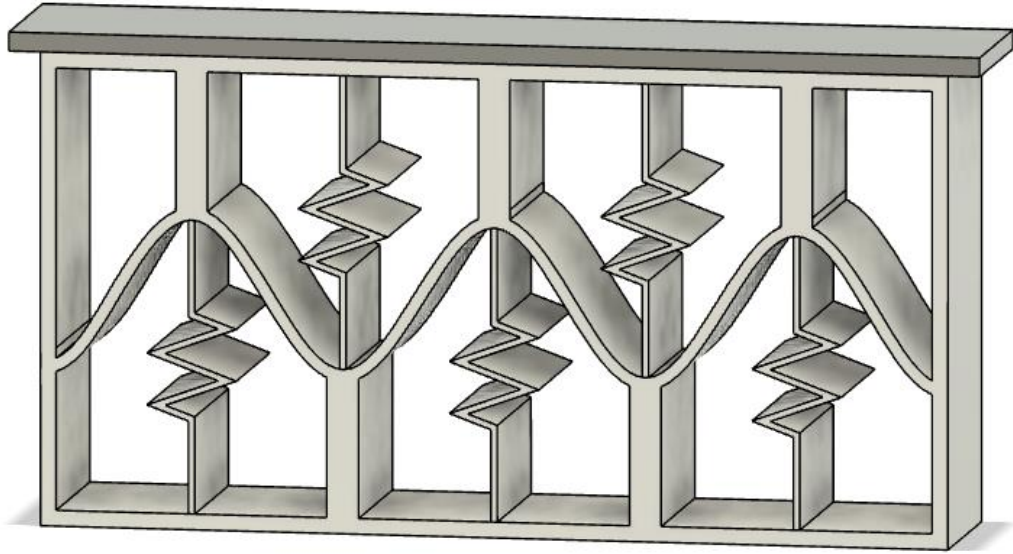


Fuente: HE, Z. C.; XIAO, X. y LI, Eric. Design for structural vibration suppression in laminate acoustic metamaterials. Composites Part B, 2017. Volume 131. p. 240.

Para nuestra alternativa de estructura seleccionada, se planea ubicar los resortes verticales en los espacios entre soportes verticales, conectados entre la curva sinusoidal media y los extremos superior e inferior del metamaterial, como se puede observar en la siguiente figura.

²⁸ HE, Z. C.; XIAO, X. y LI, Eric. Design for structural vibration suppression in laminate acoustic metamaterials. Composites Part B, 2017. Volume 131. p. 237-252.

Figura 39. Alternativa de resortes verticales.



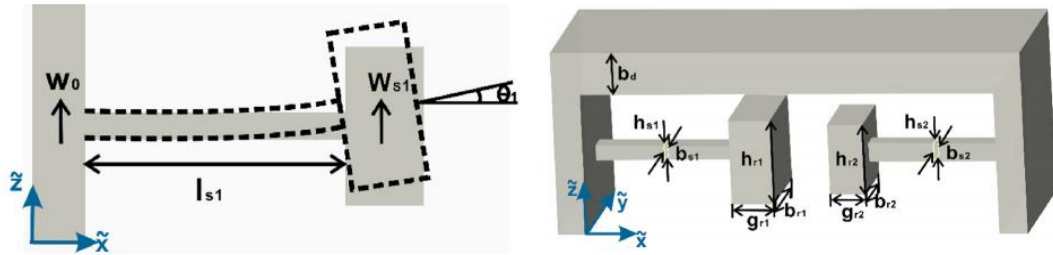
Fuente: Autores

4.4.3. Resonadores: Es posible añadir masas en determinadas ubicaciones de una estructura con el fin de que actúen como amplificadores del movimiento de vibración. Esto permite la conversión eficiente de la energía cinética de vibración en energía cinética de las masas resonadoras, sin afectar la rigidez de la estructura. Si la energía cinética es localizada en las masas resonadoras, la estructura puede volver más rápidamente a su estado inicial.

Se han propuesto diversos resonadores locales para varios diseños de metamateriales, tales como resonadores Helmholtz, osciladores en voladizo, membranas con masas adheridas, anillos de caucho rodeados de anillos de metal, y muchos más. Un ejemplo de los resonadores en voladizo se puede encontrar en un estudio reciente sobre supresión de vibraciones en un tubo de aluminio²⁹, en donde se usaron masas suspendidas de metamaterial a lo largo del tubo.

²⁹ NATEGHI, A., et al. Design and experimental validation of a metamaterial solution for improved noise and vibration behavior of pipes. *Journal of Sound and Vibration*, 2019. Volume 455. 22 p.

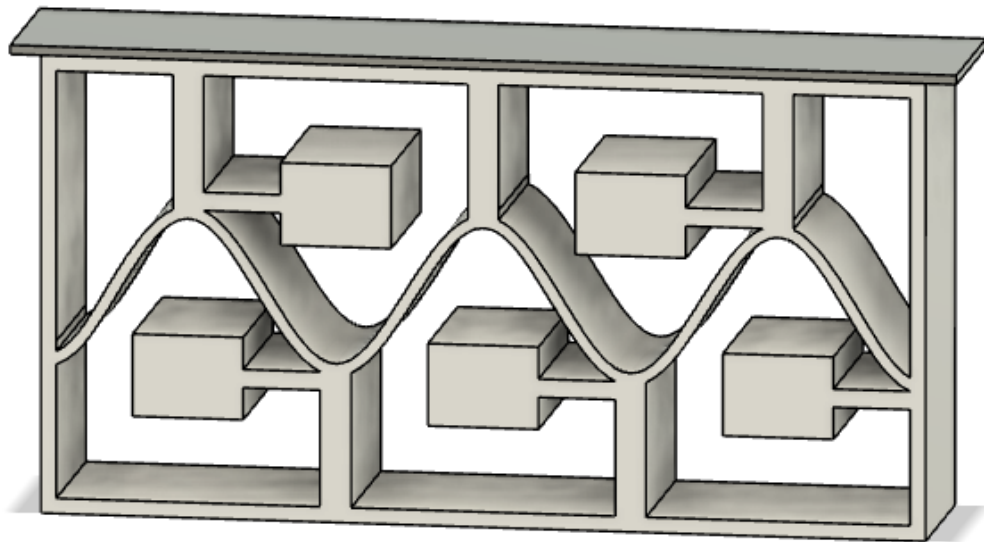
Figura 40. Esquema de funcionamiento de resonadores en voladizo



Fuente: MENG, H., et al. Rainbow metamaterials for broadband multi-frequency vibration attenuation: Numerical analysis and experimental validation. Journal of Sound and Vibration, 2020. Volume 465. p. 3.

Para la estructura seleccionada en el capítulo 3, se propone usar resonadores en voladizo conectados horizontalmente en los soportes verticales, con el fin de que su movimiento esté en la dirección de la fuerza externa que provoca la vibración. El modelo 3D se puede observar en la siguiente figura.

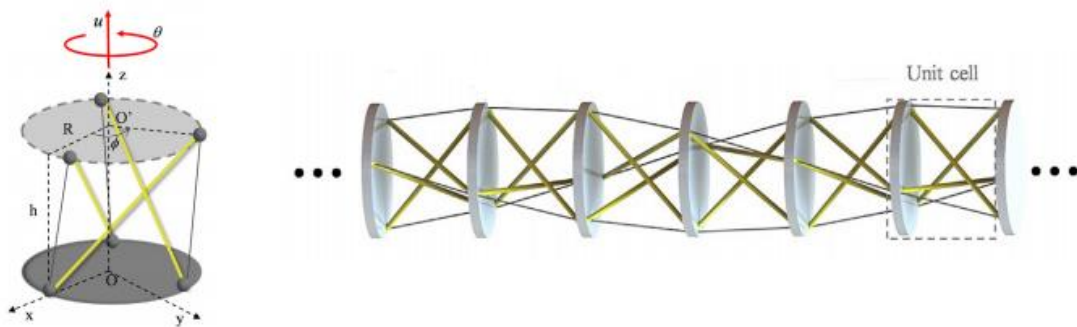
Figura 41. Alternativa de resonadores



Fuente: Autores

4.4.4. Hilos tensores: Diversos tipos de hilos elásticos pueden ser usados en aplicaciones de control o aislamiento de vibraciones y sus materiales incluyen goma, caucho o nylon. En el artículo “Prestress-controlled asymmetric wave propagation and reciprocity-breaking in tensegrity metastructure”³⁰, se estudió el comportamiento de una estructura con barras de PLA e hilos de nylon para control de vibraciones torsionales y axiales respectivamente.

Figura 42. Uso de hilos tensores para disipación de energía vibratoria en metaestructura.

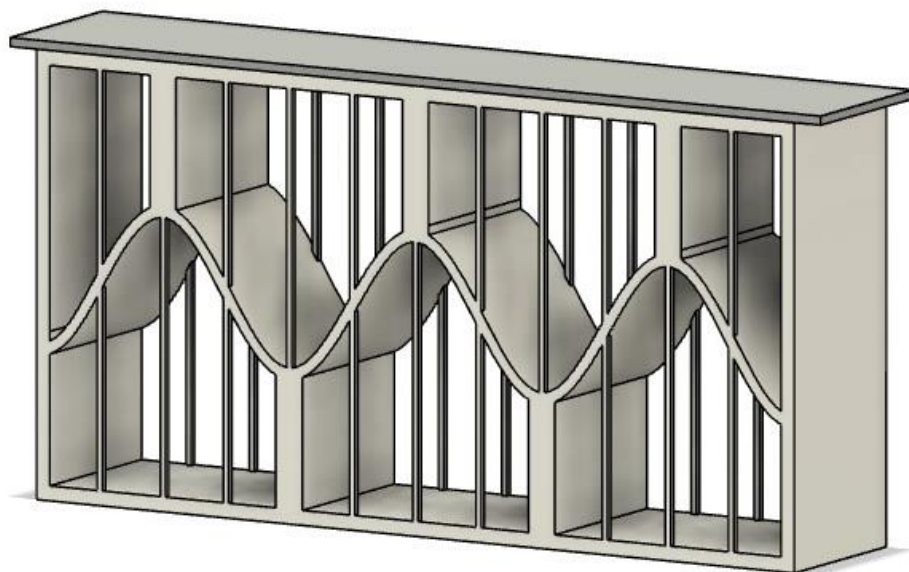


Fuente: WANG, Yitian, et al. Prestress-controlled asymmetric wave propagation and reciprocity-breaking in tensegrity metastructure. Extreme Mechanics Letters, 2020. Volume 37. p. 3.

Para nuestro caso, se propone usar hilos de nylon al interior de la estructura, con el fin de que actúen como tensores cuando el metamaterial se expanda más allá de su posición de equilibrio. Esto provocará que el material recupere más rápidamente su estado inicial. La distribución de los hilos se puede observar en la siguiente figura.

³⁰ WANG, Yitian, et al. Prestress-controlled asymmetric wave propagation and reciprocity-breaking in tensegrity metastructure. Extreme Mechanics Letters, 2020. Volume 37. 10 p.

Figura 43. Alternativa de hilos tensores.



Fuente: Autores

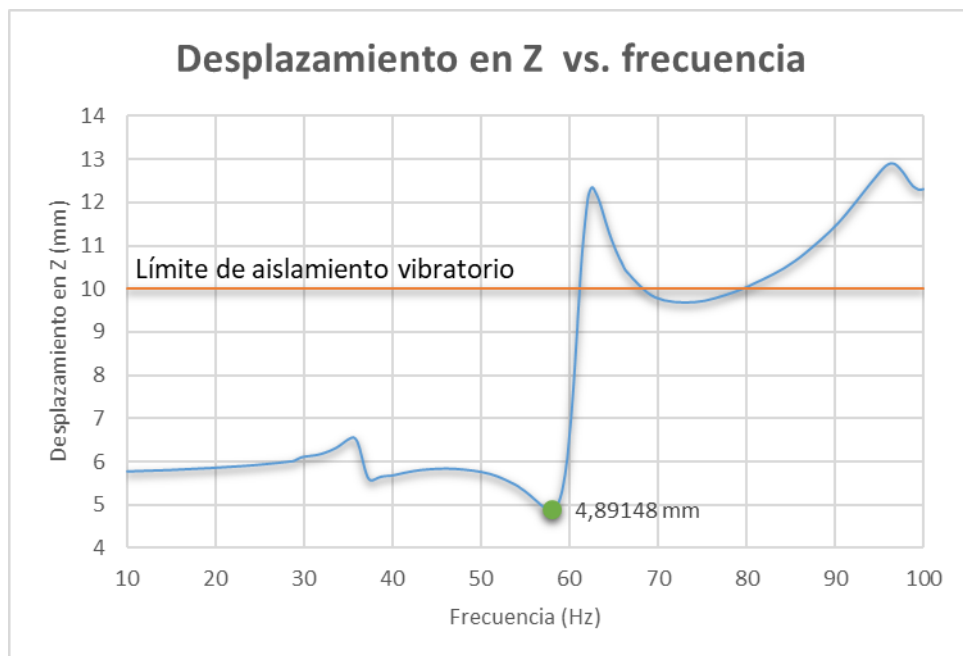
5. VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS DE ELEMENTOS DISIPATIVOS

Con el objetivo de encontrar la configuración que mejor se comporte frente a las cargas dinámicas, se evaluarán diferentes tamaños de las alternativas de elementos disipativos para la estructura seleccionada. La alternativa que presente valores más bajos de transmisibilidad será la seleccionada para el diseño final.

5.1. RESORTES HORIZONTALES

Para la propuesta de resortes horizontales, se evaluarán 2 muestras con espesores de resortes de 1 y 2 mm. Los resultados del desplazamiento de las muestras en el eje Z se encuentran a continuación.

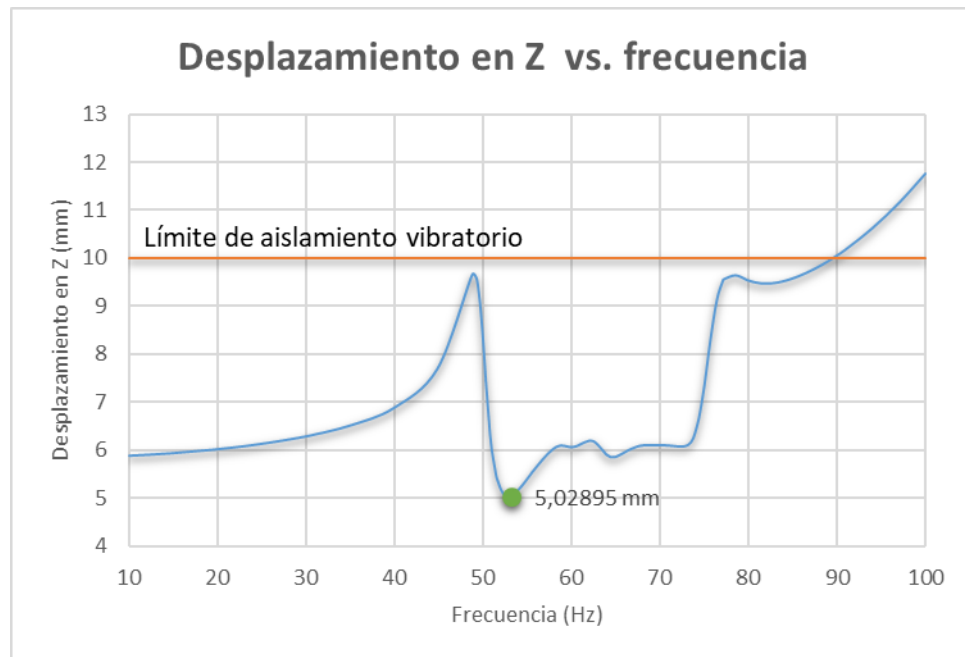
Figura 44. Desplazamiento en Z de la estructura con resortes horizontales de $t=1$ mm.



Fuente: Autores

Cuando el espesor del resorte es de 1 mm, la estructura alcanza un desplazamiento mínimo de 4,89 mm, equivalente a una transmisibilidad del 48,9% cuando la frecuencia de operación es de 58 Hz. Esta estructura funciona como amortiguador de vibraciones en un rango de frecuencias menores a 62 Hz.

Figura 45. Desplazamiento en Z de la estructura con resortes horizontales de $t=2$ mm.



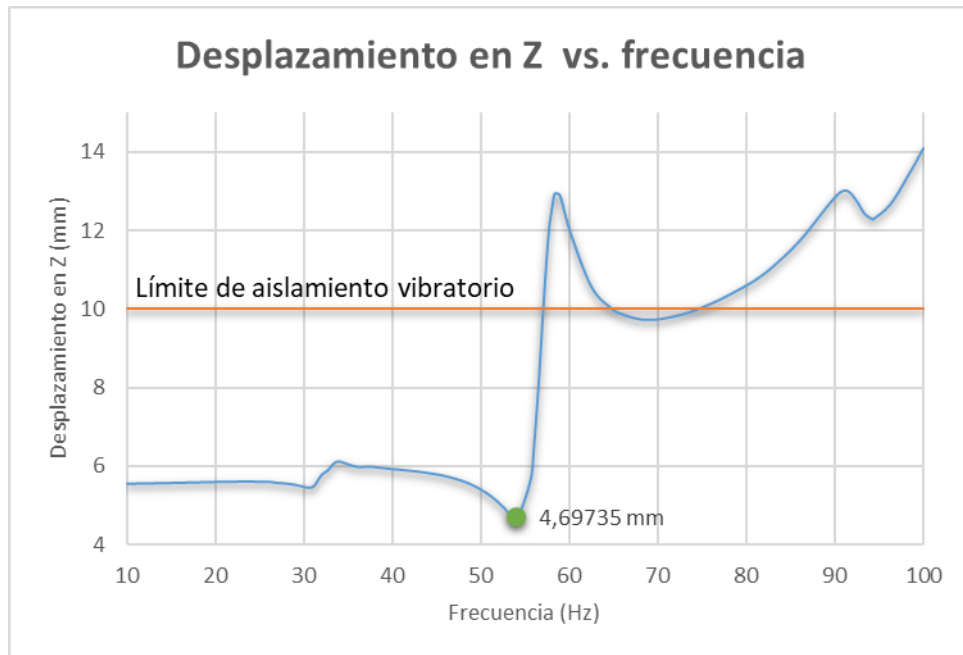
Fuente: Autores

Si se aumenta el espesor del resorte a 2 mm, el desplazamiento mínimo que se logra es de 5,03 mm para una frecuencia de operación de 53 Hz, lo cual representa una transmisibilidad más alta que la alternativa de resortes de espesor de 1 mm. Sin embargo, esta alternativa tiene la capacidad de amortiguar vibraciones en un rango de frecuencias mayor, llegando así hasta 89 Hz.

5.2. RESORTES VERTICALES

Para la propuesta de resortes *verticales*, se evaluarán 2 muestras con espesores de resortes de 1 y 2 mm. Los resultados del desplazamiento de las muestras en el eje Z se encuentran a continuación.

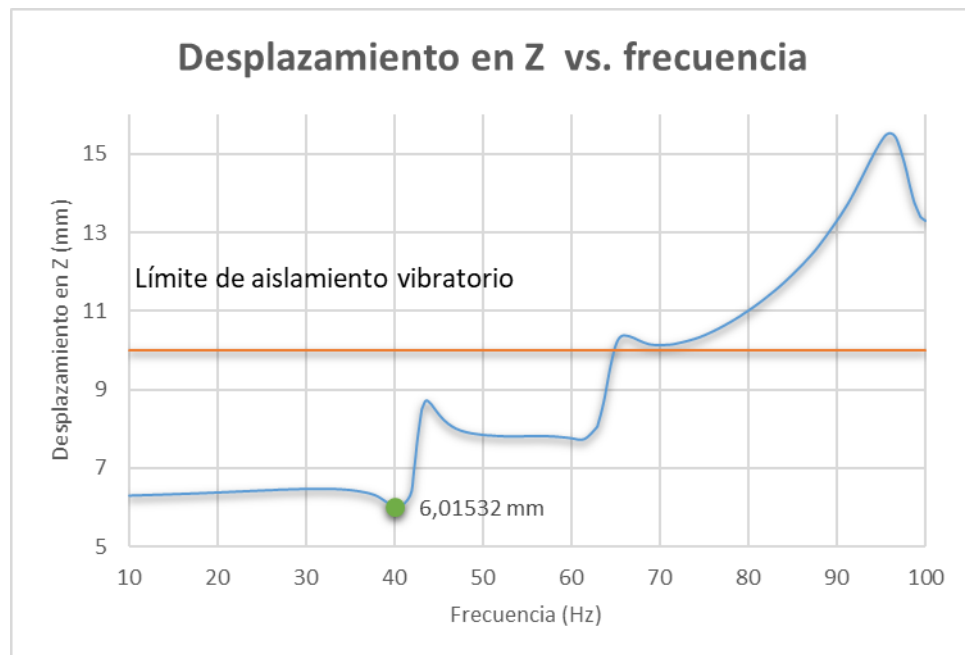
Figura 46. Desplazamiento en Z de la estructura con resortes verticales de t=1 mm.



Fuente: Autores

La transmisibilidad mínima lograda con la alternativa de resortes verticales de 1 mm de espesor es de 47% y se encuentra en una frecuencia de operación de 54 Hz. Esta estructura puede amortiguar vibraciones en frecuencias menores a 57 Hz en donde sobrepasa el valor de desplazamiento inicial, se vuelve un potencializador y deja de ser una alternativa para disipar vibraciones.

Figura 47. Desplazamiento en Z de la estructura con resortes verticales de t=2 mm.



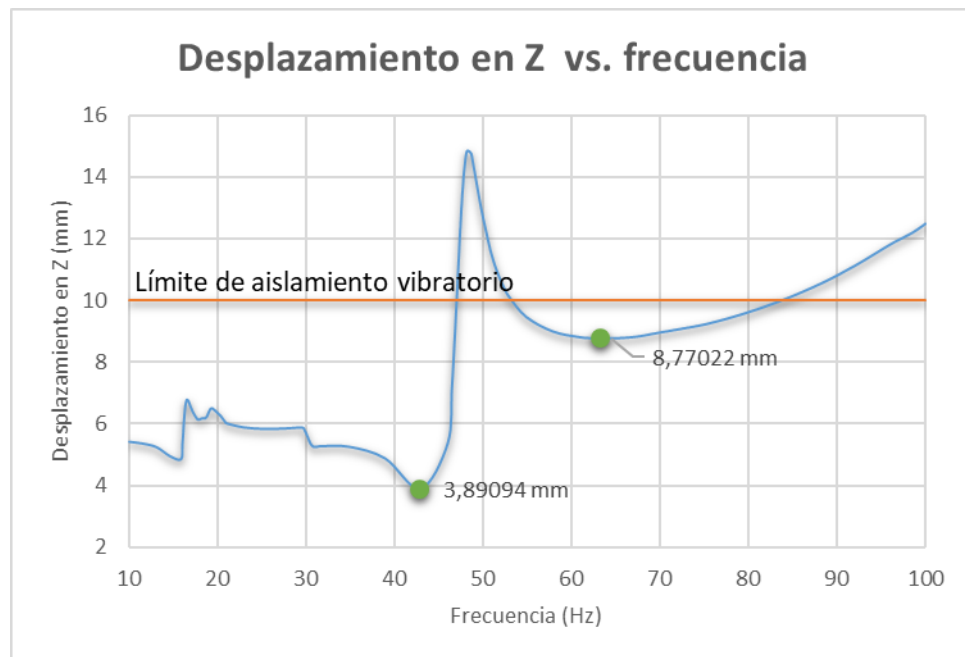
Fuente: Autores

Para la alternativa de resortes verticales de 2 mm de espesor, la transmisibilidad obtenida es de un 60% aproximada hasta los 40 Hz. Esta disminución en la efectividad del aislamiento de vibraciones se debe a que un aumento en el espesor de los resortes hace que la estructura se vuelva más rígida, lo cual evita la absorción de vibraciones por las deformaciones de la muestra, no obstante, es importante recalcar que con el cambio en el espesor se aumenta el rango de trabajo de la estructura y se disminuye la creciente presentada en la anterior muestra.

5.3. RESONADORES

Para la propuesta de resonadores, se evaluarán 2 muestras con dimensiones de 18x13,5x30 mm y 9x9x30 mm. Los resultados del desplazamiento de las muestras en el eje Z se encuentran a continuación.

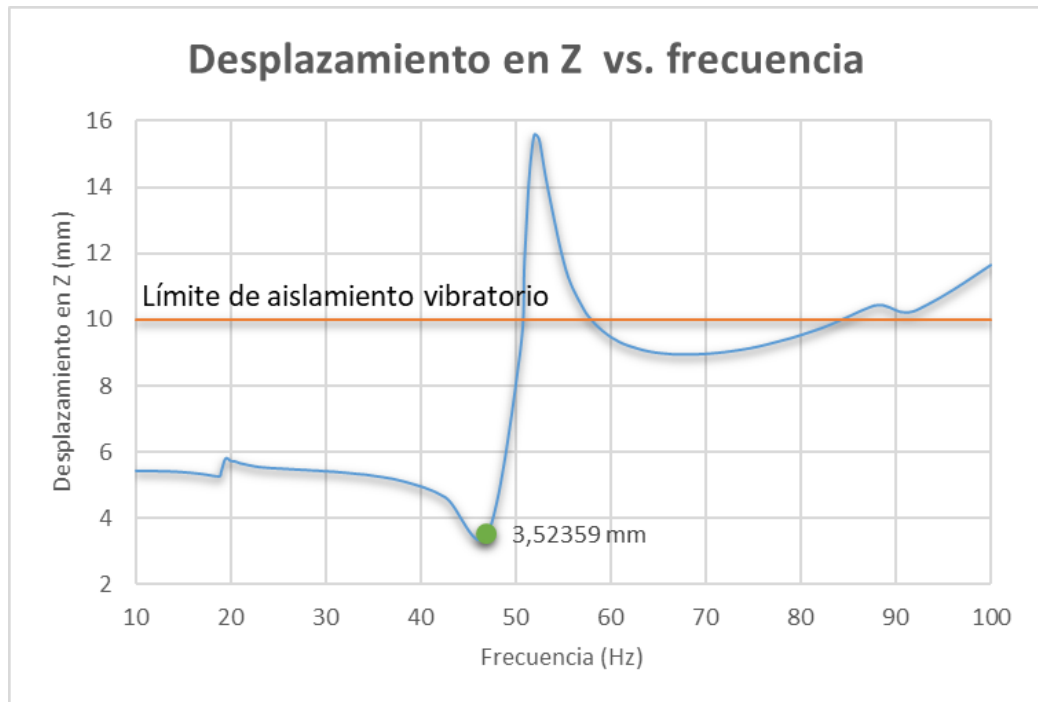
Figura 48. Desplazamiento en Z de la estructura con resonadores de 18x13,5x30 mm.



Fuente: Autores

Esta estructura presenta una transmisibilidad mínima de 38,9% para una frecuencia de operación de 42,5 Hz. El rango de operación de esta muestra es significativamente más bajo en comparación con las demás, llegando hasta una frecuencia de 47 Hz. Después la estructura entra en una zona de resonancia, se presentan transmisibilidades menores al 100%, luego vuelve a descender entre los 53 y 83 Hz, con un mínimo local de 87,7%, lo cual representa una transmisibilidad muy alta para lo que se busca.

Figura 49. Desplazamiento en Z de la estructura con resonadores de 9x9x30 mm.



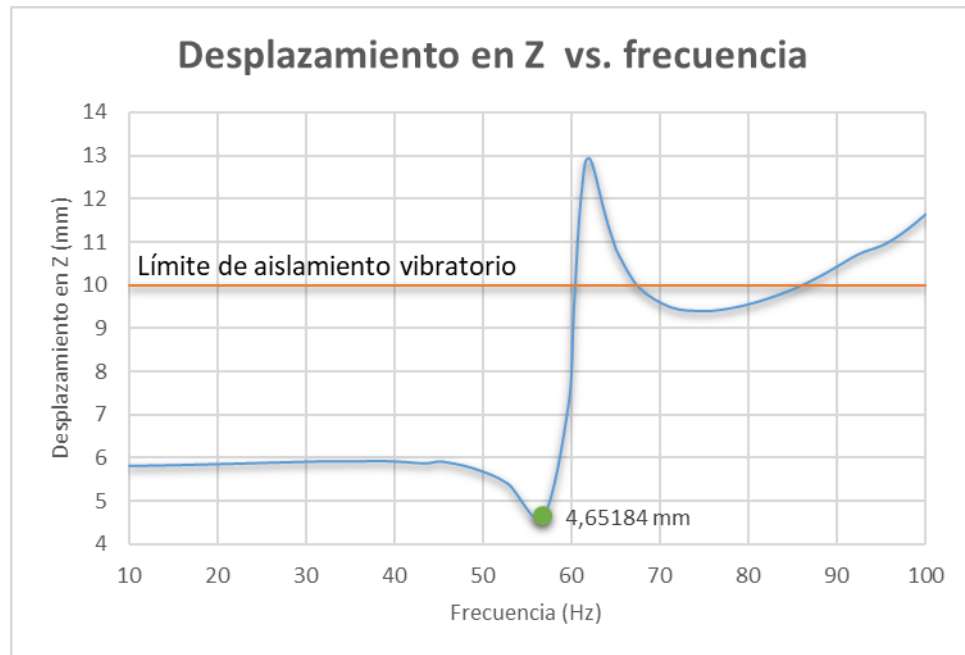
Fuente: Autores

La muestra con resonadores de 9x9x30 mm presenta una transmisibilidad mínima de 35,2%, obtenida en la frecuencia de 48 Hz. Esta muestra funciona como aislante vibratorio hasta una frecuencia de 51 Hz. También se puede observar que se obtiene una muestra con valores mas constantes y no tan fluctuantes como en la anterior.

5.4. HILOS TENSORES

Para la propuesta de hilos tensores, se evaluarán 2 muestras con espesores de hilos de 1 y 2 mm. Los resultados del desplazamiento de las muestras en el eje Z se encuentran a continuación.

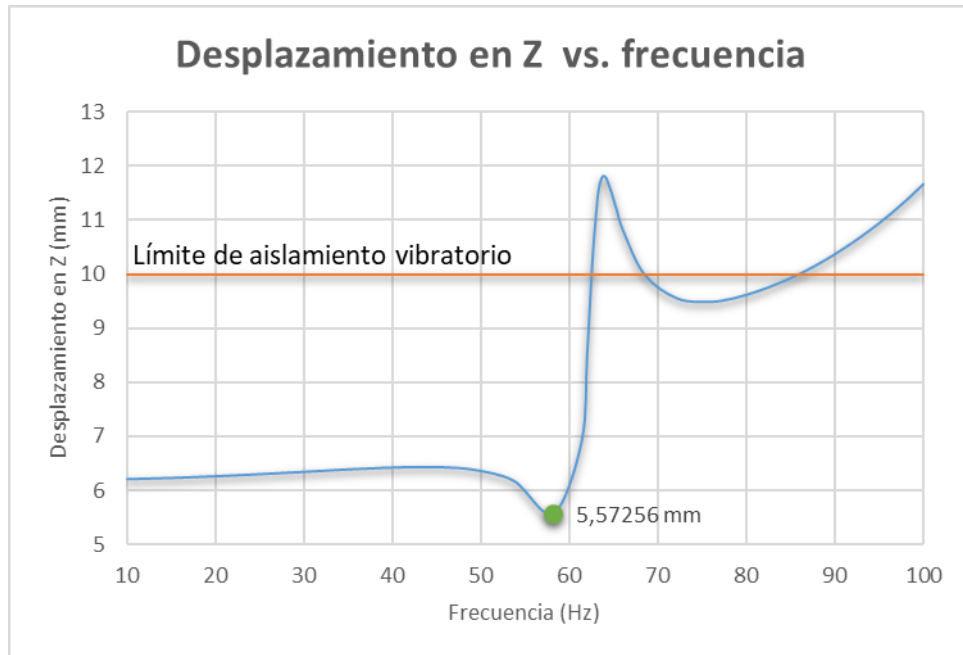
Figura 50. Desplazamiento en Z de la estructura con hilos tensores de $t=1$ mm.



Fuente: Autores

Se encuentra una transmisibilidad de 46,5% a una frecuencia de 57 Hz y su rango de operación es hasta los 60,5 Hz en donde se desenvuelve como disipador, luego de ahí sobrepasa el límite de aislante vibratorio trazado y no se puede utilizar de la manera deseada.

Figura 51. Desplazamiento en Z de la estructura con hilos tensores de $t=2$ mm.



Fuente: Autores

La estructura presenta un comportamiento estable hasta las frecuencias cercanas a las 50 Hz, luego de esto encontramos el rango de mejor comportamiento y donde alcanza una transmisibilidad mínima de 55% a los 58 Hz. Tiene un rango de operación hasta 62 Hz. Se observa que el comportamiento presentado por las 2 alternativas variando el espesor de los hilos es muy similar, la diferencia entre los datos encontrados por las 2 muestras es consistente.

5.5. SELECCIÓN DEL DISEÑO FINAL Y ANÁLISIS MODAL

En la siguiente tabla, se evidencian los resultados obtenidos de transmisibilidad y rango de operación para cada alternativa de elementos disipativos. Además, se presentan los valores de transmisibilidad promedio en los rangos de operación para cada estructura.

Tabla 7. Resumen de los resultados obtenidos para cada elemento disipativo.

Alternativa	Tamaño (mm)	Rango De Operación (Hz)	Transmisibilidad Mínima	Transmisibilidad Promedio
Resortes Horizontales	1	Hasta 62	48,9%	57,73%
	2	Hasta 89	50,3%	75,16%
Resortes Verticales	1	Hasta 57	47%	57,07%
	2	Hasta 65	60%	75,76%
Resonadores	18x13,5x30	Hasta 47	38,9%	60,07%
	9x9x30	Hasta 51	35,2%	56,12%
Hilos Tensores	1	Hasta 60,5	46,5%	59,18%
	2	Hasta 62	55,7%	64,32%

Fuente: Autores

Se puede observar que los valores de transmisibilidad mínima y transmisibilidad promedio más bajos se obtienen en la alternativa con resonadores de dimensiones 9x9x30 mm, por lo tanto, se seleccionará como el diseño final del aislante vibratorio. El siguiente paso es la caracterización de los modos de vibración de esta estructura, mediante un análisis modal realizado en el *software* Fusion 360. Los resultados de este análisis se encuentran en el anexo B.

6. CONCLUSIONES

- Se evaluó la transmisibilidad de un metamaterial diseñado para su fabricación mediante el modelado por deposición fundida y cuya aplicación es el aislamiento de vibraciones.
- Se definió la geometría de la celda unitaria del metamaterial mediante el análisis estático de diferentes alternativas y materiales compuestos. A partir de los resultados obtenidos se puede afirmar que:
 - ✓ El ácido poliláctico no es un buen material para la fabricación de aislantes vibratorios debido a su alta rigidez. En las simulaciones realizadas, la mayor deformación alcanzada para el PLA fue de 0,5052 mm, la cual no es suficiente para obtener transmisibilidades bajas.
 - ✓ El poliuretano termoplástico (TPU) es mucho más flexible que el PLA y con este material se obtienen buenos resultados tanto en esfuerzo como en deformación. Es por ello que este material fue seleccionado para el diseño final del aislante vibratorio.
 - ✓ La geometría seleccionada para la estructura del metamaterial consiste en una curva armónica intermedia soportada por láminas verticales de espesor de 5 mm. Esta alternativa presentó buenos resultados en esfuerzos y deformaciones y requiere una cantidad baja de material para su fabricación.
- Las modificaciones en el espesor de la curva armónica de la estructura producen cambios en los valores de transmisibilidad y en el rango de frecuencias en donde se amortiguan las vibraciones. La estructura con un espesor de 5 mm presenta un rango de frecuencias más amplio, mientras que la de espesor de 2 mm logra valores de transmisibilidad más bajos.

- Luego de evaluar la respuesta dinámica de los elementos disipativos adicionales del metamaterial, se hallaron los siguientes comportamientos:
 - ✓ La estructura con resonadores de dimensión 9x9x30 mm presenta las transmisibilidades más bajas en comparación con los demás elementos disipativos, con un valor mínimo de 35,2% y un valor promedio de 56,12%. Por lo tanto, esta fue la estructura seleccionada como el diseño final del aislante de vibraciones.
 - ✓ Los resortes verticales no presentan un funcionamiento deseado frente a la carga dinámica, debido a que las estructuras con estos elementos disipativos tienen las transmisibilidades más altas, con un valor mínimo de 60% y un valor promedio de 75,76%. Este comportamiento se debe a que los resortes verticales se oponen directamente a la deformación de la estructura, lo cual evita la disipación de la energía de vibración de una manera más eficiente.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas experimentales con modelos impresos en 3D de las alternativas evaluadas para validar los resultados obtenidos en las simulaciones, para estas pruebas es importante recordar que el TPU es un material viscoelástico y su comportamiento puede variar a el mostrado por la simulación.
- Para futuros estudios experimentales, se recomienda evaluar el comportamiento de diferentes materiales para la fabricación de los elementos disipativos.
- Indagando en el área de creación de prototipos por medio de tecnología aditiva (impresión 3D) se llega a la estereolitografía la cual es un proceso que permite la construcción de modelos con mayor resistencia (entre capa y capa en el proceso de manufactura), una amplia variedad de resinas en el mercado que se pueden alterar a conveniencia (modificación a propiedades), y una resolución de impresión impecable. Es por esto que se sugiere hacer uso de esta tecnología en futuras investigaciones derivadas del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

ACCURION. Compendium: Principles of Halcyonics Active Vibration Isolation Technology. 2020 [citado el 18 dic. 2020]. 2 p.

ALARCÓN CAMPOS, Sergio Carlos. Determinación de la razón de amortiguamiento en vigas de madera para uso en paneles CLT. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Concepción: Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental, 2015. p. 8-10.

ATRIA INNOVATION. ¿Qué son los metamateriales? Propiedades, beneficios y en qué campos se pueden emplear. Artículo [en línea]. 2020 [citado el 16 dic. 2020]. Disponible en internet: <http://bit.ly/3ajIPVY>

BENICHO, Itamar y GIVLI, Sefi. Force-sensitive metamaterials for vibration mitigation and mechanical protection. Elsevier: Extreme Mechanics Letters, 2020. Volume 40. p. 1.

BERTOLDI, Katia, et al. Flexible mechanical metamaterials. Nature Reviews Materials, 2017. Volume 2. Article number 17066. 11 p.

FARAH, Shady; ANDERSON, Daniel y LANGER, Robert. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications – A comprehensive review. Advanced Drug Delivery Reviews, 2016. Volume 107. p. 5.

GANGWAR, Kaushal y GANGWAR, R. P. S. Metamaterials: Characteristics, Process and Applications. Research India Publications, 2014 [citado el 16 dic. 2020]. Volume 4, Number 1. p. 97-106.

GIBSON, Lorna y ASHBY, Michael. Cellular Solids: Structure and properties. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 97.

HE, Z. C.; XIAO, X. y LI, Eric. Design for structural vibration suppression in laminate acoustic metamaterials. Composites Part B, 2017. Volume 131. p. 237-252.

HUA, Jian, et al. Parameters analysis and optimization of a typical multistable mechanical metamaterial. *Extreme Mechanics Letters*, 2020. Volume 35. p. 3.

IMPRESORAS 3D. Tipos de impresoras 3D. Artículo [en línea]. 2017 [citado el 22 dic. 2020]. Disponible en Internet: <https://www.impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/>

INGEOEXPERT. Fundamento y origen del Método de los Elementos Finitos (MEF). Artículo [en línea]. 2020 [citado el 23 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://bit.ly/34Ud3vp>

JAKSIC, Zoran; DALARSSON, Nils y MAKSIMOVIC, Milan. Negative refractive index metamaterials: principles and applications. *Microwave Review*, junio 2006. p. 36-37.

LI, Ying, et al. Design of mechanical metamaterials for simultaneous vibration isolation and energy harvesting. *American Institute of Physics. Applied Physics Letters*, 2017. Volume 111, p. 1-2.

LING, Bin, et al. Experimentally program large magnitude of Poisson's ratio in additively manufactured mechanical metamaterials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020. Volume 173. p. 2.

MECAPEDIA. Amortiguamiento. Artículo [en línea]. Universitat Jaume I, 2006 [citado el 20 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://www.mecapedia.uji.es/amortiguamiento.htm>

MENG, H., et al. Rainbow metamaterials for broadband multi-frequency vibration attenuation: Numerical analysis and experimental validation. *Journal of Sound and Vibration*, 2020. Volume 465. p. 3.

NATEGHI, A., et al. Design and experimental validation of a metamaterial solution for improved noise and vibration behavior of pipes. *Journal of Sound and Vibration*, 2019. Volume 455. 22 p.

PARKER LORD. How to Select a Vibration Isolator. Artículo [en línea]. 2020 [citado el 19 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://bit.ly/37xMfTd>

PLATEK, Pawel, et al. Deformation Process of 3D Printed Structures Made from Flexible Material with Different Values of Relative Density. MDPI Polymers, 2020. Volume 12, Issue 9. 25 p.

SIEMENS. Análisis modal. Artículo [en línea]. 2020 [citado el 20 dic. 2020]. Disponible en Internet: <http://sie.ag/34vIbRx>

TIRA Vibration Test Systems. Vibration Test System TV 51120. Datasheet. Disponible en Internet: <https://bit.ly/2Xml5Zy>

WANG, Yitian, et al. Prestress-controlled asymmetric wave propagation and reciprocity-breaking in tensegrity metastructure. Extreme Mechanics Letters, 2020. Volume 37. 10 p.

WICKELER, Anastasia y NAGUIB, Hani. Novel origami-inspired metamaterials: Design, mechanical testing and finite element modelling. Materials and Design, 2020. Volume 186. p. 3.

WU, Lingling, et al. Mechanical metamaterials for full-band mechanical wave shielding. Applied Materials Today, 2020. Volume 20. 8 p.

YANG, Hang y MA, Li. 1D to 3D multi-stable architected materials with zero Poisson's ratio and controllable thermal expansion. Materials and Design, 2019. Volume 188. p. 13.

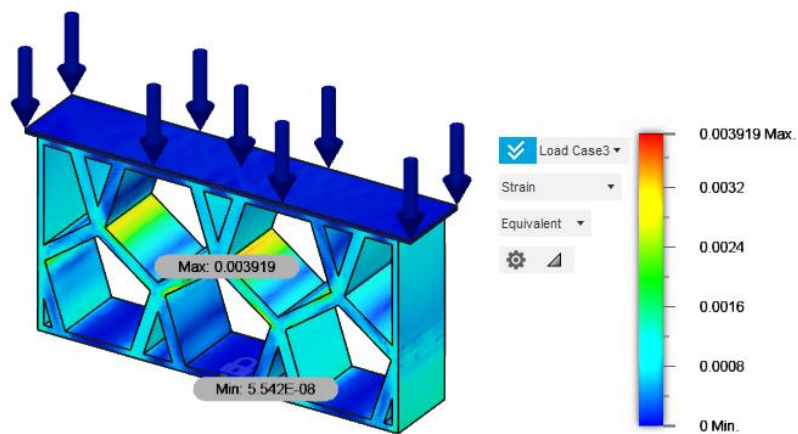
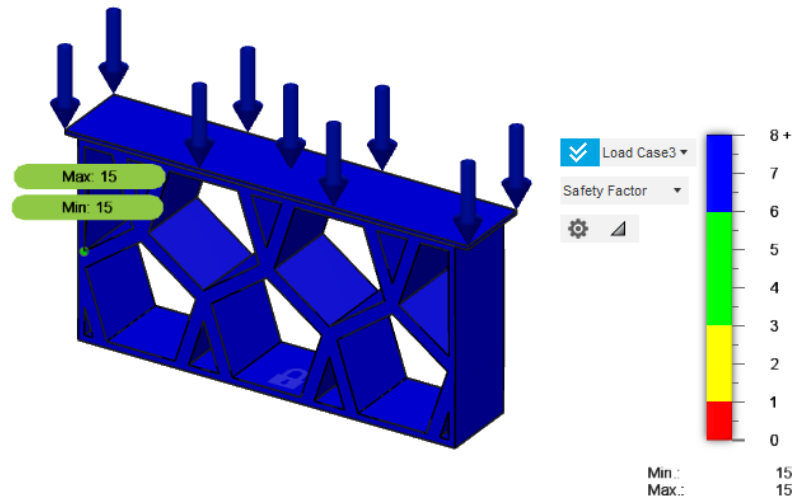
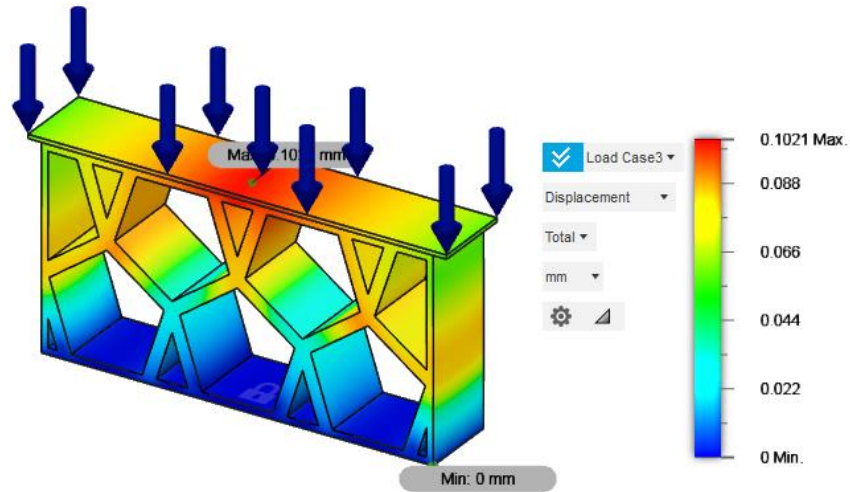
YU, Xianglong, et al. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review. Progress in Materials Science, 2018. Volume 94. p. 162.

ZHU, Weiren. Electromagnetic Metamaterial Absorbers: From Narrowband to Broadband. IntechOpen, 2018. 17 p. DOI: 10.5772/intechopen.78581

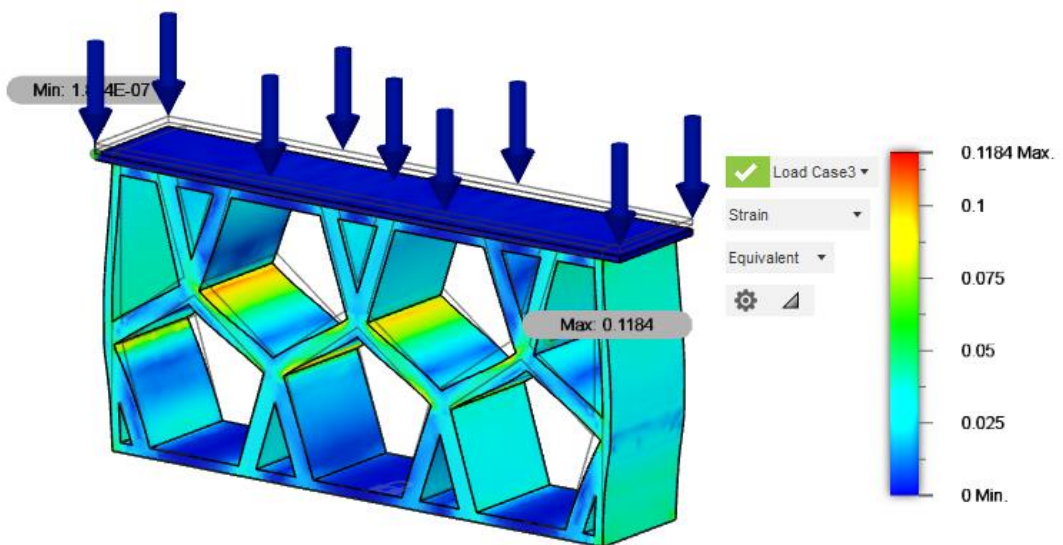
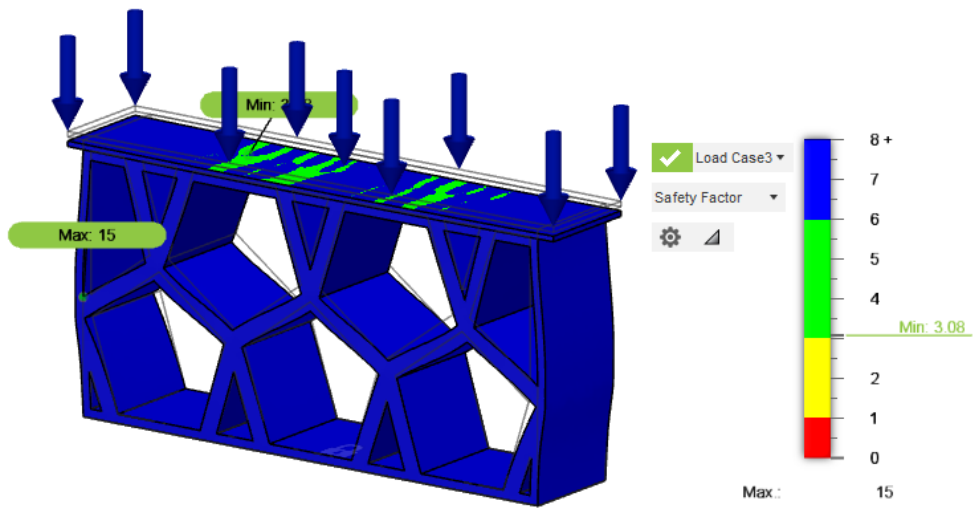
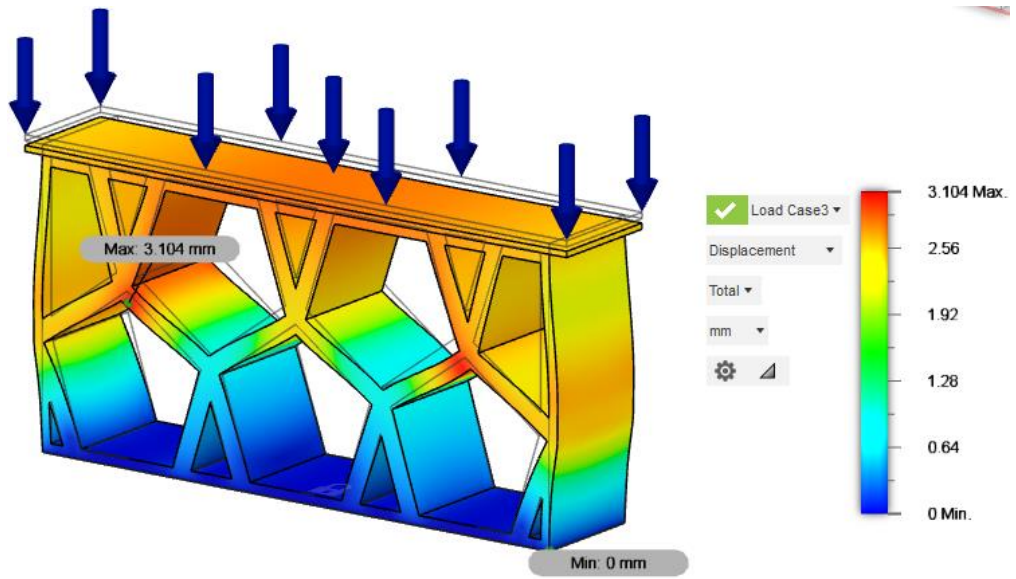
ANEXOS

Anexo A. Resultados del análisis estático de las alternativas con materiales PLA y TPU, y carga de 150 N.

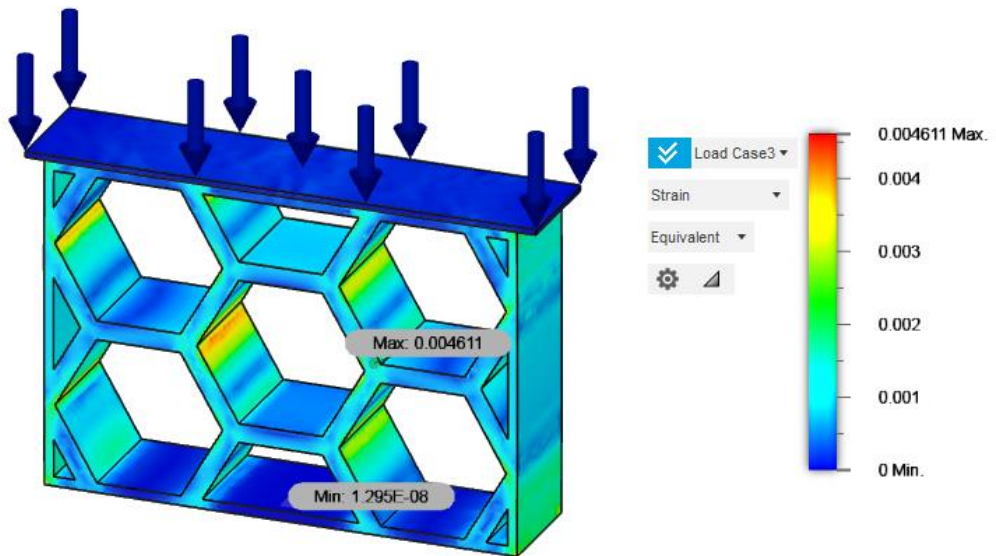
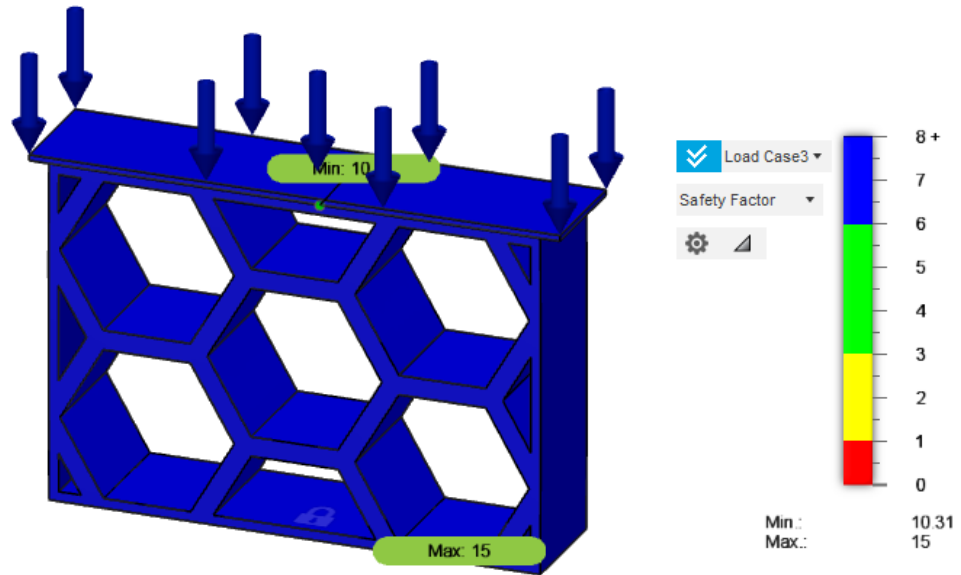
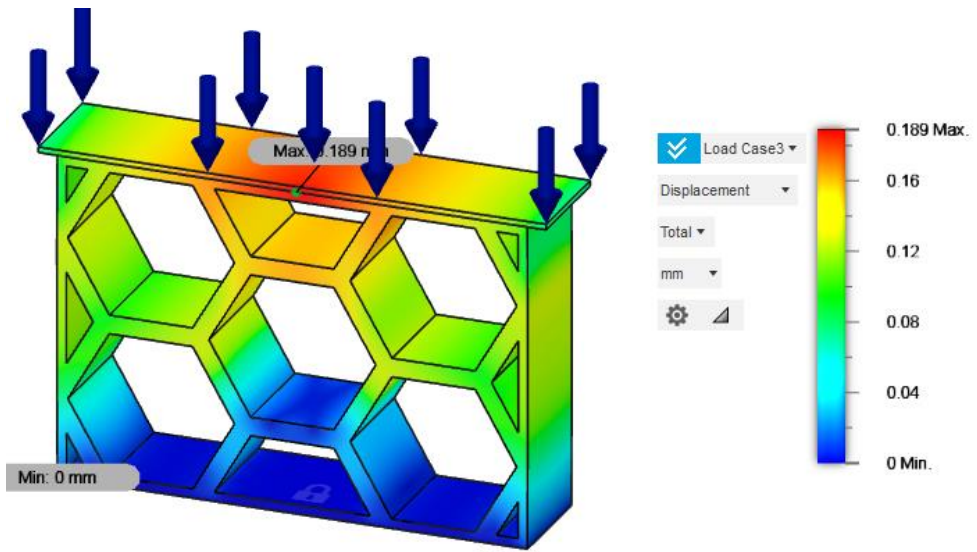
Alternativa #1. Material PLA.



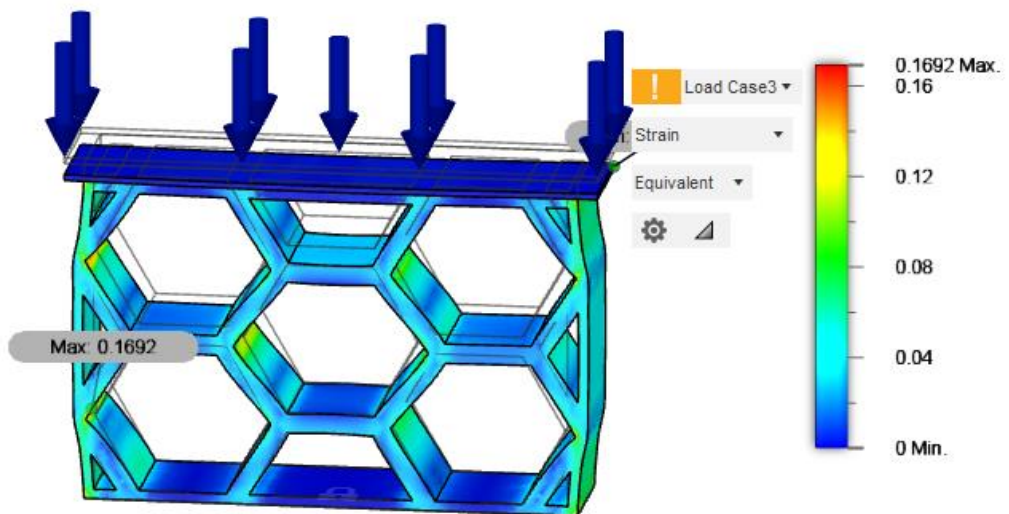
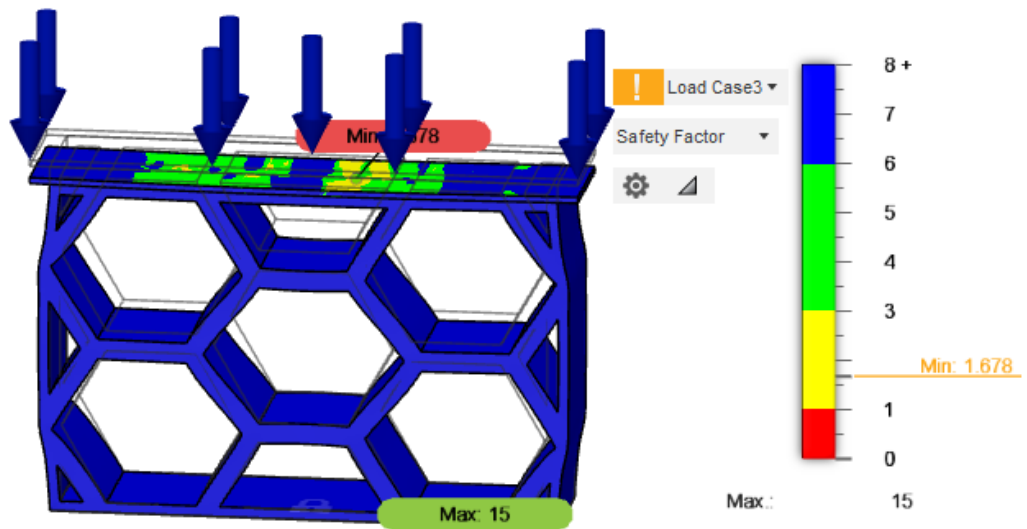
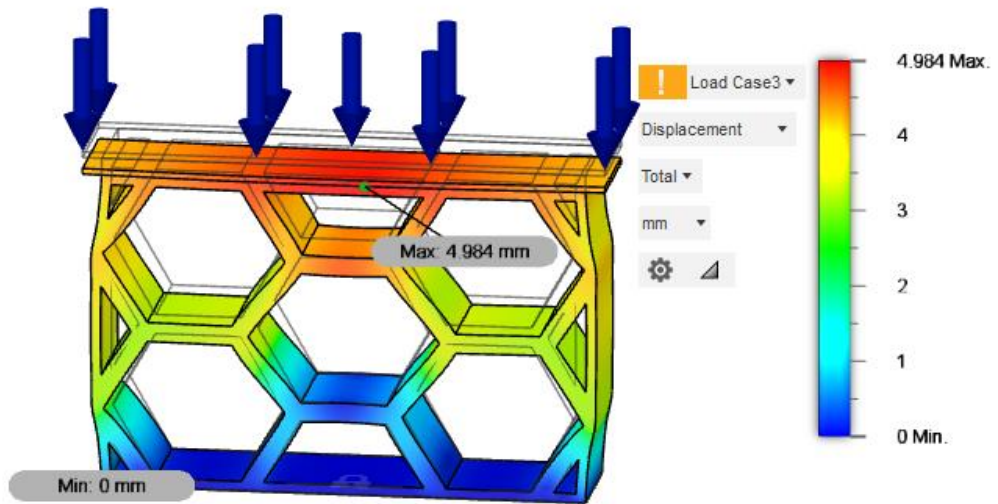
Alternativa #1. Material TPU.



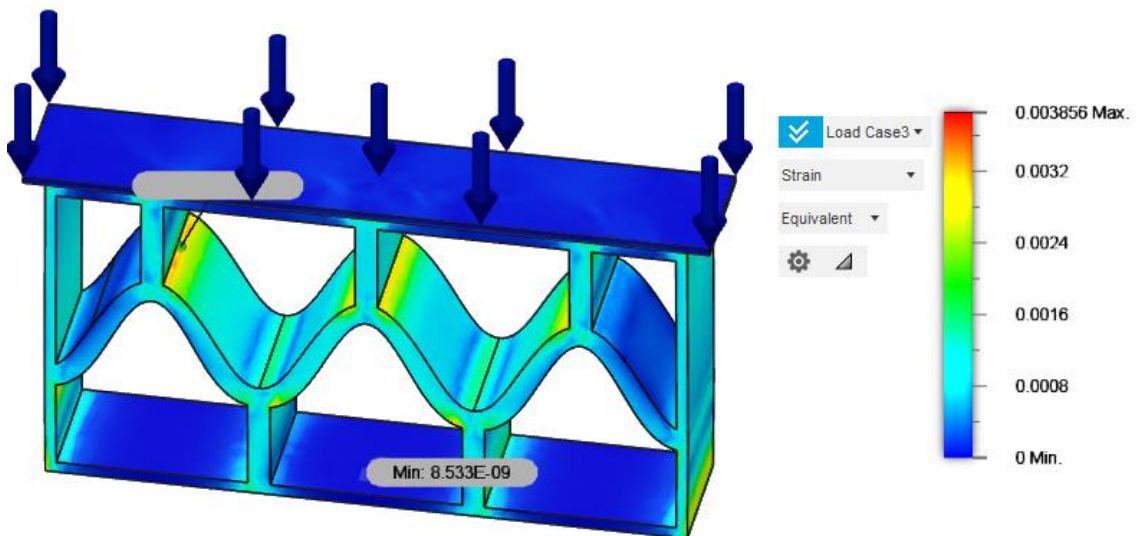
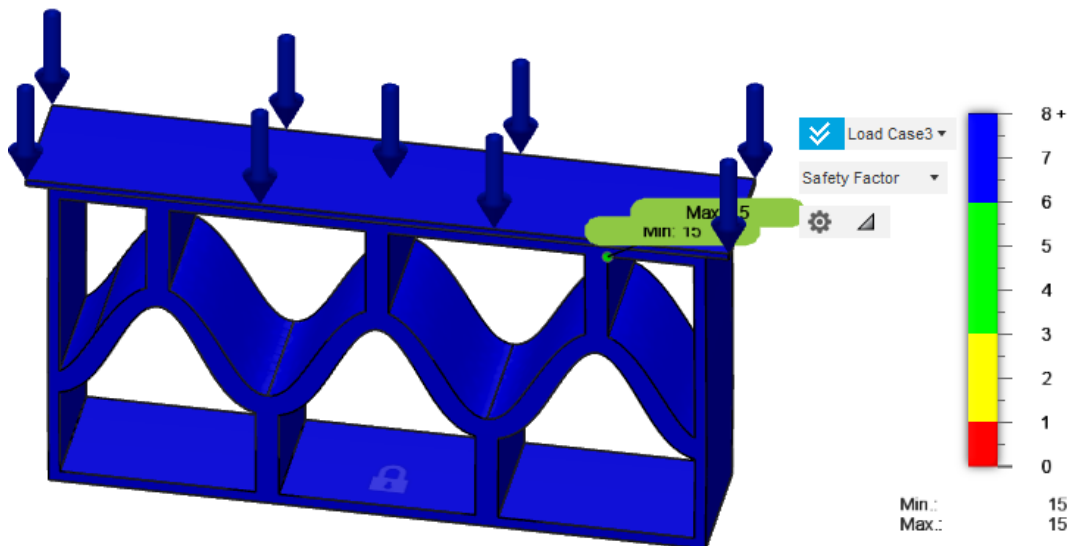
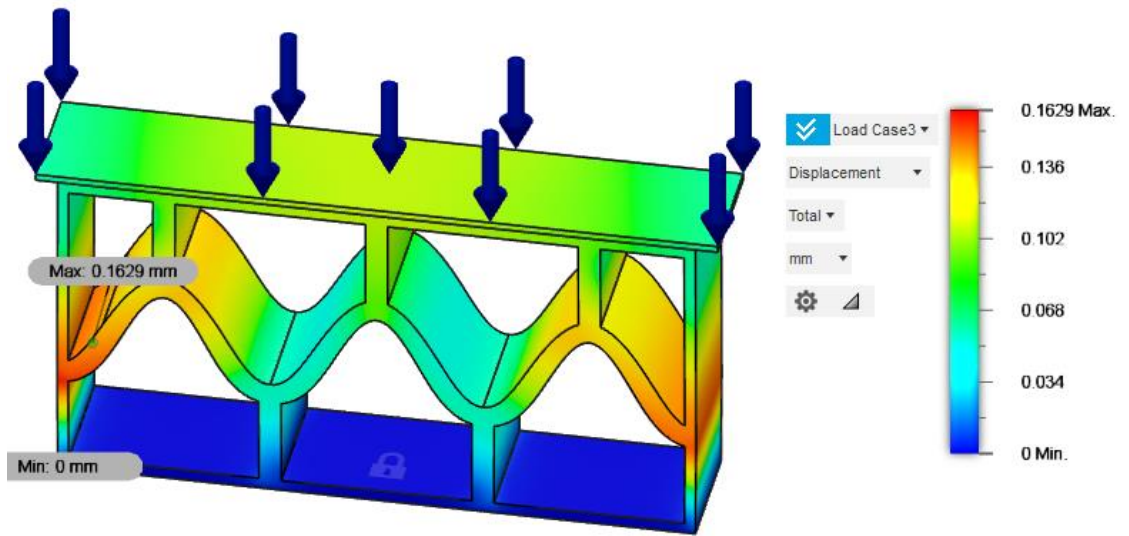
Alternativa #2. Material PLA.



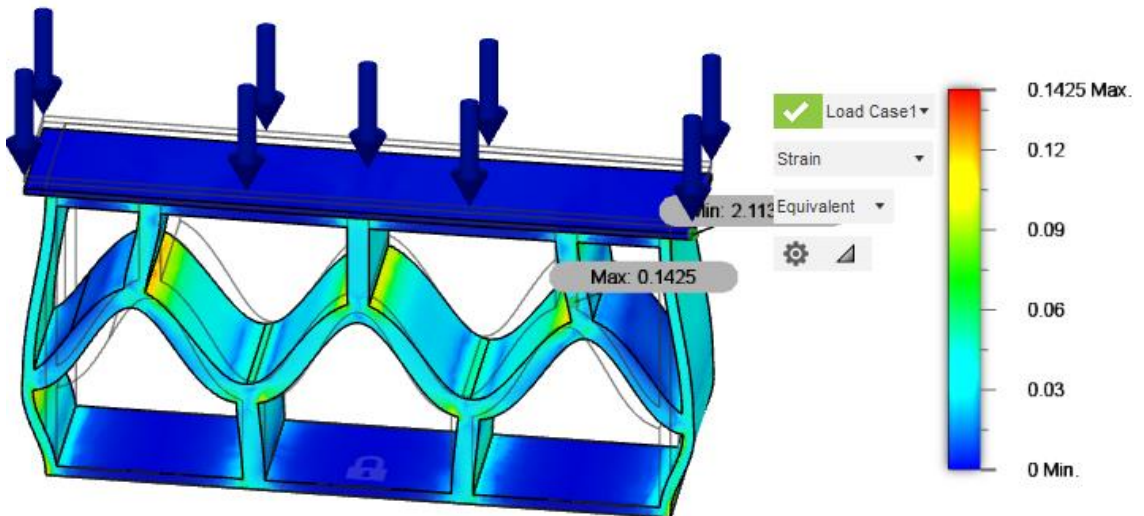
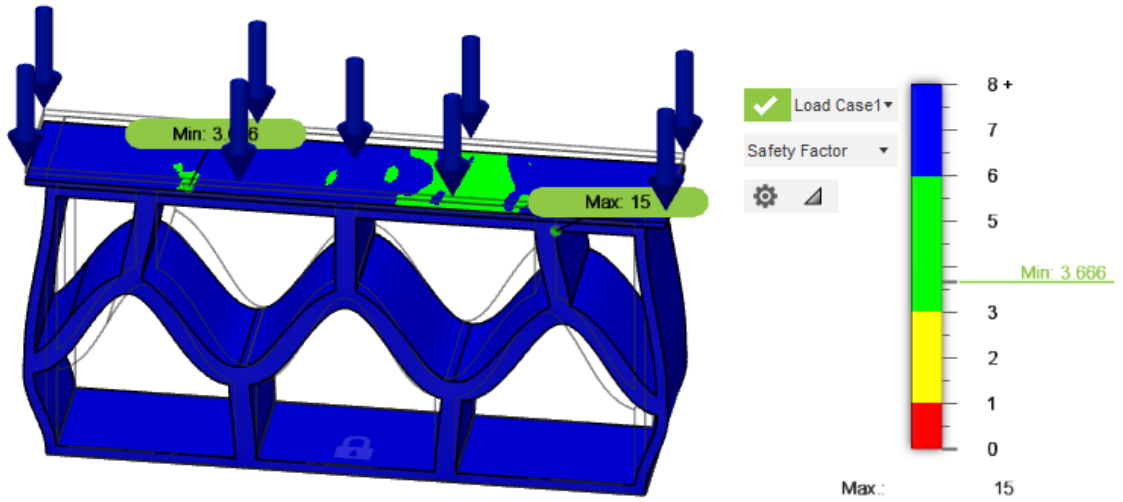
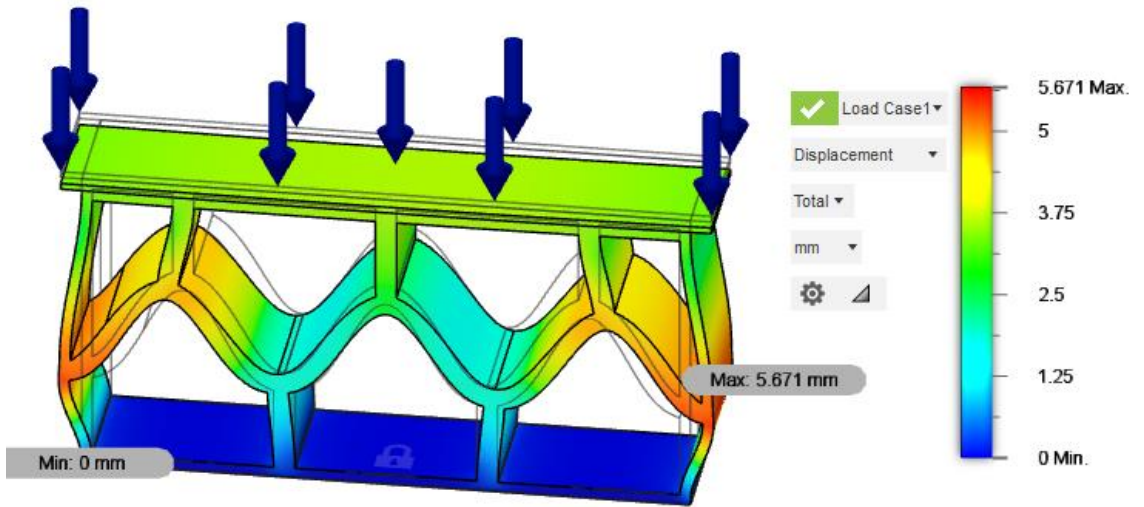
Alternativa #2. Material TPU.



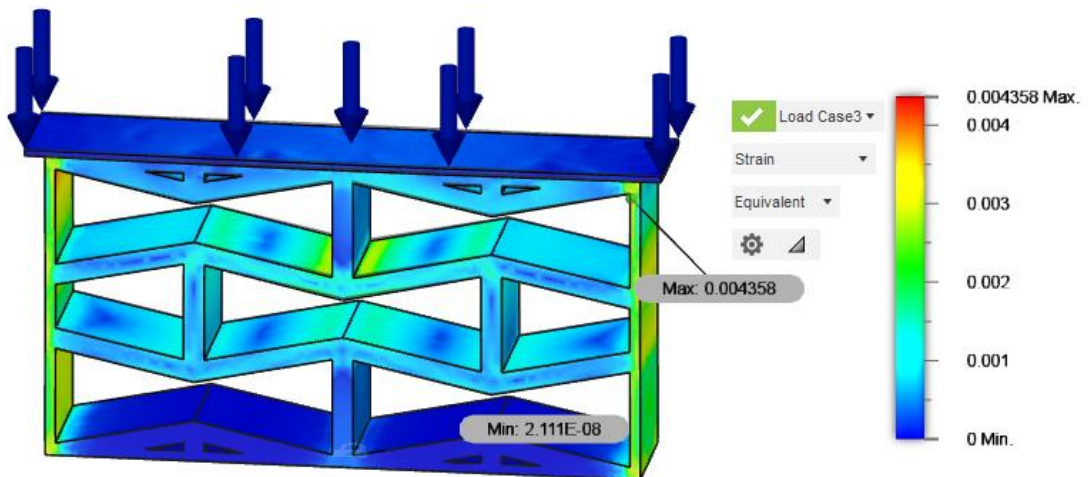
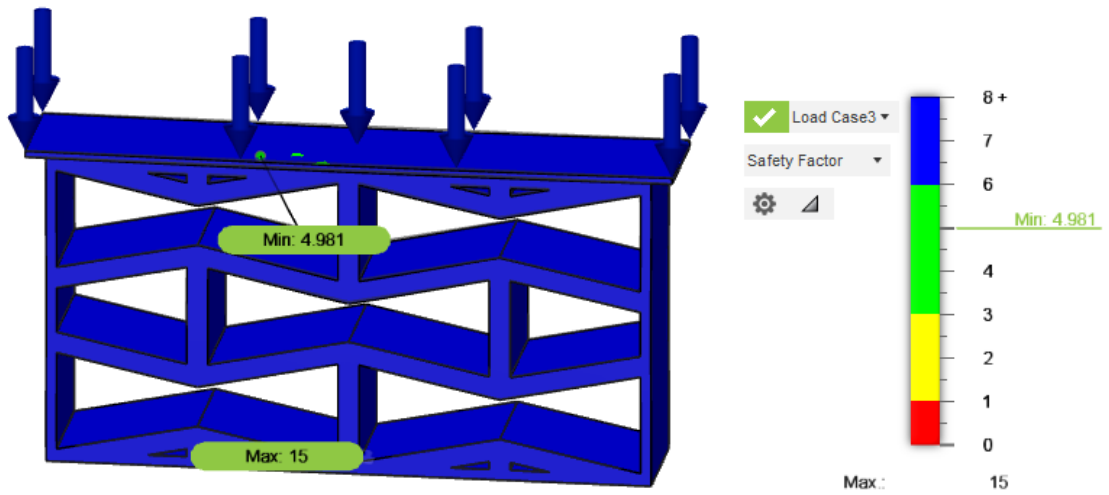
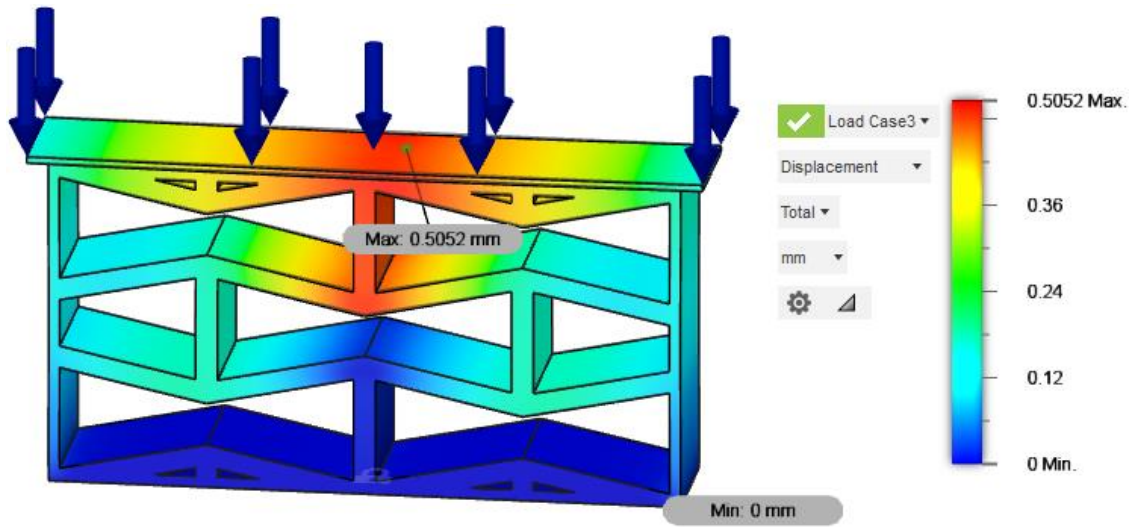
Alternativa #3. Material PLA.



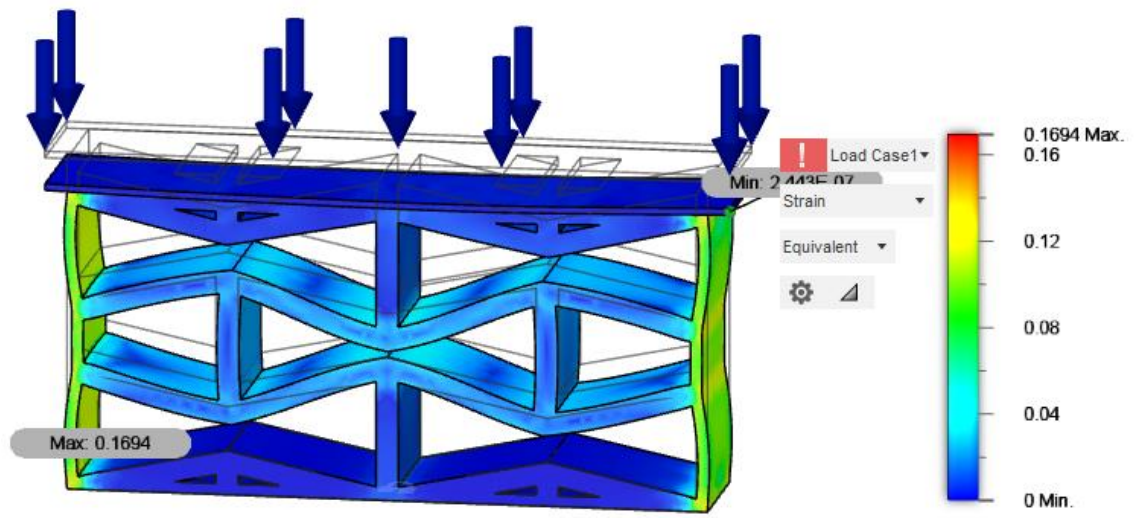
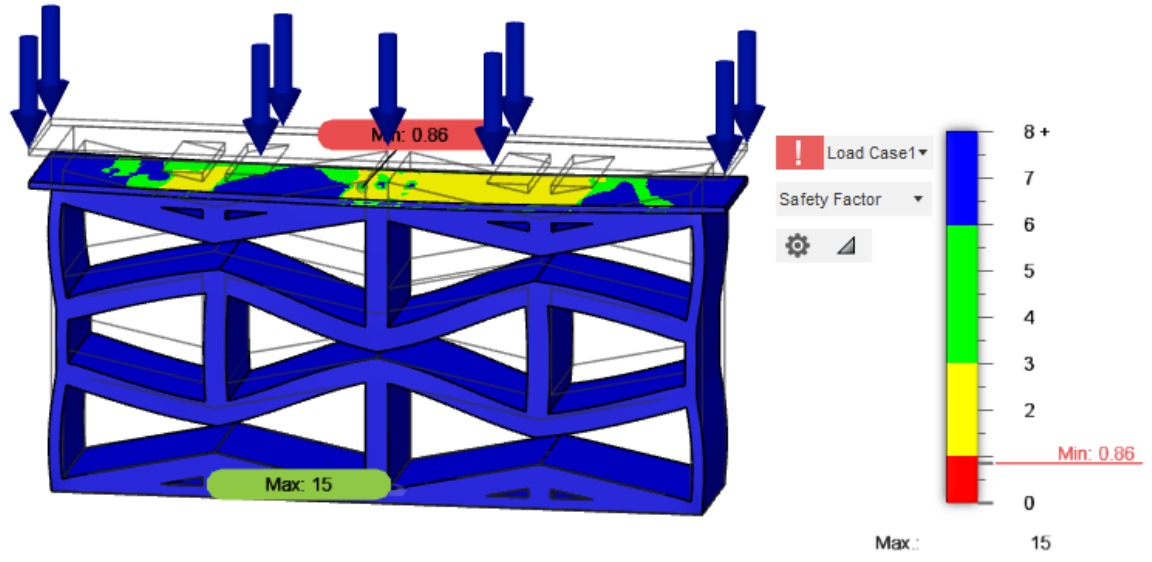
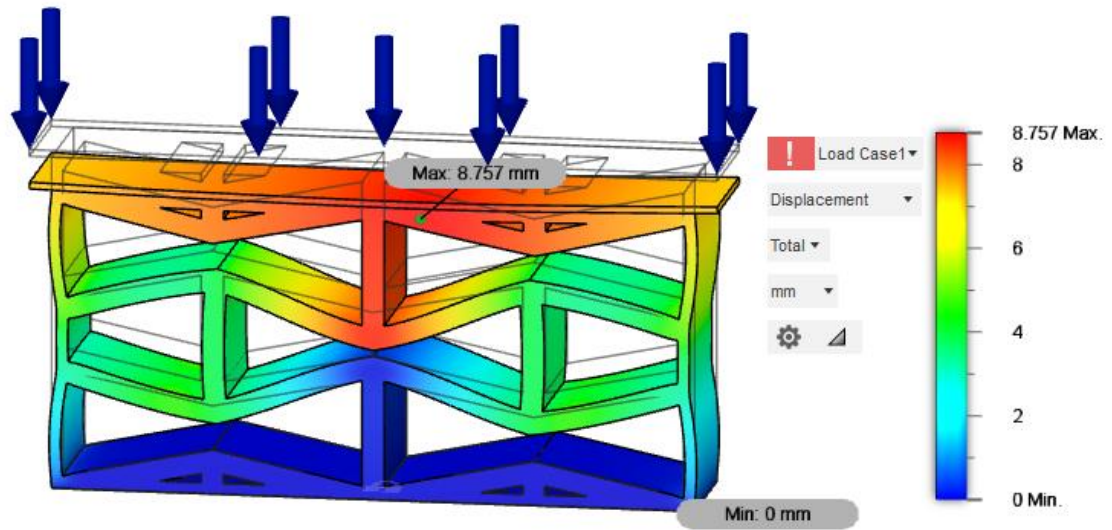
Alternativa #3. Material TPU.



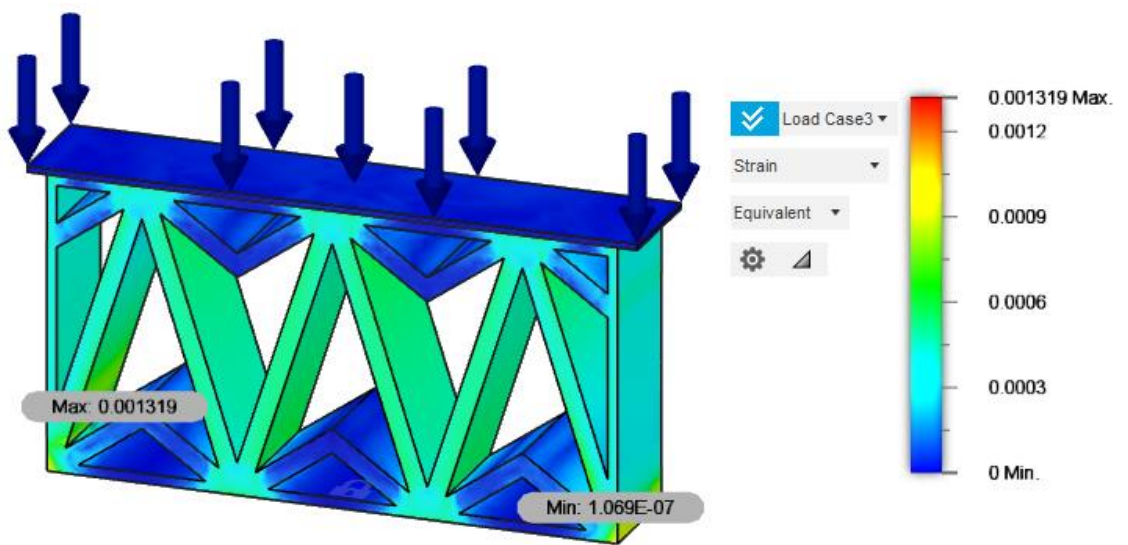
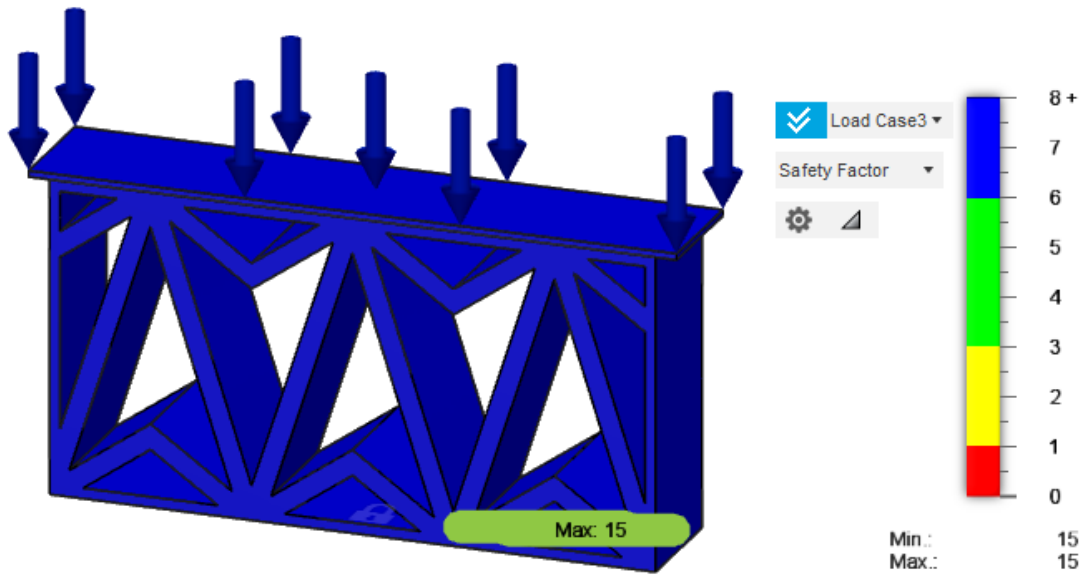
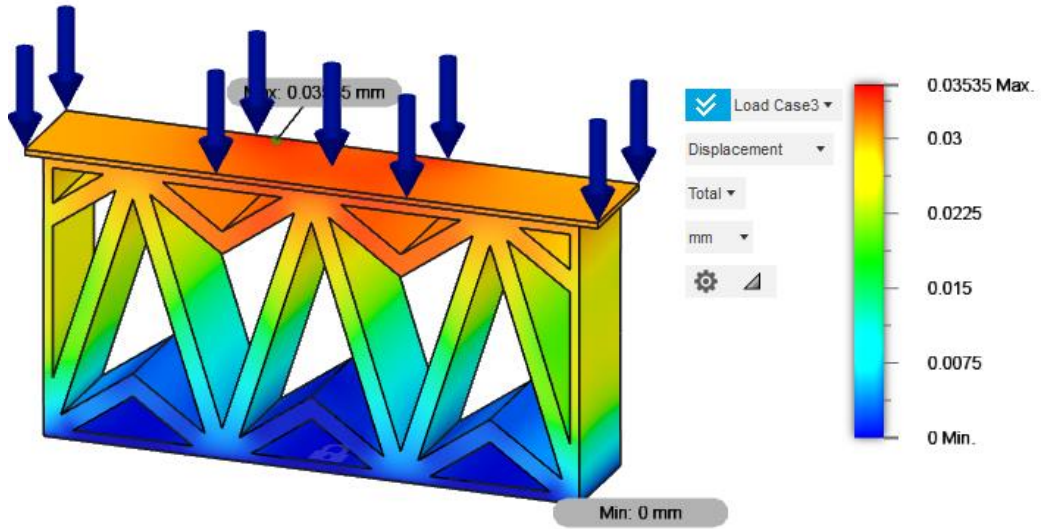
Alternativa #4. Material PLA.



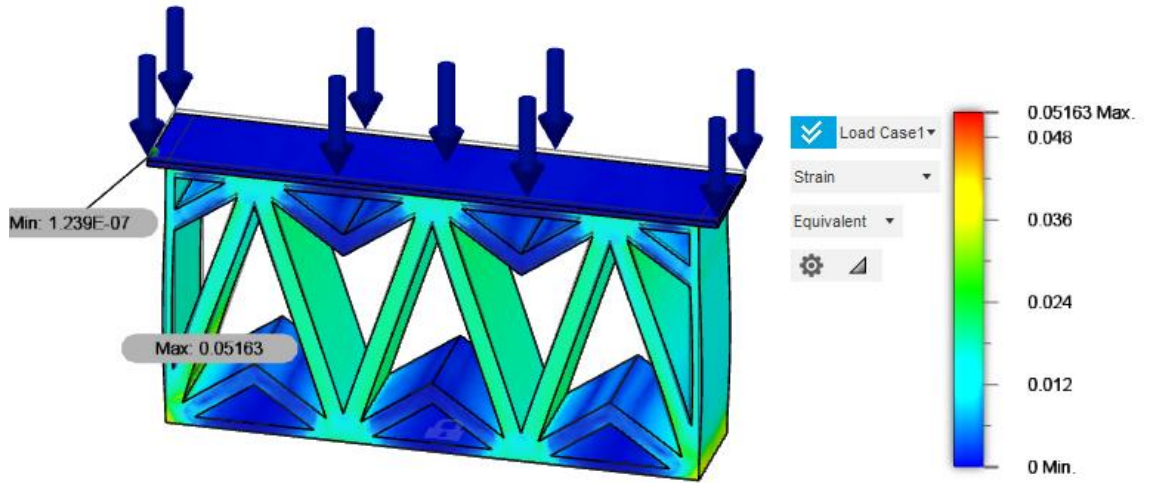
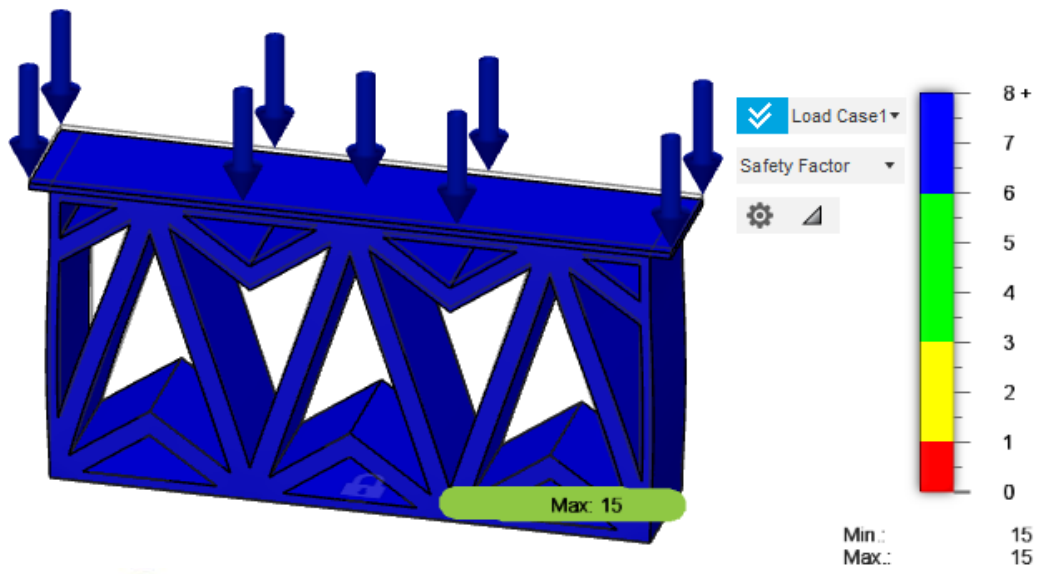
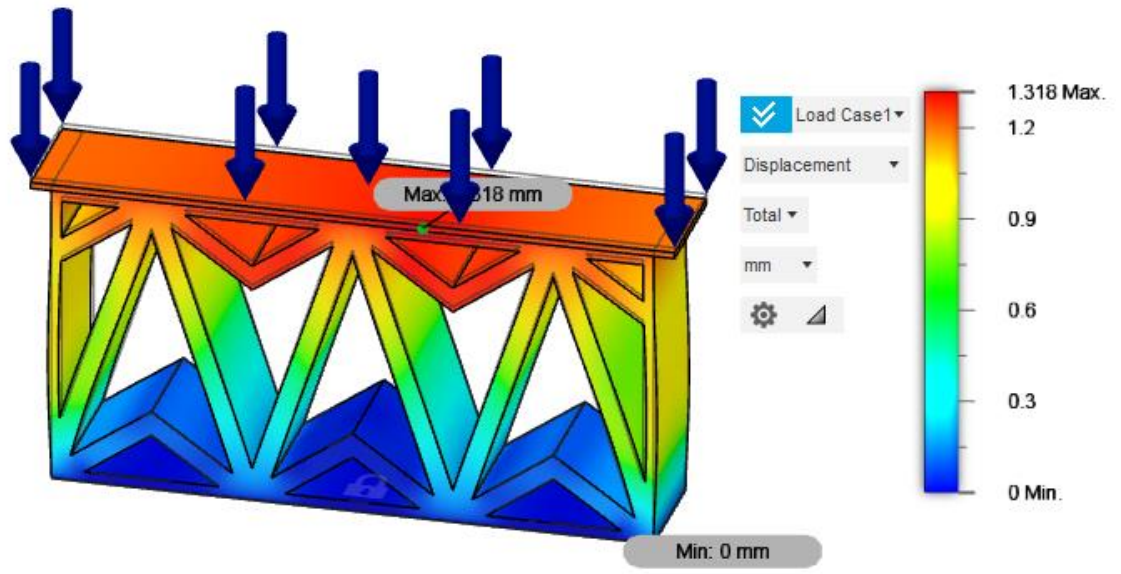
Alternativa #4. Material TPU.



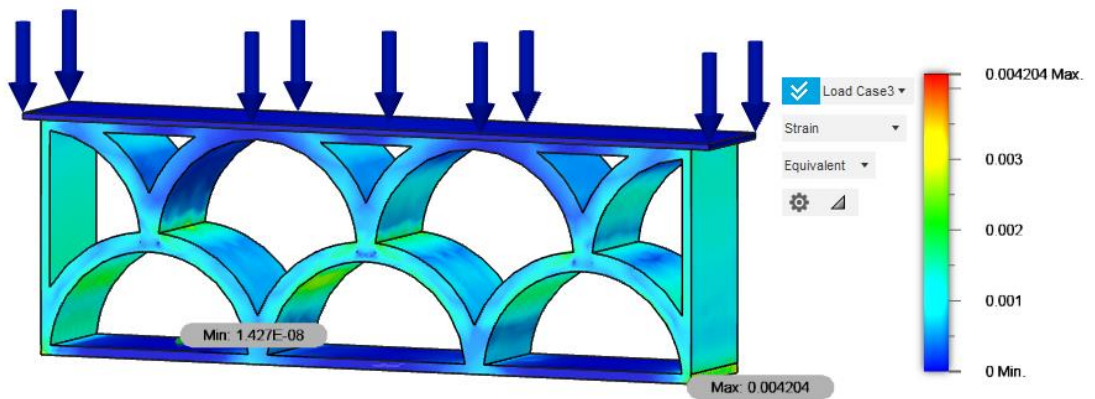
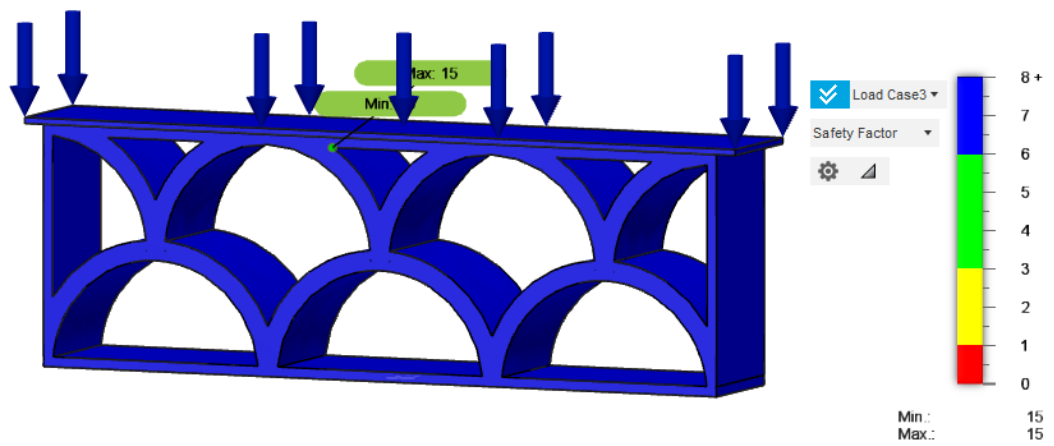
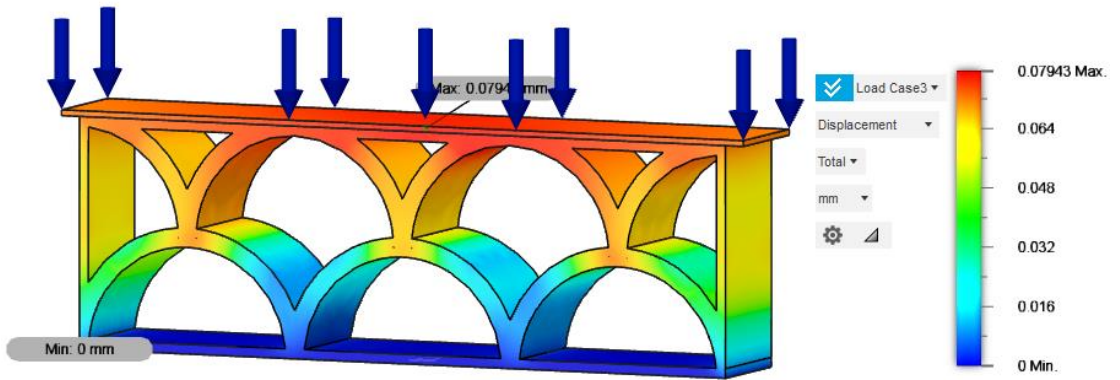
Alternativa #5. Material PLA.



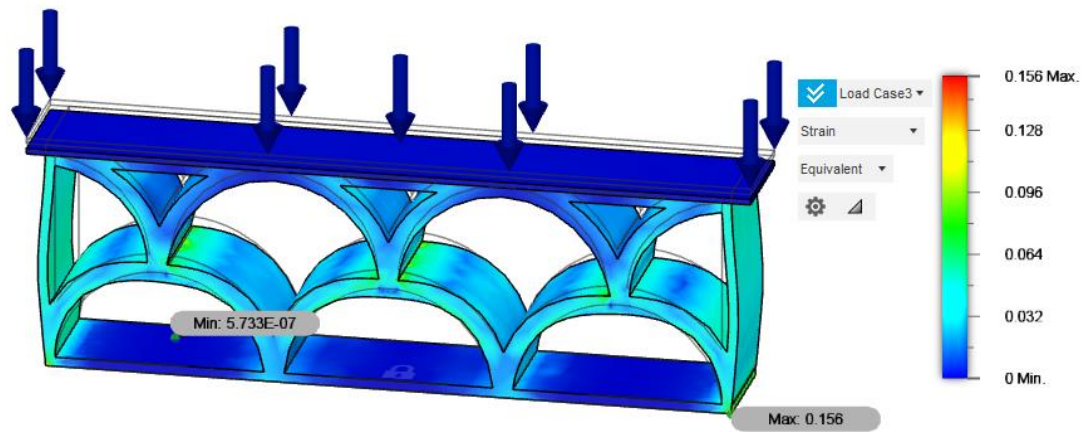
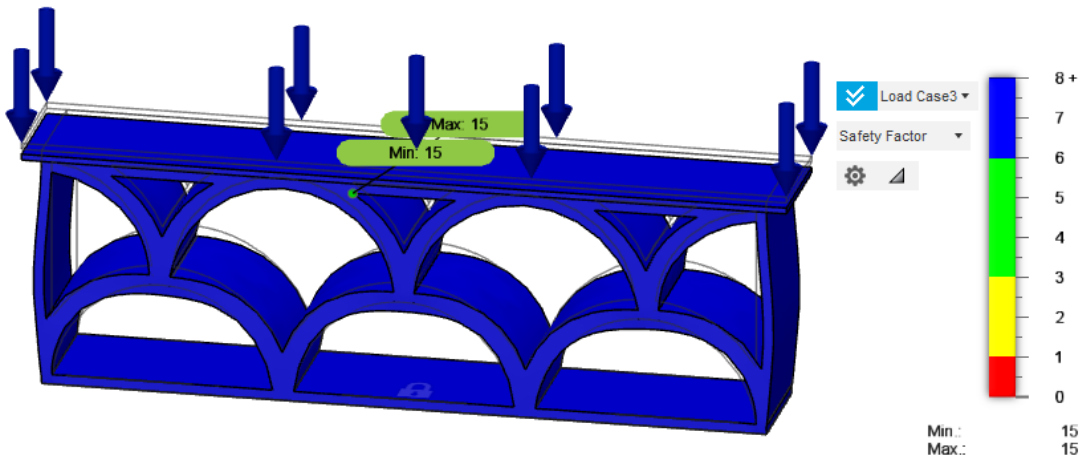
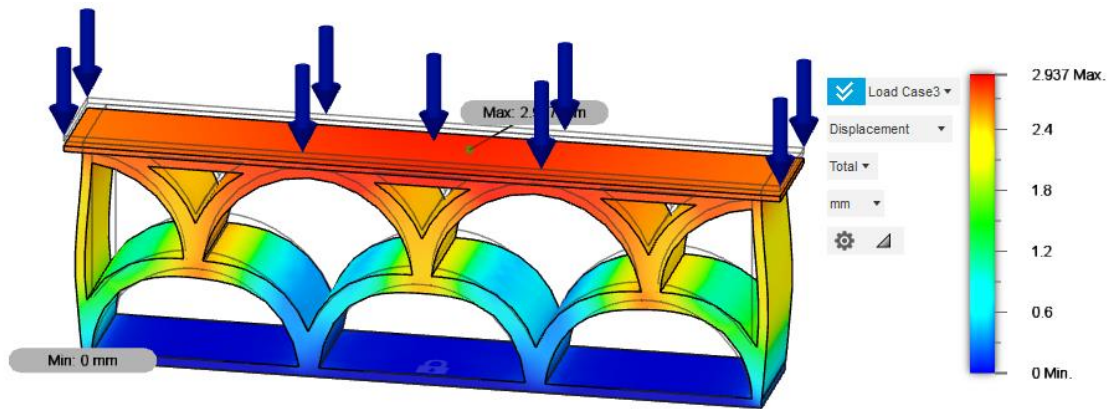
Alternativa #5. Material TPU.



Alternativa #6. Material PLA.

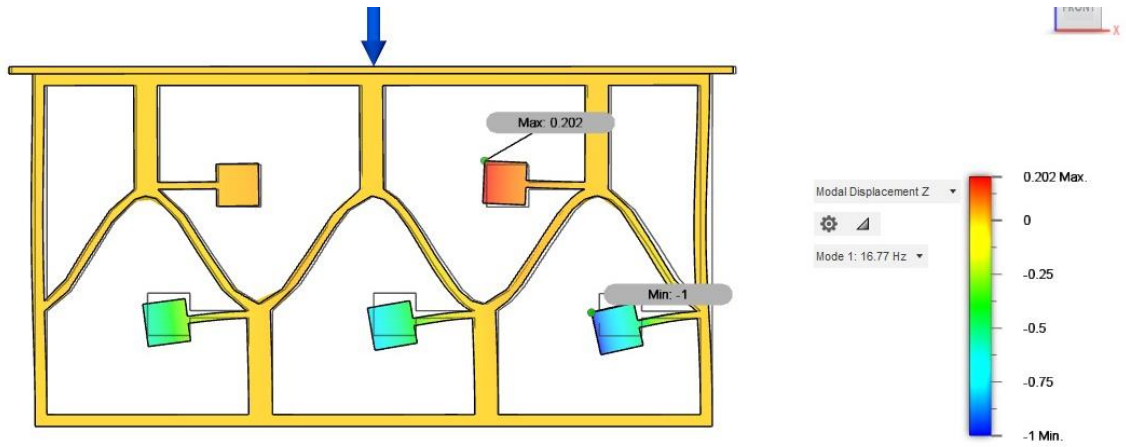


Alternativa #6. Material TPU.

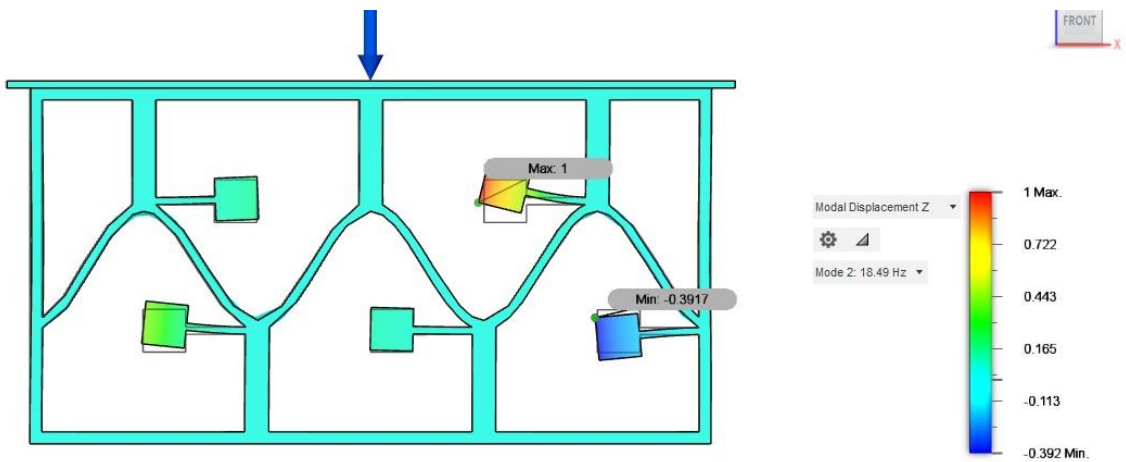


Anexo B. Modos de vibración del diseño final entre 10 y 100 Hz.

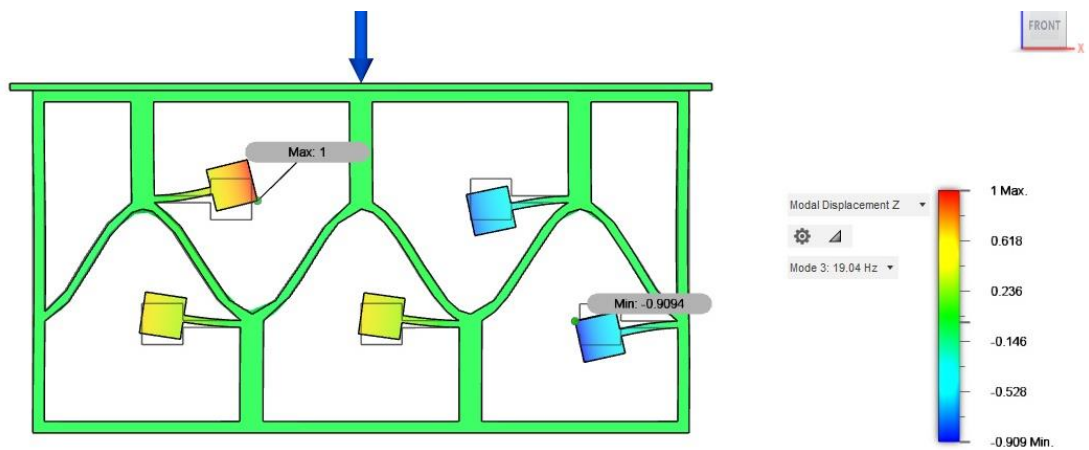
- **Modo 1**



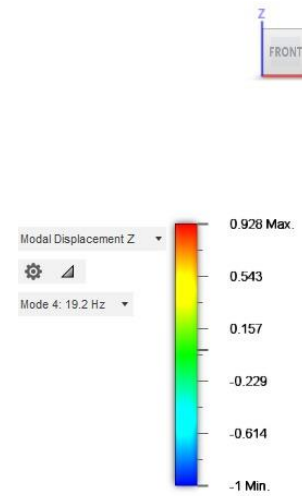
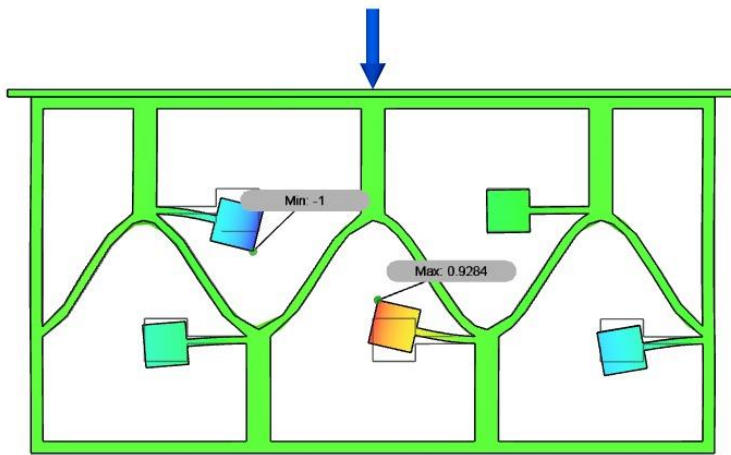
- **Modo 2**



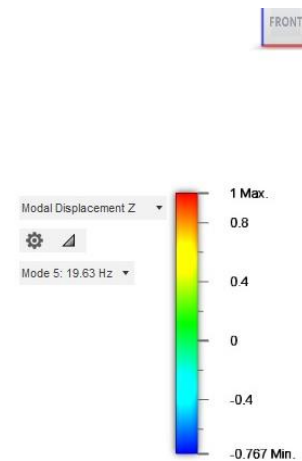
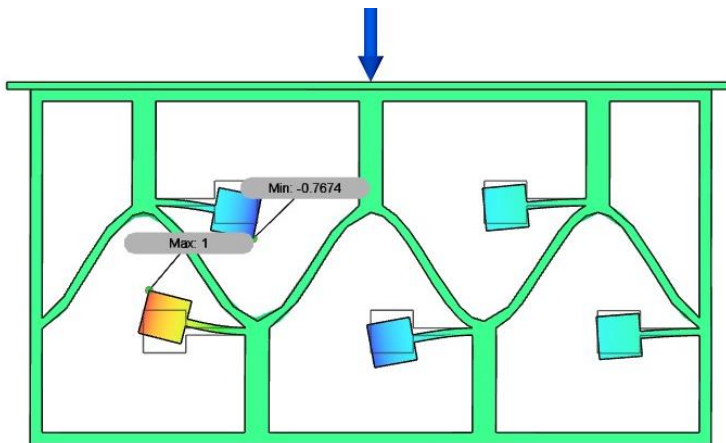
- **Modo 3**



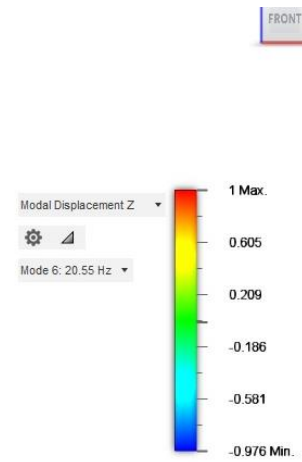
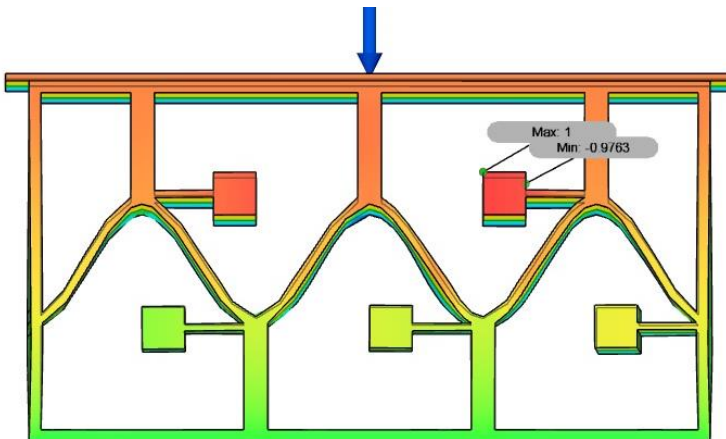
- **Modo 4**



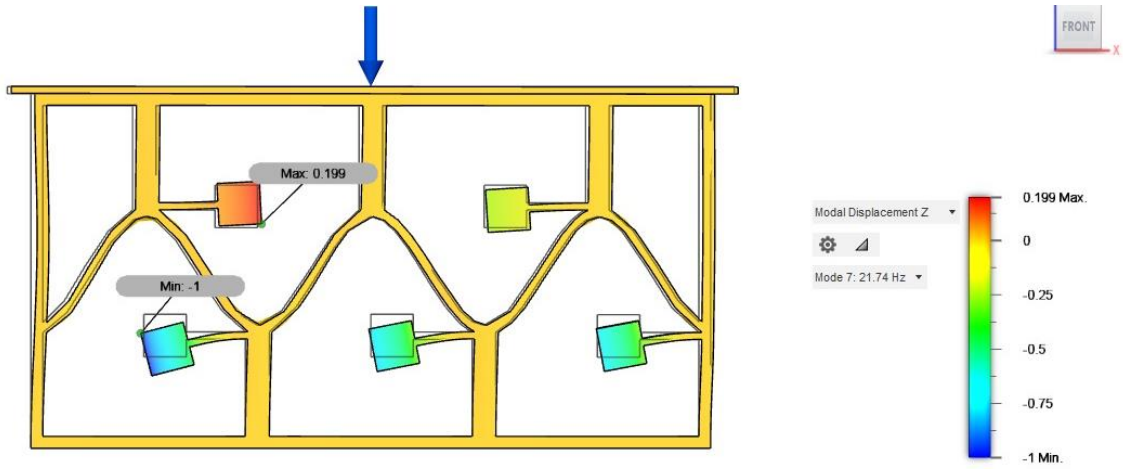
- **Modo 5**



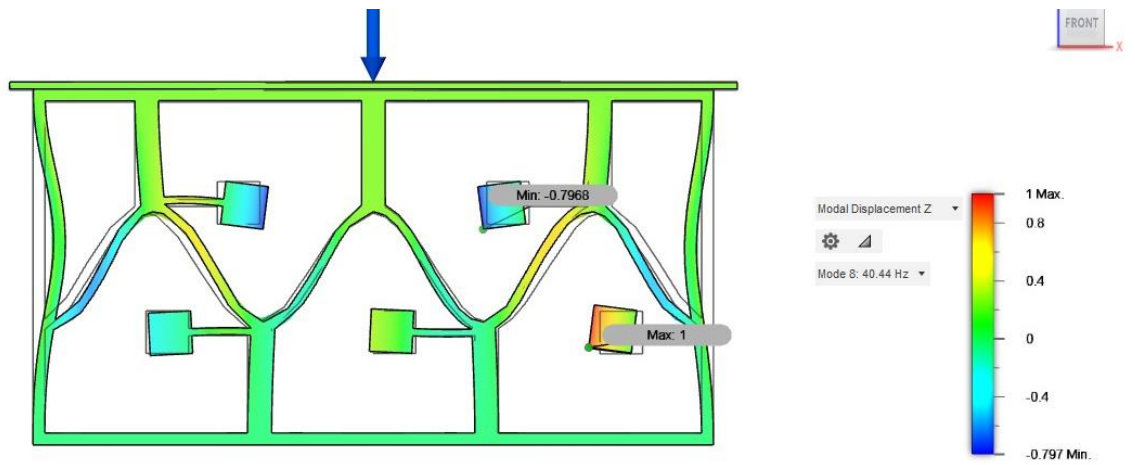
- **Modo 6**



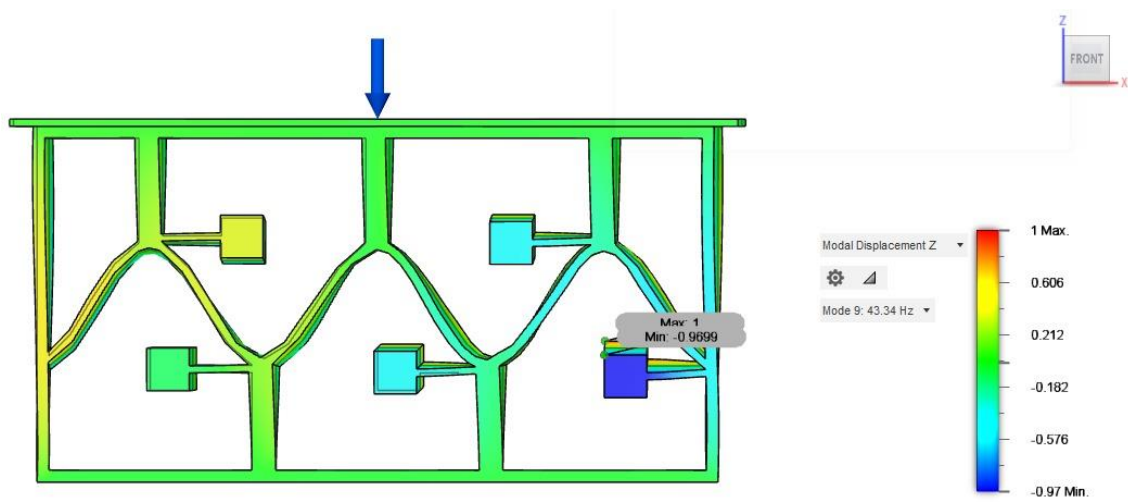
- **Modo 7**



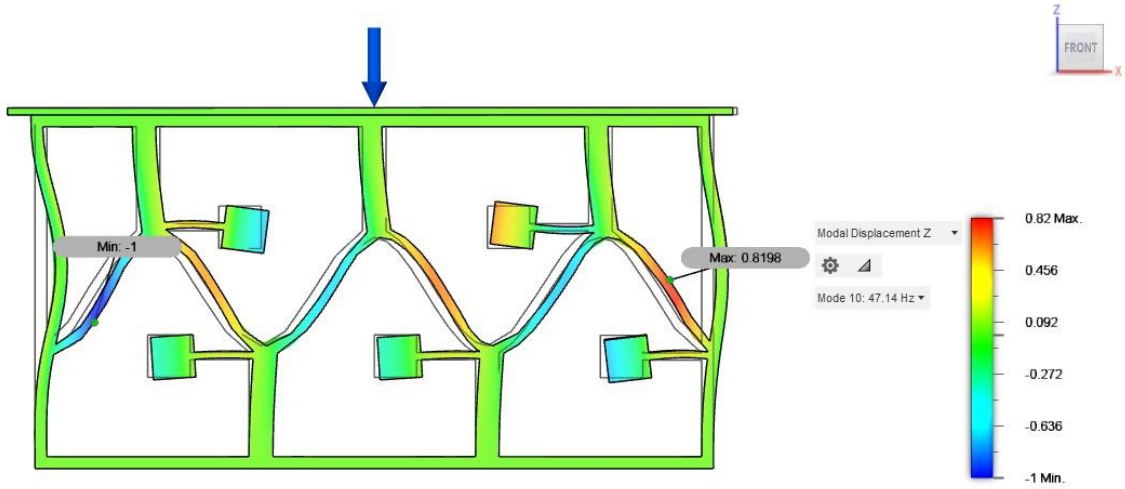
- **Modo 8**



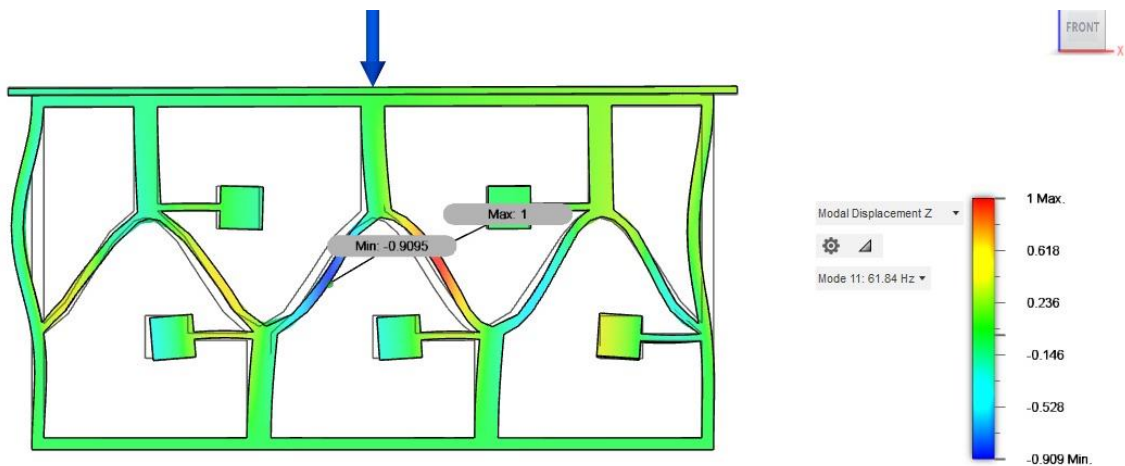
- **Modo 9**



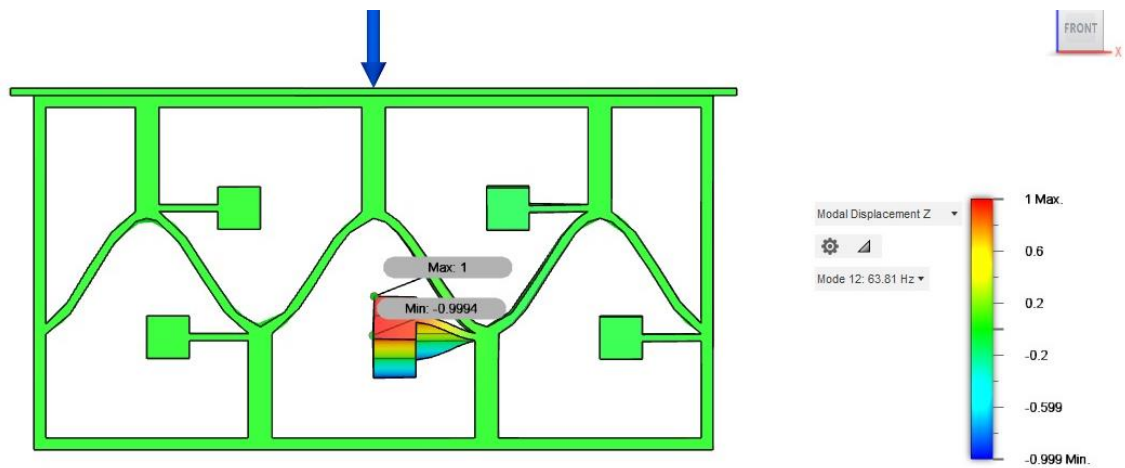
- **Modo 10**



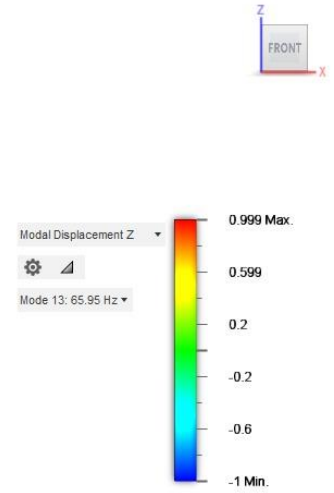
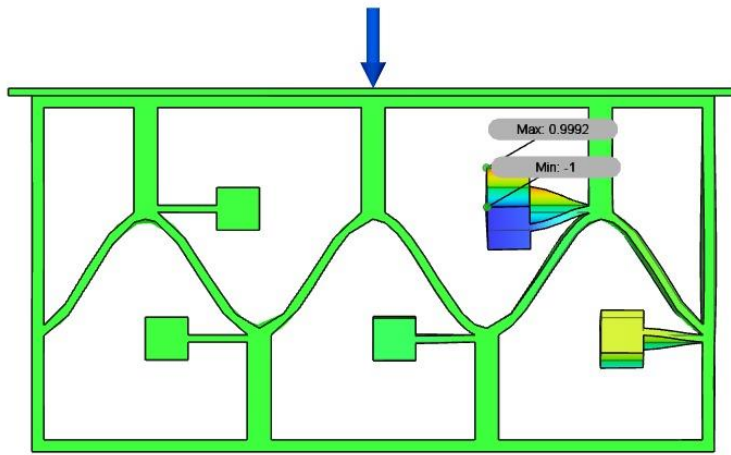
- **Modo 11**



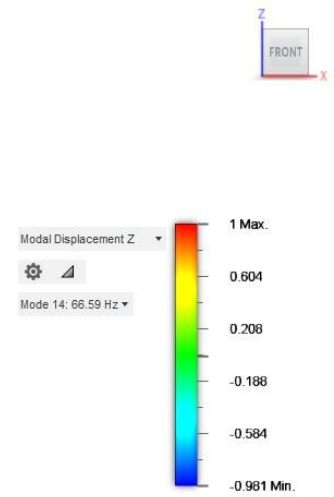
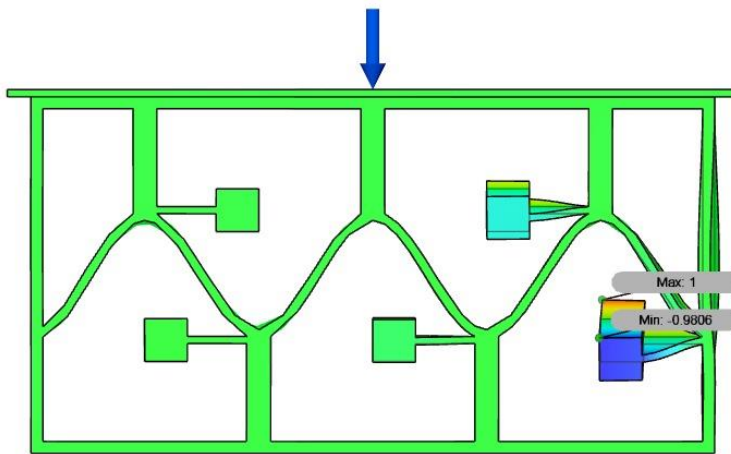
- **Modo 12**



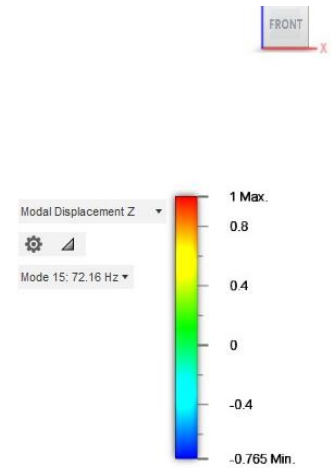
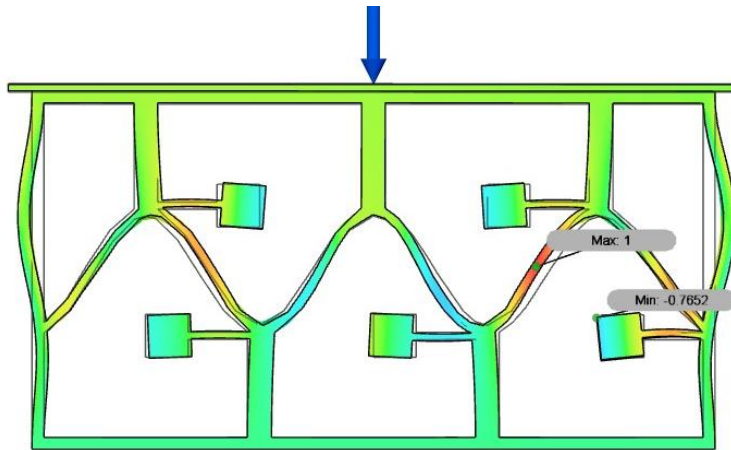
• **Modo 13**



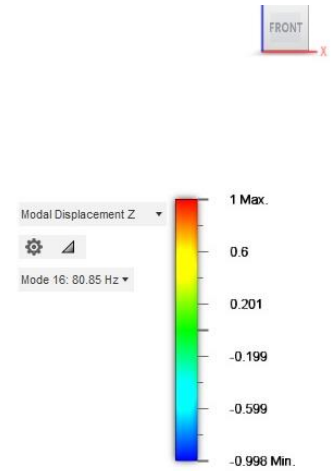
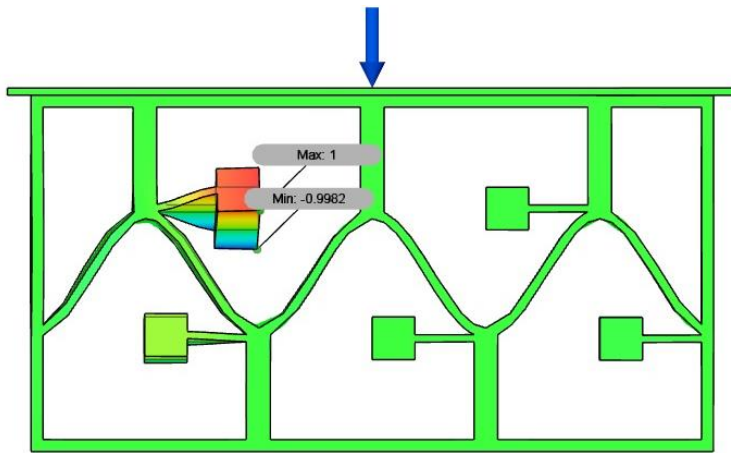
• **Modo 14**



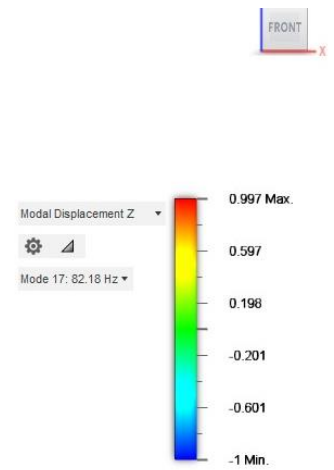
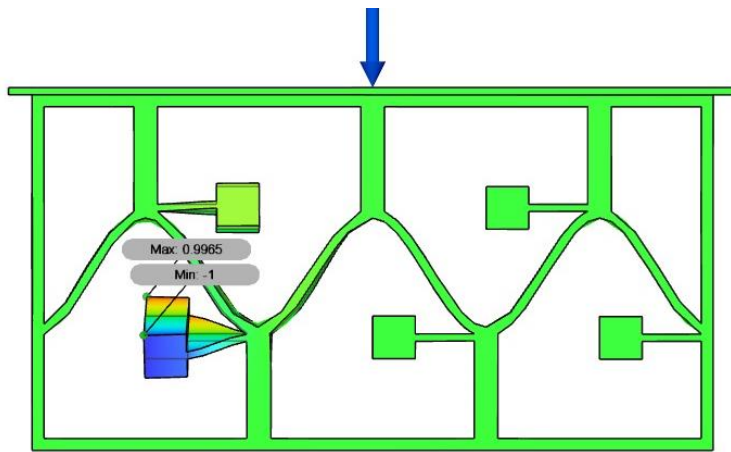
• **Modo 15**



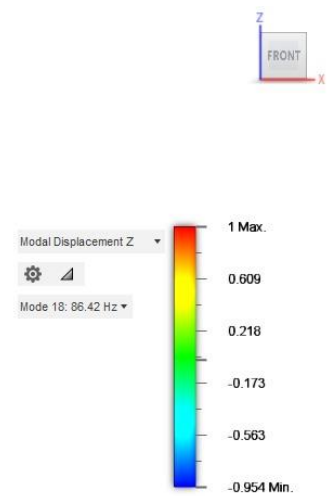
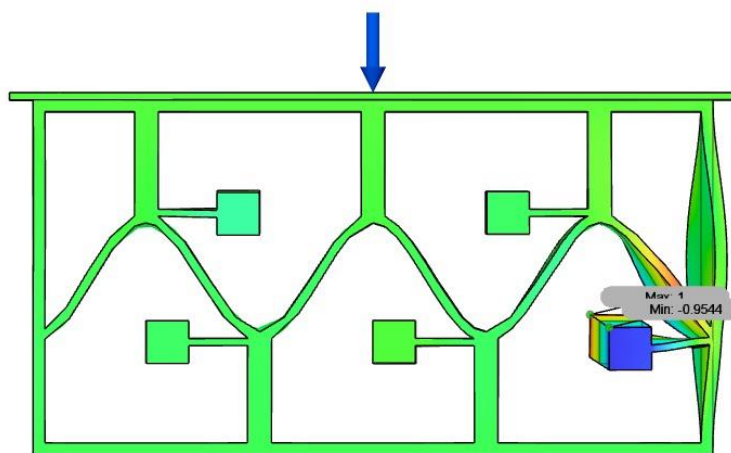
- **Modo 16**



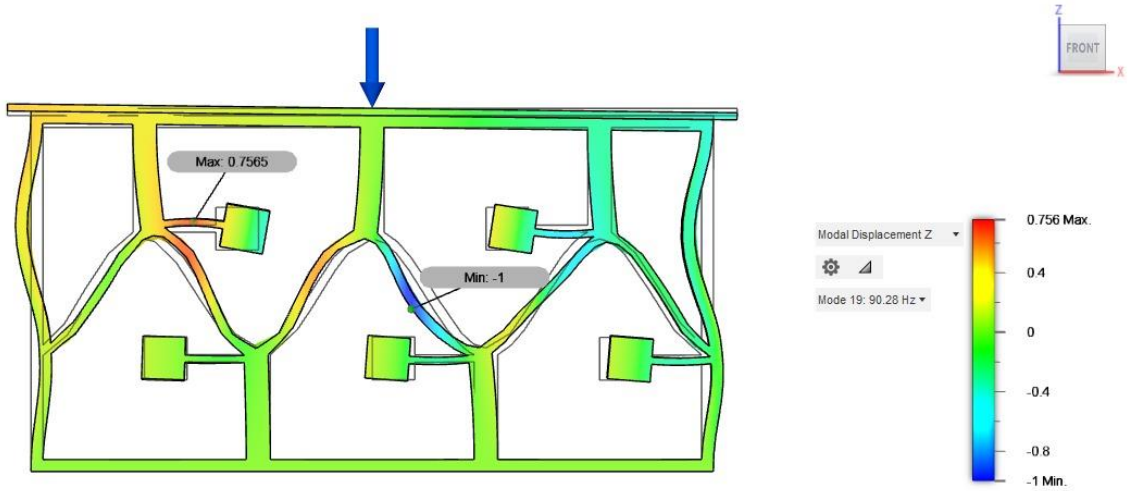
- **Modo 17**



- **Modo 18**



- **Modo 19**



- **Modo 20**

