

Desarrollo, diseño y construcción de un eje de transmisión basado en una arquitectura celular.

Fredy Alberto Macias Lizarazo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director de proyecto:

PhD. Heller Guillermo Sánchez Acevedo

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres Ana y Álvaro los cuales fueron el motor que me permitieron seguir adelante en todo momento, a pesar de las circunstancias que se presentaron fueron la fuerza y el ánimo que me permitieron avanzar y culminar con este proyecto.

Fredy Alberto Macias Lizarazo

Agradecimientos

A mis padres por apoyarme durante todo mi proceso de formación y estar en todo momento conmigo.

A mis profesores que tuve el gusto de conocer a lo largo de mi carrera, en especial al profesor Heller Guillermo Sánchez Acevedo por la asesoría y dirección brindada durante todo el proyecto y al profesor German Adolfo Diaz Ramírez quien me aconsejó durante la fase de impresión 3D.

A la UIS la cual fue mi segunda casa durante esta etapa y donde conocí muchos de mis amigos los cuales me brindaron su apoyo y compañía.

Fredy Alberto Macias Lizarazo

CONTENIDO

1.	Descripción del Problema.....	12
2.	Objetivos.....	13
1.1	Objetivo General.....	13
1.2	Objetivos Específicos.....	13
3.	Justificación.....	14
4.	Metodología.....	15
4.1	Búsqueda de información en literatura científica	15
4.2	Selección de alternativas.....	15
4.3	Diseño y construcción del eje objeto de estudio.....	15
4.4	Fase evaluación del eje de transmisión.....	16
5.	Marco Teórico	17
5.1	Metamateriales.....	17
5.1.1	Materiales Extremos	18
5.1.2	Materiales pentamodales.....	19
5.1.3	Memateriales auxéticos.....	21
5.1.3.1	Estructuras reentrantes	21
5.1.3.2	Estructuras quirales.....	25
5.1.3.3	Estructuras giratorias semirrígidas.....	25
5.1.4	Metamateriales pantográficos	26
5.2	Método de los elementos finitos (MEF).....	27
5.2.1	Generación de la malla en elementos finitos	28
5.2.2	Densidad del mallado.....	31
5.3	Análisis modal	32
5.3.1	Frecuencia natural.....	33
5.4	Manufactura aditiva	33

5.4.1	Métodos de impresión 3D.....	34
5.4.1.1	Fusión por haz de electrones.....	34
5.4.1.2	Sinterización selectiva con láser –(SLS).....	34
5.4.1.3	Estereolitografía – (SLA).....	35
5.4.1.4	Modelado por deposición fundida (FDM)	35
5.4.1.5	Fusión de chorro múltiple (MJF)	36
5.4.2	Materiales comunes usados en impresión 3D.....	36
5.4.2.1	Polímeros	37
5.4.2.2	Metales.....	38
6.	Diseño conceptual de la forma de la forma del metamaterial	38
6.1	Planteamiento de alternativas	38
6.1.1	Alternativa 1.....	39
6.1.2	Alternativa 2.....	40
6.1.3	Alternativa 3.....	41
6.1.4	Alternativa 4.....	42
6.1.5	Alternativa 5.....	42
6.2	Análisis de las alternativas.....	43
6.3	Selección de alternativa	44
7.	Optimización y desarrollo de la alternativa.....	47
7.1	Variación del paso de hélice	47
7.2	Variación de la cantidad de superficies	51
7.3	Análisis de la mejor combinación de la alternativa seleccionada.....	53
7.4	Análisis modal de la alternativa.....	55
7.5	Ajuste de la alternativa final	56
8.	Construcción y montaje del eje	58

8.1	Impresión del eje.....	58
8.2	Construcción del bastidor para montaje del eje	61
9.	Análisis de resultados	65
10.	Conclusiones.....	68
11.	Referencias	70

Lista de figuras

Figura 1 Esquema del montaje del eje	16
Figura 2 Número de artículos publicados en Materials Science and Engineering: R: Reports sobre metamateriales mecánicos de 2002 a 2022	18
Figura 3 Modelo teórico de Milton y Cherkaev creado por Wegener y colaboradores utilizando técnicas de impresión 3D	20
Figura 4 Estructura celular 2D presentada por Gilson en 1982	22
Figura 5 Barra de ensayo con celdas unitarias de tipo triangular	23
Figura 6 Estructura giratoria semirrígida	25
Figura 7 Estructura pantográfica.....	27
Figura 8 Partes de un mallado en un análisis de elementos finitos.....	28
Figura 9 Grafica del numero de elementos de un análisis MEF respecto a la oblicuidad	30
Figura 10 Cálculo de la relación de aspecto de un cubo unitario	31
Figura 11 Ejemplo de submodelado de un ala	32
Figura 12 Comparación entre una pieza de ABS y una pieza con de ABS con 13% de carbono. 36	
Figura 13 Alternativa 1	39
Figura 14 Alternativa 2	40
Figura 15 Alternativa 3	41
Figura 16 Alternativa 4	42
Figura 17 Alternativa 5	43
Figura 18 Esquema de la simulación	43
Figura 19 Variación del paso de la hélice, vista isométrica del perfil de la hélice guía	48
Figura 20 Variación del paso de la hélice, modelos CADs	49
Figura 21 Diagrama de paso de hélice vs factor de seguridad mínimo	50
Figura 22 Forma de la variación de las superficies.....	52

Figura 23 cambio de la sección transversal al variar el numero de superficies.....	52
Figura 24 numero de superficies vs factor de seguridad mínimo	53
Figura 25 CAD de la alternativa con las mejores variaciones aplicadas	54
Figura 26 Simulación de la alternativa seleccionada en combinación los mejores parámetros - factor de seguridad.....	55
Figura 27 Simulación de la alternativa ajustada	57
Figura 28 Vista previa del software UltiMaker Cura del modelo para impresión e impresión	59
Figura 29 Vista previa del software UltiMaker Cura del modelo para impresión e impresión	60
Figura 30 Motor encargado de suministrar potencia al eje objeto de estudio	61
Figura 31 Montaje del eje objeto de estudio en banco de pruebas	62
Figura 32 Alineación de los ejes.....	63
Figura 33 Proceso de pintado de las láminas de hierro.....	64
Figura 34 Montaje final con el eje objeto de estudio.....	65
Figura 35 Eje de objeto de estudio después de la falla.	66
Figura 36 Funcionamiento del del banco con eje impreso de manera transversal.....	67

Lista de tablas

Tabla 1 Escala recomendada por ANSYS para la oblicuidad.....	29
Tabla 2 Propiedades mecánicas de algunos materiales usados en impresión 3D	37
Tabla 3 Datos obtenidos de las simulaciones de las cinco alternativas	44
Tabla 4 Matriz de decisión Pugh para la calificación de alternativas	46
Tabla 5 Resultados obtenidos de la simulación para pasos de hélices grandes	51
Tabla 6 Modos de vibración de la alternativa con mejores variaciones aplicadas	56
Tabla 7 Tabla del análisis modal de la alternativa ajustada.....	58

Resumen

Título: Desarrollo, diseño y construcción de un eje de transmisión basado en una arquitectura celular*

Autor: Fredy Alberto Macias Lizarazo**

Palabras claves: Arquitectura celular ,Elementos finitos, impresión 3D, PLA

Descripción: por medio del presente proyecto de grado, se lleva a cabo el desarrollo de una arquitectura celular, las opciones fueron recopiladas a partir de una búsqueda en literatura científica, se realiza la selección utilizando una matriz de decisión de Pugh, una vez obtenida la arquitectura mejor calificada con una análisis de elementos finitos y una análisis modal es adaptada a un eje con el fin de ser impresa mediante tecnología de impresión 3D por el método de modelado por deposición de fundida (FDM) usando como material PLA. Una vez obtenido el eje este es probado con la ayuda de un motor eléctrico de 0,5 caballos de potencia y un sistema de frenado con el objetivo de someter al eje máximo rango de operación del motor.

* 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: Development, design, and construction of a transmission shaft based on cellular architecture.*

Author: Fredy Alberto Macias Lizarazo**

Keywords: Cellular architecture, finite elements, 3D printing, PLA

Description: Through this undergraduate thesis project, a cellular architecture is developed. Options were gathered through a search in scientific literature, and selection was conducted using a Pugh decision matrix. Once the highest-rated architecture was identified, it underwent finite element analysis and modal analysis. It was then adapted to a shaft for 3D printing using fused deposition modeling (FDM) with PLA as the material. After obtaining the shaft, it was tested with a 0.5 horsepower electric motor and a braking system to subject it to the motor's maximum operating range.

*Degree Work

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

1. Descripción del Problema

Todo proceso producción tiene un impacto ambiental como la sobre explotación de los recursos naturales para la fabricación de productos, desechos derivados de la producción deteriorando ecosistemas, contaminación y procesos de fabricación que pueden requerir un alto consumo de energía; debido a que los recursos del planeta son limitados y cada vez el impacto es más notable.

En industrias como la metalmecánica durante los procesos de fabricación de piezas generan cantidades grandes de residuos los cuales muchos de ellos no tienen un proceso adecuado para su disposición final causando un impacto en el medio ambiente, estos residuos de materia prima generalmente se deben a la complejidad de las piezas como cavidades , roscados y demás procesos de sustracción de material de un bloque inicial lo que debería traducirse en un ahorro de material y por tanto en un menor costo del producto final. Entre más compleja es geometría de la pieza y más precisión se requiere el costo y tiempo de producción se hacen más hacen más grandes y su vez se generan una mayor cantidad de residuos de materia prima.

Con el fin de proporcionar una solución sostenible y satisfaga los requerimientos pedidos para cumplir cierta labor como puede ser eje para la transmisión de potencia de un dispositivo, se ha planteado la posibilidad mediante el desarrollo de una arquitectura celular de metamaterial diseñada de tal manera que satisfaga un requerimiento específico y mediante una fabricación usando el método de manufactura aditiva. ¿puede una pieza desarrollada a partir de una arquitectura celular cumplir el requerimiento mecánico exigido y reducir la cantidad de materia prima empleada disminuyendo el impacto tanto al medio ambiente con buen desempeño

2. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar una arquitectura celular de metamaterial, la cual será empleada para diseño, modelado y fabricación de un eje entre un motor y un sistema de frenado para la construcción se usará tecnología de fabricación aditiva; las características técnicas del motor eléctrico son 0,5 caballos de potencia, 3450 RPM y un torque máximo de 1 N-m.

1.2 Objetivos Específicos

Seleccionar una arquitectura celular de un metamaterial encontrada en la literatura científica con la ayuda de una matriz de decisión Pugh, determinando la mejor propuesta de las encontradas en la literatura.

Diseñar y modelar un eje para la transmisión de potencia de un motor 0,5 caballos de potencia, 3450 rpm con un torque de 1N-m, con la ayuda del software ANSYS se obtendrá la distribución de esfuerzos por torsión, deformación máxima, frecuencias naturales y modo de vibración.

Evaluar el desempeño del eje fabricado mediante manufactura aditiva con la tecnología de modelado por deposición fundida, será empleado el sistema que consta de un motor y freno el cual someterá el eje al torque ejercido por el motor hasta llegar a su valor máximo del rango de operación.

3. Justificación

Para la industria, la fabricación de partes y componentes es una función de vital importancia; la búsqueda de reducir los costos de producción, impactos en medio ambiente, tiempos de fabricación reducidos y facilidad de fabricación de dichas piezas y componentes.

Por tales motivos y gracias a los avances de la informática y métodos de fabricación ha sido posible la realización de diseños inteligentes con los cuales la materia prima se aprovecha reduciendo considerablemente los residuos; gran parte de estos diseños en la mayoría de los casos es inspirado en la naturaleza, pero debido a la complejidad del diseño fue muy difícil llevarlos a la práctica tiempo atrás.

Mediante la fabricación aditiva estos diseños es posible llevarlos a cabo permitiendo el aprovechamiento de la materia prima, reducción de residuos, tiempos de producción reducidos permitiendo una mayor competitividad a las empresas.

4. Metodología

Con el propósito de desarrollar un metamaterial el cual se pueda adaptar los requerimientos exigidos para un eje transmisión de potencia y para llevar a cabo esa ambición se hizo necesario dividir el proyecto en 4 etapas que se mencionaran a continuación:

4.1 Búsqueda de información en literatura científica

Durante la primera etapa se realizó una exhaustiva investigación con la finalidad de adquirir bases y conocimientos para poder analizar las posibles arquitecturas celulares que se puedan adaptar para llevar a cabo el objetivo del presente proyecto, los recursos bibliográficos como revistas, libros y artículos fueron obtenidos por medio de la biblioteca de la universidad y la biblioteca virtual de la universidad y artículos publicados en la web.

4.2 Selección de alternativas

Durante esta etapa con la información recopilada se hará una selección de las posibles alternativas las cual se adapten más al perfil de solución del planteamiento inicial, estas alternativas serán evaluadas bajo ciertos parámetros que establecidos de una manera imparcial y con la ayuda de una matriz de decisión de Pugh obtendrá la alternativa más adecuada.

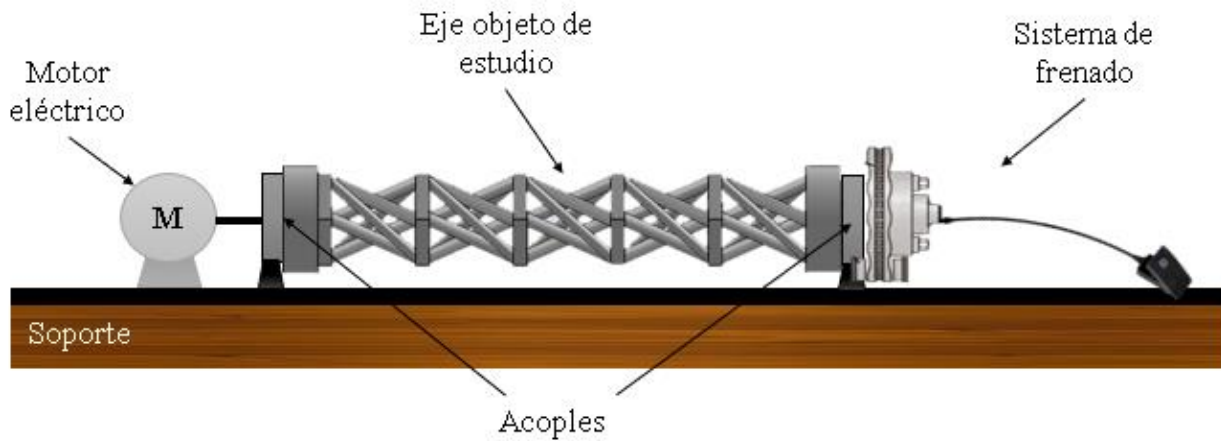
4.3 Diseño y construcción del eje objeto de estudio

Durante esta etapa se realiza el desarrollo de la de arquitectura celular la cual será adaptada al eje de transmisión de potencia objeto de estudio del presente trabajo. En esta etapa la alternativa selecciona también está sujeta a cambio debido a posibles resultados encontrados en el software ANSYS en cual se va a simular el eje objeto de estudio.

4.4 Fase evaluación del eje de transmisión

Durante esta etapa una vez culminada la fase de diseño y construcción del eje transmisión de potencia este será acoplado a la salida de un motor eléctrico el cual se encarga de suministrar el torque al eje objeto de estudio y a su vez el eje se encontrará acoplado un sistema de frenado tal como se muestra en el esquema de la Figura 1. Logrando de esta manera obtener una mejor manera el comportamiento de eje objeto de estudio frente a una situación de trabajo controlada.

Figura 1 Esquema del montaje del eje



Nota. En el esquema se puede apreciar la posición del eje, el cual estará fabricado mediante el método de fabricación aditiva y una vez se encuentre montado se usará el sistema para someterlo a pruebas.

5. Marco Teórico

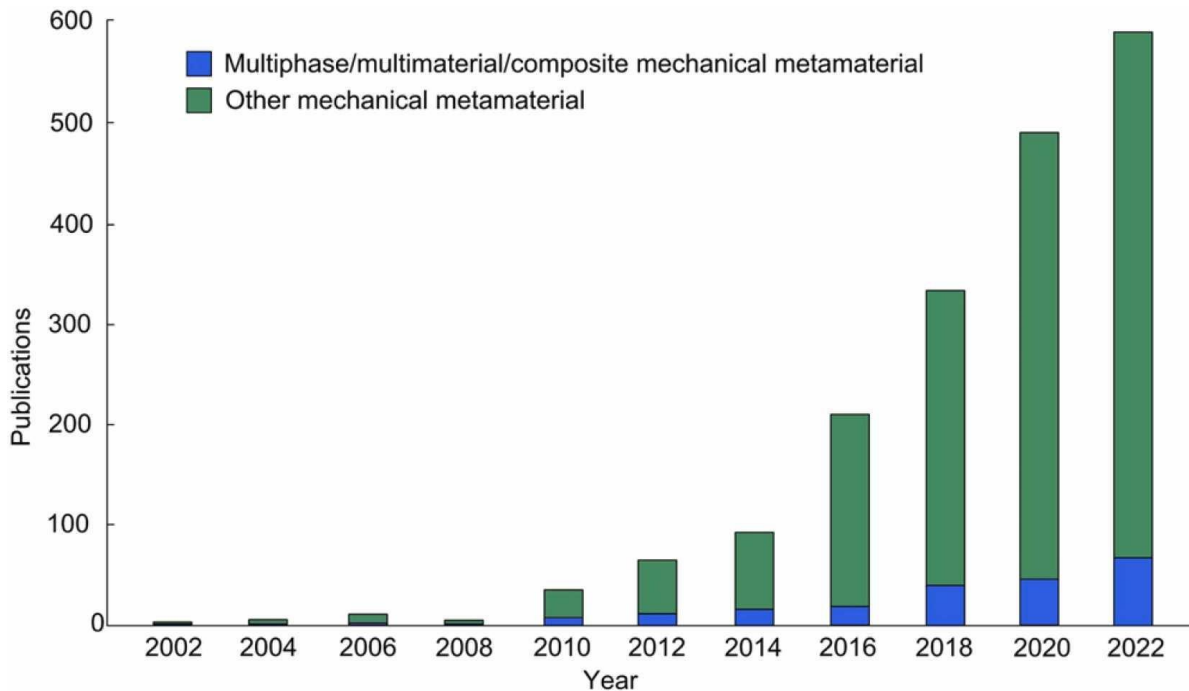
5.1 Metamateriales

Los materiales encontrados comúnmente en la naturaleza presentan reacciones a diversos esfuerzos que son naturales como, por ejemplo, un aumento de la sección transversal al ser sometido a compresión axial, caso contrario una disminución de su sección transversal al someterse a una tracción axial. Estos materiales tienen propiedades mecánicas como una relación Poisson positiva común en materiales ingenieriles conocidos hasta fecha debido a ello la gran mayoría de sus propiedades mecánicas se encuentran relacionadas como el módulo de elasticidad y densidad (Zadpoor, 2016). Debido al rango de posibilidades limitadas que ofrecen los materiales convencionales se han desarrollado materiales creados a partir de una microestructura con propiedades sin precedentes las cuales derivan de la geometría microestructural diseñada racionalmente más que de la composición química del material (Yu et al., 2018).

Los metamateriales inicialmente surgieron en la óptica y electromagnetismo, pero con sus propiedades particulares fueron usados en el ámbito mecánico rápidamente (Kumar et al., 2022); el concepto que ha tomado relevancia en los últimos años gracias a avances en las técnicas de fabricación. En las 2 últimas décadas se ha intensificado más el estudio en los metamateriales mecánicos tal como lo muestra la Figura 2; con el avance de las técnicas de fabricación para citar algunas: impresión 3D, electrohilado, fotolitografía y litografías de última generación, grabado en seco entre otras técnicas mediante las cuales se permite la fabricación de micro/nanoestructuras más complejas y con una viabilidad económica (Barchiesi et al., 2019). Los metamateriales mecánicos pueden ser considerados una familia de los metamateriales

electromagnéticos y acústico, campo en cual se han logrado grandes avances logrando cambiar el comportamiento a diversos esfuerzos mecánicos que abordaremos a continuación.

Figura 2 Número de artículos publicados en Materials Science and Engineering: R: Reports sobre metamateriales mecánicos de 2002 a 2022



Nota. El gráfico muestra de los artículos publicados desde 2002 hasta septiembre del 2022 el cual se aprecia un aumento significativo de artículos relacionados sobre metamateriales mecánicos. Fuente (Chen et al., 2023)

5.1.1 *Materiales Extremos*

Los materiales extremos se caracterizan por ser extremadamente rígidos en algunos modos de deformación y flexibles en otros, estos materiales se clasifican por su vector propio de

elasticidad dependiendo de la cantidad de cada material se puede clasificar como unimodal hasta ideal teórico pentamodal el cual fue propuesto por primera en 1995. Milton y Cherkaev demostraron que es posible crear un material extremo utilizando combinaciones de una fase muy rígida y una fase resistente creando materiales con cualquier tensor de elasticidad definido positivo (Milton & Cherkaev, 1995).

Debido a que los materiales extremos presentan características particulares de ser rígidos bajo unos estados de tensión y blandos en otros son útiles para aplicaciones puntuales en la ingeniería como el control de ondas acústicas submarinas. Los líquidos pueden considerados un tipo espacial de material pentamodal soportan tensión hidrostática y son blandos para cualquier estado de tensión

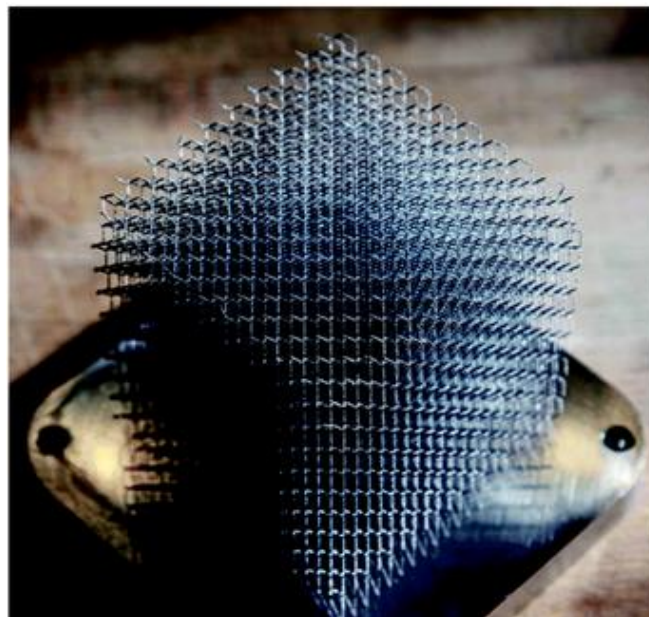
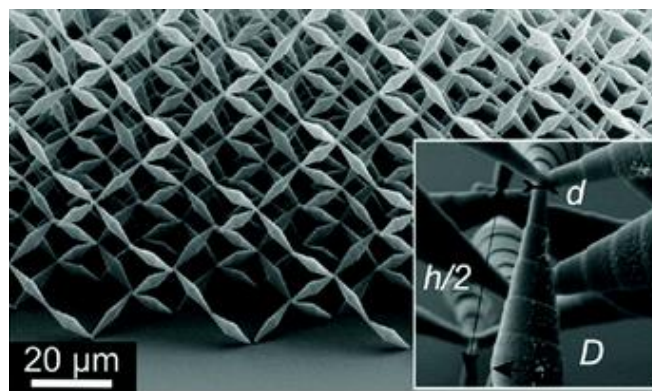
5.1.2 Materiales pentamodales

Los metamateriales pentamodales son un tipo de metamateriales diseñados al extremo pueden considerarse bloques de construcción exóticos debido pueden tener cualquier tensor de elasticidad e seleccionado arbitrariamente, se pueden construir metamateriales intermedios desde quadramodal a bimodal. Un pentamodal posee un módulo de volumen muy grande comparado con su módulo de corte, un módulo de cizallamiento pequeño lo indica de los metamateriales pentamodal fluirán comportamiento que es común en los fluidos que ha hecho que estos también sean llamados metafluidos (Kadic et al., 2012).

El modelo teórico de un metamaterial pentamodal ideal propuesto por Milton y Cherkaev presentado en la Figura 3. El cual consistía en un metamaterial de vigas cónicas unidas en sus bases colocadas en forma de diamante, este modelo no llego a ser probado en su época debido a lo escasamente avanzado de las técnicas de impresión 3D y debido que la punta de las vigas

cónicas en el para el modelo teórico es cero lo que físicamente es imposible. Años después el modelo fue llevado a cabo por Wegener el cual, aunque la punta de las vigas cónicas era finito el comportamiento del modelo real fue similar al teórico.

Figura 3 Modelo teórico de Milton y Cherkaev creado por Wegener y colaboradores utilizando técnicas de impresión 3D



Nota. Micrografía de un metamaterial pentamodal celdas unitarias centrado en las caras con una estructura hexagonal en forma de diamante llevada a cabo por Wegener en 2012.(Zadpoor, 2016)

5.1.3 Memateriales auxéticos

Un término que viene del griego “auxeis” el cual significa “aumentar y crecer”, los metamateriales se caracterizan por una relación de Poisson negativa. Este comportamiento viene dado por su topología a pequeña escala el cual se ve reflejado en las propiedades mecánicas en una macro escala el primer metamaterial auxético fue creado por Lake en 1987 intencionalmente una espuma de poliuretano con una relación de Poisson de -0.7 (W. Yang et al., 2004).

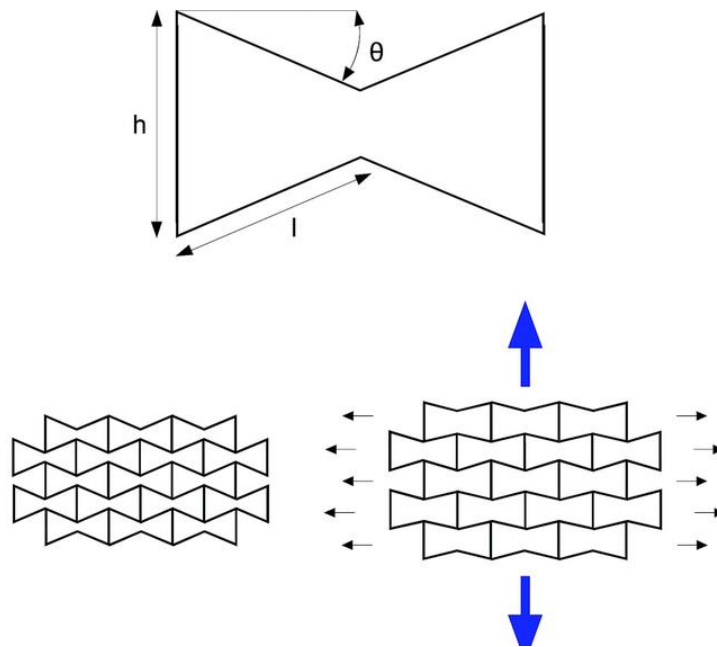
Los metamateriales con una relación de Poisson negativa su comportamiento depende su geometría o microestructura y no varían con la escala al ser sometidos a carga uniaxial(Hou & Silberschmidt, 2015) estos metamateriales presentan un modo de deformación que va en contra de la intuición contrastando con los materiales convencionales conocidos en la ingeniería y con propiedades únicas; el comportamiento de estos metamateriales está relacionado por su estructura interna los cuales se pueden clasificar como estructuras reentrantes , estructuras quirales y estructuras rígidas giratorias.

5.1.3.1 Estructuras reentrantes

Son estructuras en 2D o 3D que se caracterizan por tener un hexágono en la mayoría de los casos, pero con un ángulo negativo tal como se muestran en la

Figura 4, en la cual se presenta una figura reentrante en 2D. En 1982 Gilson presento una estructura celular que presentaba un comportamiento auxético macroscópico el cual consistía en un panal con nervaduras reentrantes las cuales al aplicar una carga de tensión axial se realineaban ampliando de esta manera la sección transversal de la estructura (Barchiesi et al., 2019)

Figura 4 Estructura celular 2D presentada por Gilson en 1982

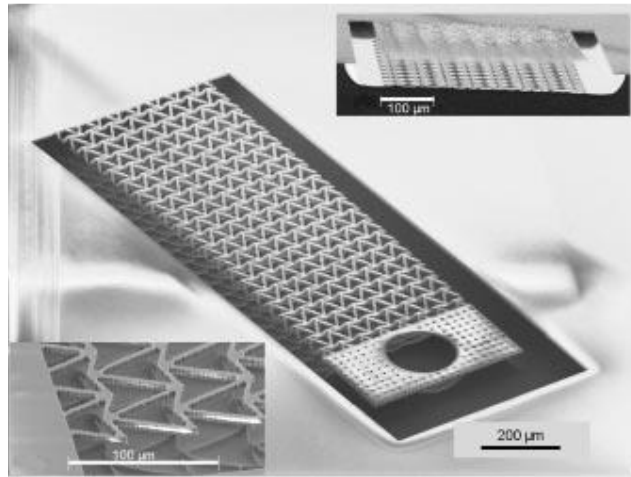


Nota. En la parte superior de la imagen se aprecia la celda unitaria de la estructura celular la cual consiste en un hexágono donde θ es ángulo reentrante y h la altura de la celda; En la parte inferior se puede apreciar el comportamiento de la estructura al aplicar carga de tracción. Fuente (Kolken & Zadpoor, 2017)

- *Panales:* como a la disposición hexagonal de celdas creados por las abejas, pero este será llamado el conjunto de células reentrantes que acumulan para llenar un plano o espacio 3D. Los cuales han demostrado tener una capacidad de absorción de energía elevada comparado con estructuras hexagonales no reentrantes (S. Yang et al., 2013), resistencia al corte y una resistencia a la indentación (Luo et al., 2022). Con el paso del tiempo se han desarrollado nuevos panales los cuales no tienen como base un hexágono reentrante. Obtenido comportamientos similares y procesos de fabricación rápido lo que permite

ensayo de experimental de varios prototipos como el mostrado en la Figura 5 en perdidos cortos de tiempo.(Larsen et al., 1997).

Figura 5 Barra de ensayo con celdas unitarias de tipo triangular



Nota. Prototipo de panel fabricado en vidrio PECVD mediante método de fabricación con micromecanizado con láser. Fuente(Larsen et al., 1997)

Se ha desarrollado diferentes geometrías algunas que van desde una formas vacías en planos 2D las cuales variaba la rigidez o la respuesta auxética dependiendo de la forma de la figura (Overvelde et al., 2012), el diseño se llevó acabó también en metamateriales con base metálica manteniendo un control de la rigidez y la resistencia del estructura mediante cambios en las propiedades del material base manteniendo la relación de Poisson relativamente constante (-0.90)e.(Ghaedizadeh et al., 2016)

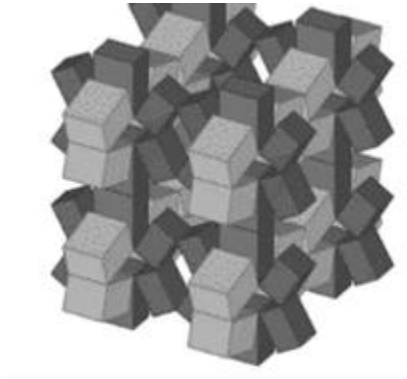
- *Estructuras reentrantes tridimensionales:* las estructuras reentrantes se extendieron a partir de las estructuras 2D, pero debido a su geometría compleja se limitaron los estudios

de estas. Con el avance que han tenido las tecnologías de fabricación aditiva se han logrado construir estructuras de polímeros o metales (X. T. Wang et al., 2018).

5.1.3.2 *Estructuras quirales*: Una estructura quiral típica tiene como una unidad básica un disco o cilindro encapsulado en ligamentos de igual longitud unidos de manera tangencial (Kolken & Zadpoor, 2017), el mecanismo de deformación de estas estructuras se basa tanto en flexión de las nervaduras reentrantes como en rotación del cilindro o disco mostrando un relación de Poisson negativa lo que conduce a un mejor rendimiento en rigidez, absorción de energía respecto a los materiales tradicionales (Jiao & Yan, 2021). Existe una limitación para el desarrollo de estructuras quirales la cual es la simetría rotacional, lo que implica que el número de ligamentos de cada nodo debe ser igual al orden n de simetría rotacional debido a esta limitación solo hay cinco estructuras de este tipo: triquirales, antitriquirales, tetraquirales, antitetraquirales y hexaquirales (Kolken & Zadpoor, 2017)

5.1.3.3 *Estructuras giratorias semirrígidas*: Son estructuras con cuadrados, rombos o triángulos rígidos conectados en sus vértices por bisagras como se puede apreciar en la Figura 6, dando una mayor rigidez a la estructura comparada con las anteriores estructuras reentrantes (Kolken & Zadpoor, 2017). Los efectos de forma de la estructura rígida, el tipo de bisagras y tamaño tiene relación directa sobre el comportamiento mecánico de estructura aunque en algunos consideran la deformación de la unidad rígida como un factor relevante en comportamiento de la estructura bajo carga fue descartado debido a que el tipo de deformación depende en gran medida de la libertad rotación de las conexiones (Hou & Silberschmidt, 2015).

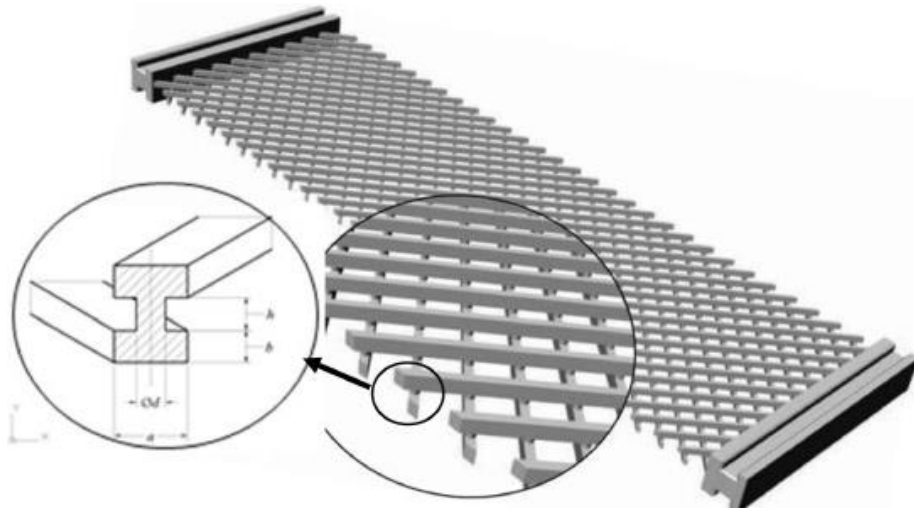
Figura 6 Estructura giratoria semirrígida



Nota. Estructura semirrígida giratoria que está compuesta por una unidad rígida de cubos la cual presenta un comportamiento auxético(Hou & Silberschmidt, 2015)

5.1.4 Metamateriales pantográficos

Los sistemas materiales con estructuras celosía pantográfica se caracteriza por dos conjuntos de fibras rectas ortogonales entre sí, estas matrices se encuentran en dos planos paralelos conectados por pivotes cilíndricos los cuales se considerarse perfectos (Laudato et al., 2020) Esas estructuras están basadas en las biomecánicas de los tejidos vivos. En la Figura 7, se muestra un ejemplo de cómo está conformado un metamaterial pantográfico.

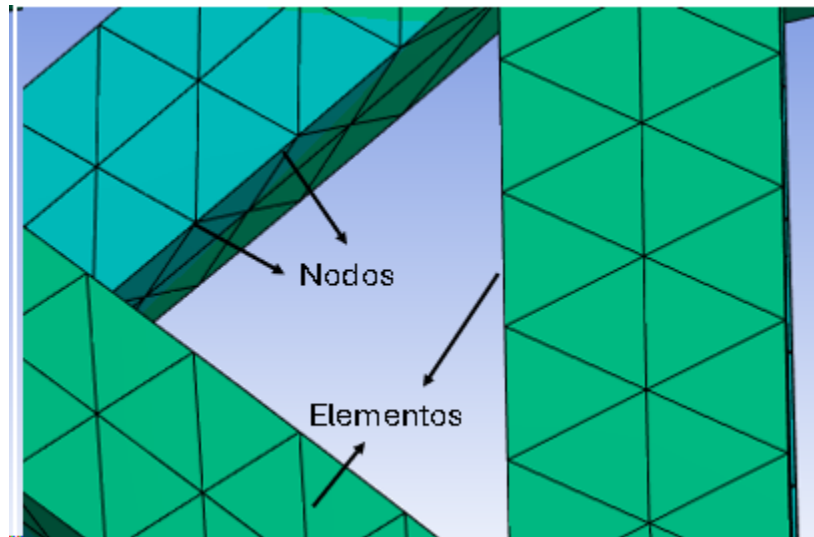
Figura 7 Estructura pantográfica

Nota. La estructura pantográfica se puede ver los conjuntos de fibra unidos mediante los pivotes, estructura que esta soportada en base macizas fuente: (Misra et al., 2018a)

5.2 Método de los elementos finitos (MEF)

El método de elementos finitos es una técnica que fue propuesta en los años cuarenta y puesta en y se llevó a la practica en la siguiente década, desde entonces esta técnica fue desarrollada y aplicada en problemas matemáticos y de ingeniería(Ortiz Prado et al., 2013) .El método consiste en la división de un medio continuo en porciones más pequeñas interconectadas con por una serie de puntos llamadas nodos y los segmentos que unen estos nodos son llamados elementos tal como se muestra en la Figura 8. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del medio continuo también regirán el subdominio de esta manera se consigue pasar un sistema continuo de infinitos grados de libertad a un sistema de finitos grados de libertad cuyo comportamiento también se encuentra regido por las mismas ecuaciones del medio continuo.(Otero Pereiro, 2006).

Figura 8 Partes de un mallado en un análisis de elementos finitos



Nota. En la Figura se puede apreciar los elementos que conforman una malla de un análisis de elementos finitos, la forma y la cantidad puede variar dependiendo del tipo de estructura que se requiera estudiar, así como también precisión que se requiera para tal análisis.

5.2.1 Generación de la malla en elementos finitos

Para la generación de un mallado en un análisis de elementos finitos se debe tener en cuenta varios aspectos como el tipo de elemento que se desea utilizar ya sean hexaedros, prismas triangulares o tetraedros. La selección de alguno de estos tipos de elementos dependerá de la geometría de la pieza a estudiar, la exactitud que se espera del análisis y la disponibilidad de equipos electrónicos con que se cuente para realizar dicho análisis entre otros (Argüello et al., n.d.).

Una malla es geoméricamente válida para ser usada en un análisis finito si esta presenta superposición entre elementos como: aristas, caras o vértices nulos; una consecuencia de esto generación volúmenes nulos o negativos invalidando los resultados del análisis o poca exactitud

con la solución. Muchos softwares para el análisis de elementos finitos cuentan con herramientas semiautomáticas las cuales facilitan la realización de los mallados como el caso de ANSYS, dicho software también tiene incorporado algunos criterios los cuales permiten determinar de una forma rápida la calidad del mallado entre los cuales se encuentran:

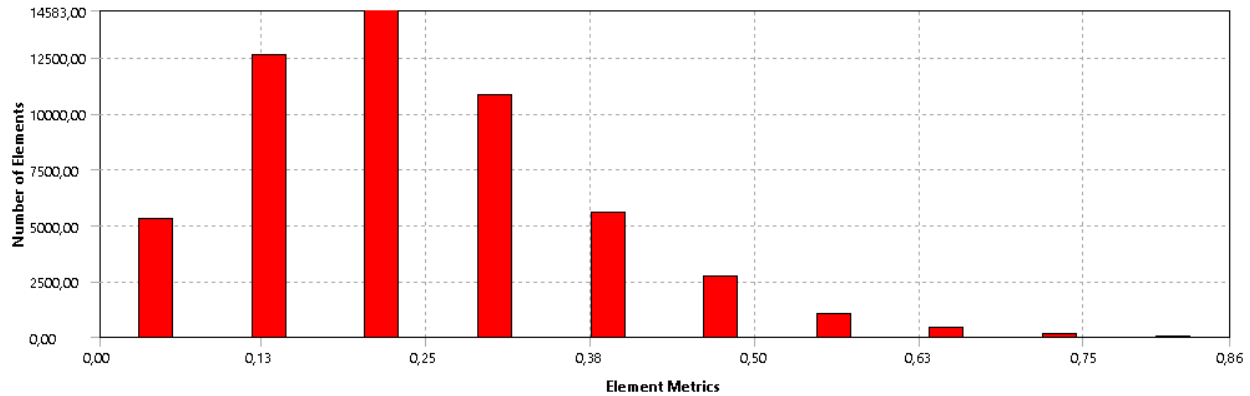
- Oblicuidad (Skewness): este parámetro da una diferenciación entre cada elemento de la malla y el elemento ideal ya sean hexaedros, prismas triangulares o tetraedros. Este parámetro influye en la estabilidad y la precisión de la solución por ende un criterio muy importante de revisar a la hora de realizar un mallado (Carreon, 2020). Este valor debe ser lo más bajo posible entre más cercano dicho valor a cero más preciso y de mejor calidad será el mallado en la tal como se puede apreciar en la Tabla 1, en la Figura 9 se presenta una distribución datos de oblicuidad tomada de ANSYS de un análisis de elementos finitos.

Tabla 1 Escala recomendada por ANSYS para la oblicuidad

Valor de oblicuidad	Calidad de la celda
1	degenerado
0,9-<1	malo
0,75-0,9	pobre
0,5-0,75	regular
0,25-0,5	bueno
<0-0,25	excelente
0	equilátero

Nota. En La tabla se puede ver las recomendaciones dadas por ANSYS para determinar la calidad del mallado (Syed, 2023)

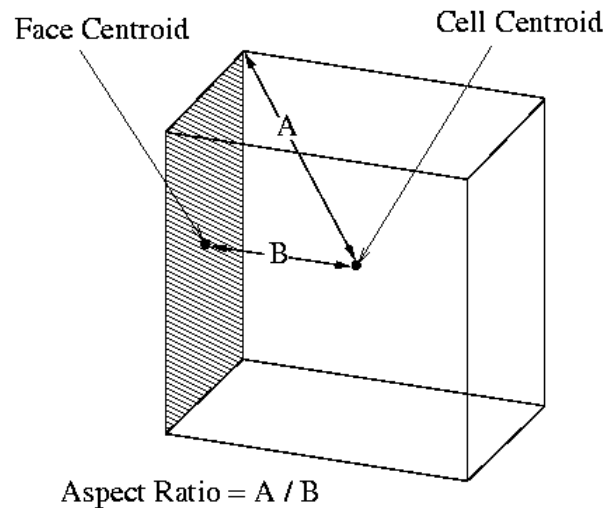
Figura 9 Gráfica del número de elementos de un análisis MEF respecto a la oblicuidad



Nota. En la Figura se presenta distribución datos de oblicuidad de un análisis de elementos finitos en la cual se puede apreciar que la gran mayoría de datos se encuentran por debajo 0,5 lo cual es calidad buena según la Tabla 1.

- Calidad del elemento: es la relación entre el volumen y la suma del cuadro las longitudes del cuadrado o del triángulo en caso de un mallado 2D o la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes para elementos 3D, entre más cercano se encuentre este valor a 1 mejor será la calidad del mallado.(Syed, 2023)
- Relación de aspecto: es criterio que tan esbelta es la celda, es la relación entre la distancia del centroide de la celda a un nodo y la distancia entre el centroide de la celda al centroide de una cara tal como se puede aprecia en la Figura 10, estos valores pueden oscilar entre 1-100 entre mas cercano a uno mejor precisión y exactitud con la solución(ANSYS. inc., 2009).

Figura 10 Cálculo de la relación de aspecto de un cubo unitario



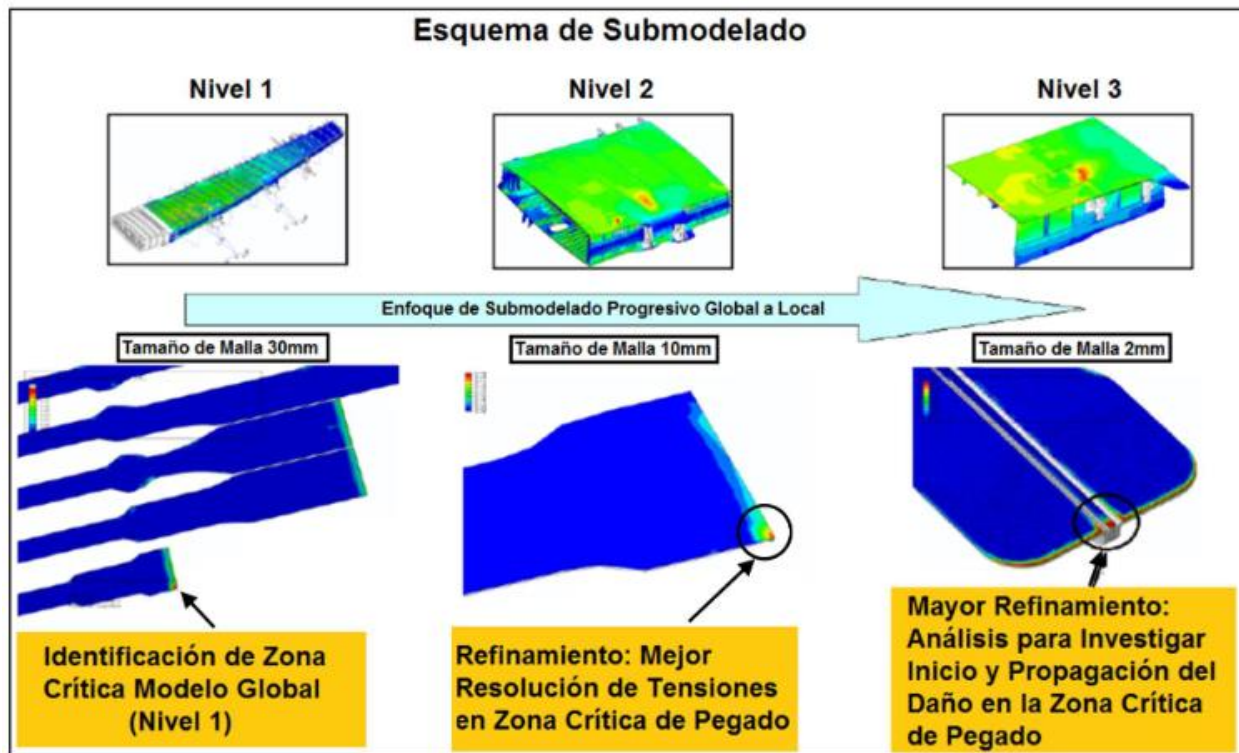
Nota. En la Figura se puede apreciar calculo para determinar la relación de aspecto de una celda cúbica (ANSYS. inc., 2009)

5.2.2 Densidad del mallado

La densidad del mallado tiene implicaciones a tener a la cuenta al momento de aumentar la densidad debido a que otorga más exactitud, pero aumentando los costos y tiempos de computación. Por tal motivo, hay programas que permiten el refinamiento de la malla en puntos críticos de la estructura, un segmento o superficie que se encuentra sometida a cierta carga es vital obtener más precisión en la solución sin tener que sacrificar tanto en costos de computación.

En casos donde la estructuras a analizar son muy grandes pueden hacer se realizan mallados con una densidad relativamente grande y una vez encontrada la pared critica se hacen submodelos y se aumenta progresivamente en la densidad del mallado con el de encontrar el punto crítico y modo de falla tal como se puede apreciar en la Figura 11 en la cual se aumenta la densidad del mallado pero disminuye el volumen(Argüello et al., n.d.)

Figura 11 Submodelado de un ala



Nota. En la Figura se aprecia como se realiza un análisis de elementos finitos aumentando progresivamente la densidad del mallado y enfocando en el punto crítico de la pieza objeto de estudio. (Argüello et al., n.d.)

5.3 Análisis modal

El análisis modal es una técnica de análisis empleada para determinar características dinámicas propias de cada estructura con comportamiento elástico y lineal, teniendo como objetivo la obtención de las frecuencias naturales y modos de vibración de la estructura las cuales determinan su comportamiento ante las cargas dinámicas. Estas características dependen del material, la distribución de la masa y condiciones del contorno (Argüelles Iñiguez Tutor & Rubio Alonso, n.d.).

En la actualidad el análisis modal ha sido una tecnología pilar para determinar, mejorar y optimizar las características dinámicas de las estructuras junto a un análisis de elementos finitos. Los problemas de vibraciones en estructuras siguen siendo uno de los mayores al momento de diseñar equipos y componentes mecánicos, vibraciones que están relacionadas con su funcionamiento por tal motivo, es importante un análisis minucioso evitando un mal funcionamiento temporal, ruido o fallas prematuras del equipo (Del Río Fernández, n.d.).

5.3.1 Frecuencia natural

La frecuencia natural se define como el movimiento vibratorio de un elemento o sistema después de haber sufrido una alteración externa inicial. La frecuencia natural no depende del impulso inicial o de la amplitud es una propiedad inherente del sistema o elemento, un sistema físico con n grados de libertad tendrá n frecuencias naturales (Gómez Peral, 2022).

Todas las estructuras o elementos expuestos a vibraciones externas por trabajo o condiciones del medio de funcionamiento, estas vibraciones forzadas pueden llegar a igualarse una frecuencia natural y como resultado de esto se presentan amplitudes de vibración muy altas a lo que se conoce como resonancia. Con estas vibraciones altas el sistema o elemento puede llegar a fracturarse o un colapso total (Navarro Julio et al., n.d.).

5.4 Manufactura aditiva

La impresión 3D o manufactura aditiva es conjunto de procesos de fabricación en cual se crean piezas agregando capas sucesivas de material a partir de un archivo digital, se puede utilizar cualquier tipo de material los utilizados son polímeros y aleaciones de metal creando piezas complejas de manera eficiente. Es un método de fabricación sostenible debido a que

utilizan menos materia prima y generan menos subproductos (Woodson et al., 2019). Las técnicas de fabricación aditiva pueden variar dependiendo del tipo de material utilizado, presupuesto y tiempo de fabricación.

5.4.1 Métodos de impresión 3D

5.4.1.1 Fusión por haz de electrones

Ha sido reconocida como una técnica revolucionaria que permite producir piezas en masa con geometrías usando un haz de electrones para fundir polvo metálico capa por capa creando estructuras completamente sólidas permite trabajar con espesores de capas y tamaños de granos variados sin tener consecuencias notables en el resultado final (Karlsson et al., 2013).

5.4.1.2 Sinterización selectiva con láser (SLS)

Es proceso de fabricación aditiva donde un láser sinteriza polímeros termoplásticos en forma granular de manera selectiva fusionándolas y construyendo una pieza capa por capa sin necesidad de un soporte obteniendo como resultado piezas con propiedades mecánicas buenas y consistentes; una pieza fabricada por SLS tiende a contraerse entre 3 y 3.5% al enfriarse factor que es importante a tener en cuenta antes de la fabricación; otro aspecto importante es la sobresinterización que ocurre cuando el calor radiante fusiona polvo no sinterizado alrededor de una pequeña ranura o agujero por lo que se recomienda piezas con ranuras superior a 0.8 mm y diámetros de agujeros superior a 2 mm con el fin de evitar la sobresinterización y perder detalle en la pieza (Protolabs Network, 2020).

5.4.1.3 Estereolitografía – (SLA)

Fue la primera tecnología de manufactura aditiva patentada en 1986 por Charles Hull, tecnología con un alta precisión y exactitud utiliza una resina de fotopolímero líquida que es curada por una fuente de luz (Coelho et al., 2018) ,otras tecnologías similares son el procesamiento de luz digital(DLP) utilizando un proyector digital de como de luz ultravioleta para curar , pantalla de cristal líquido(LCD) utiliza una pantalla LCD para proyectar patrones de luz específicos (Protolabs Network, 2020).

SLA utiliza rayos UV los cuales realizan un curado selectivo creando un objeto capa por capa las cuales pueden variar entre 25 y 100 micrones, donde se obtiene una mejor precisión con un espesor de capa menor, pero incrementa los costos y tiempos de fabricación. Las piezas fabricadas por este método requieren de soporte los cuales sostiene la pieza y deben ser retirados al tener proceso de impresión.

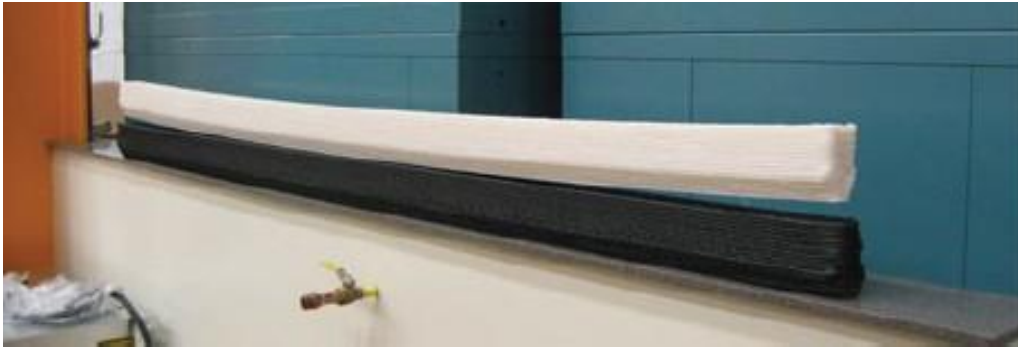
5.4.1.4 Modelado por deposición fundida (FDM)

Es una técnica bastante común donde se extruye un filamento de un termoplástico por encima de su temperatura de fusión por medio de una boquilla capa por capa para crear un objeto 3D; entre los polímeros termoplásticos más utilizados se encuentran acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) y el ácido poliláctico (PLA), pero también se han considerado la policaprolactona (PCL) y policarbonato (PC) (Dul et al., 2016).

Una de las principales limitaciones de esta técnica son limitadas propiedades mecánicas de las piezas impresas, por tal motivo un estudio mostro que la adición de fibra carbono mejora significativamente la resistencia, geometría y la rigidez de la pieza de impresión 3D; en la Figura 12 es evidente la mejora de tanto en forma como de las propiedades mecánicas de una pieza con

adición de carbono (pieza de color negro) frente a pieza solo fabricada a partir de ABS (pieza de color blanco) (Love et al., 2014).

Figura 12 Comparación entre una pieza de ABS y una pieza con de ABS con 13% de carbono.



Nota. En la figura se puede apreciar la diferencia tanto en rigidez como geometría final entre la pieza blanca realizada ABS y la pieza negra ABS/fibra de carbono 13% donde la curvatura es insignificante y con buenas propiedades mecánicas. Fuente (Love et al., 2014)

5.4.1.5 Fusión de chorro múltiple (MJF)

Es un método de fabricación aditiva creado recientemente utilizando polímeros en polvo (típicamente nylon) llevando a cabo la sinterización con un agente de fusión y un agente de detalle para unir los polvos mediante radiación infrarroja dando como resultado método de fabricación eficiente reduciendo los tiempos de producción de una pieza drásticamente (Wu et al., 2020).

5.4.2 Materiales comunes usados en impresión 3D

A medida los métodos de impresión 3D se diversifican los materiales también lo hacen y se pueden encontrar como polvos, filamentos, gránulos y resinas cada uno para aplicación

distinta las cuales pueden variar acorde al método de impresión 3D y la aplicación final de la pieza fabricada.

5.4.2.1 Polímeros

Los materiales para impresión 3D con más ampliamente usado se encuentran los polímeros los cuales se usan desde prototipos hasta piezas funcionales. Los cuales mediante el método de modelado por deposición fundida se emplean filamentos que posteriormente son extruidos capa tras capa llegan crear piezas con geometrías complejas, estos filamentos termoplásticos suelen ser acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poliláctico (PLA), poliamida (PA o nailon), policarbonato (PC), poliamida (Pa o nailon) polieterecetona. (PEEK), polietirimida (PEI), polietersulfona (PES) .(Caminero et al., 2018) y algunas de sus propiedades mecánicas se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2 Propiedades mecánicas de algunos materiales usados en impresión 3D

Material	Densidad [g/Cm³]	Módulo de Young [Mpa]	Coefficiente de Poisson	Módulo de cortadura [Mpa]	Tensión máxima (σ_{max}) [Mpa]	Tensión de fractura (σ_f) [Mpa]
PLA	1,24	3306,8	0,337	1234,66	36,31	36,31
ABS	1,04	1924,6	0,377	699,07	37,40	31,75

Nota. En la tabla se puede apreciar algunas de las propiedades mecánicas de algunos materiales más comunes en la impresión 3D, se puede destacar su baja densidad comparada con los metales y sus aleaciones. Este tipo de materiales es común encontrarlos en filamentos y las propiedades mecánicas en la tabla varían de la calidad del filamento, color del material o la marca de este (Jaén et al., 2017).

5.4.2.2 Metales

La impresión 3D en metales tiene mucha importancia debido a las propiedades mecánicas de los materiales y sumado a la precisión de y la facilidad para reproducir piezas complejas. Se han incursionado en campos como la biomédica para realización de prótesis y órganos de una manera muy precisa y sin desperdicio de material; en el campo aeroespacial la impresión 3D ha facilitado la construcción de muchos componentes los cuales puedes llegar a tener geometrías complejas (Shahrubudin et al., 2019).

6. Diseño conceptual de la forma de la forma del metamaterial

Para iniciar con el diseño conceptual se toma como base el método de fabricación y los materiales a llevar acabo la pieza; el método de fabricación será manufactura aditiva, modelado por deposición fundida debido a que la tecnología que se encuentra en la Universidad Industrial de Santander y los polímeros termoplásticos más utilizados se encuentran acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) y el ácido poliláctico (PLA), pero también se han considerado la policaprolactona (PCL) y policarbonato (PC).

6.1 Planteamiento de alternativas

las estructuras de metamaterial planteadas para el análisis fueron recopiladas de diversos artículos y textos bibliográficos relacionados con metamateriales los cuales soportaban esfuerzos de torsión. Debido a que algunas arquitecturas celulares varían mucho en su forma se optó por tener lineamientos con los cuales definir su forma entre los cuales se encuentran: un espesor mínimo de 3 milímetros, una longitud máxima de 160 milímetros, en el caso de que la

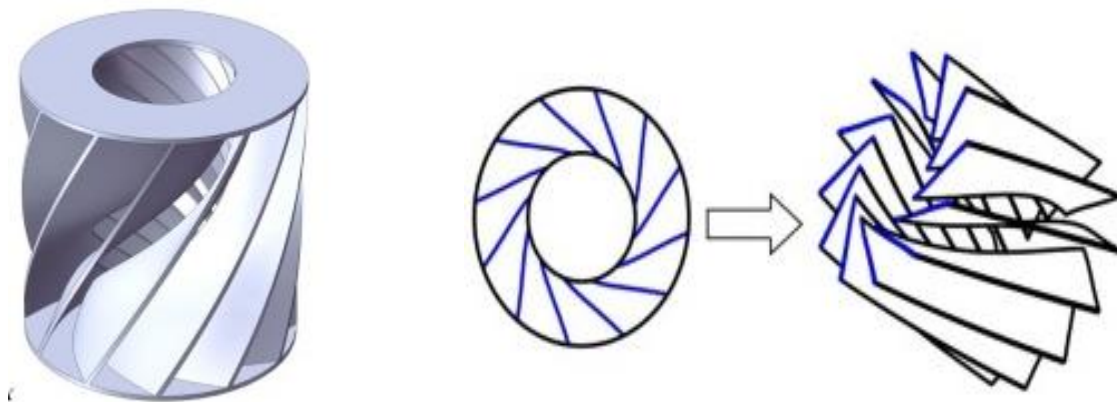
arquitectura celular pueda adaptarse a una forma de eje se optó un diámetro de 30 milímetros y todas será realizadas en ABS para selección de la alternativa.

Con los parámetros de forma definidos para selección de las alternativas se busca tener una equidad al momento de seleccionar la opción más optima.

6.1.1 Alternativa 1

Esta alternativa consta de una estructura cilíndrica con superficies que siguen el perfil de una hélice cuyo ángulo varia $20^\circ < \theta < 70^\circ$. Las superficies se encuentran contenidas entre dos placas circulares con una perforación concéntrica tal como se muestra en la Figura 13, el radio de la perforación puede variar al igual que numero de superficies dando de esta manera la posibilidad de aumentar la resistencia de la estructura(Y. Bin Wang et al., 2020a).

Figura 13 Alternativa 1



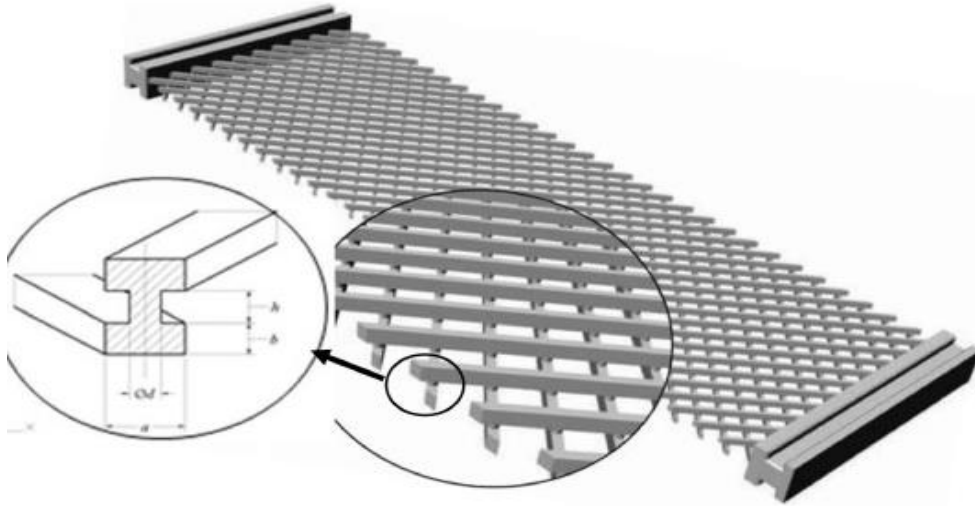
Nota. En la figura se puede ver diseño de la alternativa 1, la cual se puede ver claramente el ángulo de inclinación de las superficies en la parte izquierda y como esta estructura está

constituida y en la parte del centro se puede ver de una manera simplificada la vista inferior del metamaterial.(Y. Bin Wang et al., 2020b)

6.1.2 Alternativa 2

La segunda alternativa es una estructura celosía pantográfica la consta de dos familias de vigas o barras ortogonales equidistantes las cuales se encuentra unidas por medio pivotes; así como se muestra en la Figura 14. Cabe resaltar que los pivotes son de un material más resistentes que las vigas (Misra et al., 2018b).

Figura 14 Alternativa 2



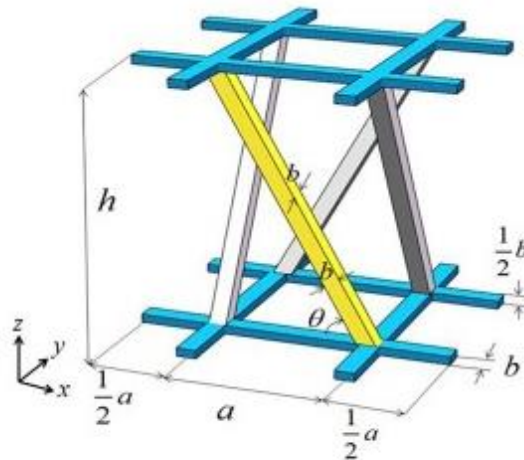
Nota. En la imagen se muestra la configuración de la alternativa 2 en cual se puede ver cómo están distribuidas las familias de vigas unidas mediante el pivote el cual puede ser del mismo material u otro material, pero se recomienda el uso de un material más resistente que las vigas.(Misra et al., 2018b)

6.1.3 Alternativa 3

En esta alternativa celda unitaria es basada en como los árboles desarrollan una resistencia a la torsión en lugares donde las corrientes de viento son más fuertes, los troncos de los árboles presentan estructuras más complejas.

Esta alternativa consiste en dos cuadriláteros unidos en sus vértices de manera diagonal tal como se aprecia en la Figura 15, las barras que unen los vértices de los pueden variar su ángulo de inclinación de 30° a 60° (Zhong et al., 2019).

Figura 15 Alternativa 3

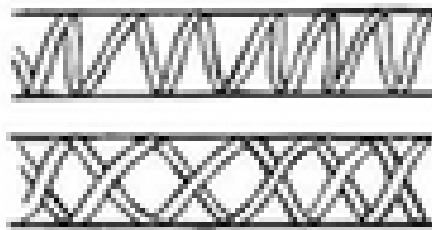


Nota. En la imagen se ve la celda unitaria el consiste en dos cuadriláteros unidos por barras diagonales las barras; las dimensiones pueden a, b, h y el ángulo pueden ser modificables para adaptarse de una mejor manera a los requerimientos de la aplicación.(Zhong et al., 2019)

6.1.4 Alternativa 4

Esta alternativa se basa el refuerzo del tallo de girasol con una fibra de refuerzo que crece en espiral en la parte interior del tallo, esta fibra puede ser doble en sentidos opuestos dando al tallo una estructura con una gran resistencia a la torsión. Ésta alternativa consta de un cilindro hueco una espiral de refuerzo en la parte interior tal como se aprecia en la Figura 16. (Buccino et al., 2021).

Figura 16 Alternativa 4



Nota. En la Figura en la parte superior se puede apreciar un refuerzo en sentido antihorario el presenta una mayor resistencia a la torsión en sentido horario. En la parte inferior de la Figura se aprecia una estructura con doble refuerzo la cual presenta la misma resistencia sin importar el sentido de la torsión.(Buccino et al., 2021)

6.1.5 Alternativa 5

Esta alternativa consta de un diseño ligero, una celda hiperbólica quiral la cual tiene como base un polígono regular en ambos extremos con fin de facilitar la construcción, los puntales laterales que unen los dos polígonos pueden unirse de un vértice del polígono en la base hasta 3 vértices en sentido horario o antihorario de su polígono homologo superior tal como se puede ver en la Figura 17. (Meng et al., 2020).

Figura 17 Alternativa 5

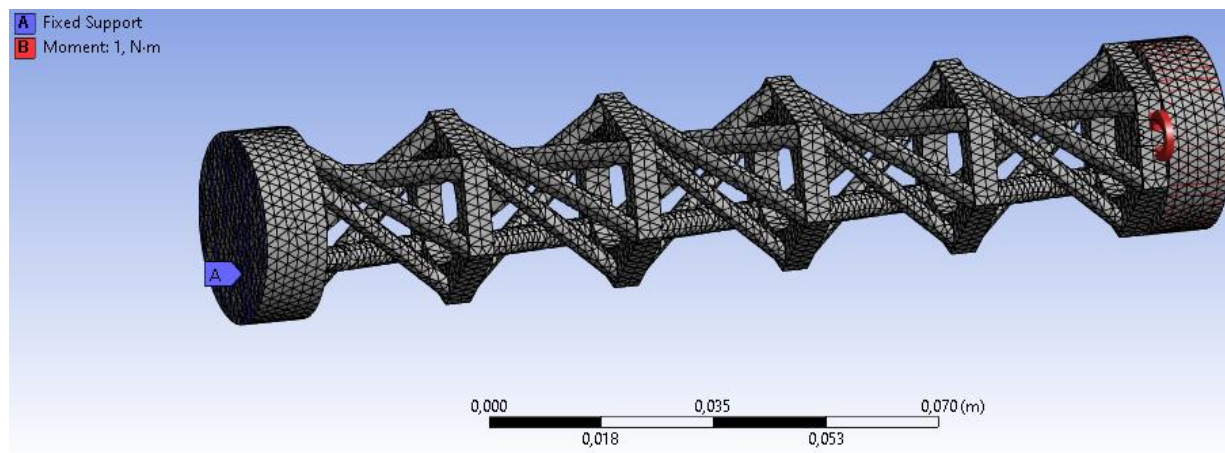


Nota. En la imagen se puede la forma de la celda unitaria, la cual consta de dos polígonos los cuales pueden aumentar el número sus lados así como se puede apreciar en la imagen que van de 3 a 6 lados incluso a más; también se puede apreciar que los vértices se encuentran con uno o dos vértices más adelante o atrás de contraparte. (Meng et al., 2020)

6.2 Análisis de las alternativas

Una vez plantadas las alternativas se modelan mediante el software de SolidWorks y con la del software de ANSYS en la sección Mechanical se simulan las alternativas. Las alternativas están fabricadas en ácido poliláctico (PLA), estas tendrán una cara fija y al otro extremo se aplica un torque de 1 N-m tal como se puede apreciar en la Figura 18.

Figura 18 Esquema de la simulación



Nota. En la Figura se puede apreciar el montaje realizado a la hora de realizar la simulación de las alternativas donde la parte izquierda con la cara se encuentra fija y al otro extremo de la pieza se aplica un torque distribuido sobre una placa circular maciza tal como se puede apreciar en la parte derecha de la Figura

Una vez simuladas las cinco alternativas se realizó una tabla la cual contenían el volumen de cada alternativa, deformación total presentada, factor mínimo de seguridad y el esfuerzo máximo presentado los cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Datos obtenidos de las simulaciones de las cinco alternativas

Alternativa	Volumen [mm³]	% Deformación [mm]	Factor de seguridad mínimo	Esfuerzo máximo presentado [MPa]
1	38561	13,04	1,5807	1,07E-02
2	115447	6,30	1,6227	2,09E-02
3	19548	14,57	0,7390	9,14E-03
4	61340	0,07	15	7,53E-03
5	29798	24,41	0,6015	2,81E-02

6.3 Selección de alternativa

Una vez planteadas las alternativas se evaluarán con el fin de encontrar la alternativa más que se adecue con los objetivos del presente trabajo, las alternativas serán evaluadas bajo ciertos criterios los cuales permitirán determinar la opción más acorde los objetivos planteados para este proyecto. La selección de la alternativa se llevará a cabo bajo una matriz de decisión Pugh, los parámetros que se usaran se enuncian a continuación:

- **Volumen:** el volumen de una alternativa representa un factor muy importante debido a que más material acarrea un costo en la fabricación,

materiales y tiempo de producción. Por estas razones el volumen es factor importante para para reducir costos en tiempos de producción y materiales.

- Deformación: la deformación será otro factor importante debido a que al cambiar la geometría del eje objeto de estudio este cambio puede influir en la respuesta de la estructura durante el trabajo. Por tal motivo es importante que la geometría no presente cambios significativos superando el punto de fluencia del material y la deformación sea irreversible.
- Esfuerzos: la estructura seleccionada no debe presentar concentradores de esfuerzos, los cuales pueden ser un foco para futuras fallas a mediano y largo plazo. Las estructuras serán sometidas a una carga de testeo con la cual se analizará tanto la deformación y el esfuerzo presentado dicha carga.
- Manufactura: otro factor a tener en cuenta durante la calificación de las estructuras serán la complejidad para la fabricación y ensamble de los componentes en caso de ser necesario, así como también geometrías que puedan tornarse difíciles a la hora de realizar acabo la impresión de la estructura.

Una vez planteados los criterios para la evaluación de las alternativas se realiza una calificación con la ayuda de matriz de decisión Pugh. Los criterios planteados se les asigno un porcentaje de acuerdo con la relevancia que estos tenían para el proyecto tanto el volumen como la deformación fueron los criterios con mayor debido a que el objetivo del proyecto es la reducción de materiales de fabricación y diseño que satisfaga los requerimientos exigidos. El

rango de calificación de será de uno a cinco donde uno será el no incumplimiento del criterio y cinco será el cumplimiento a cabalidad del criterio.

En los resultados de la calificación se puede ver en la Tabla 4 que tanto la alternativa 1 y 4 estuvieron muy cercanas, aunque la alternativa 4 presento una mejor respuesta en términos de deformación y distribución de esfuerzos el volumen fue casi el doble comparado con la alternativa 1 la cual, aunque presento un factor seguridad más bajo no llego supero el punto de fluencia del material.

Cabe resaltar que la alternativa 3 se obtuvo una deformación irreversible, presento una excelente respuesta comparado con la cantidad de material utilizado para realización de su estructura, sin embargo, debido a que era de vital importancia que el eje simulado no presentara deformaciones irreversibles.

Se esperaba que la alternativa 2 al tener una mayor cantidad de material para su construcción presentara deformaciones muy pequeñas, pero no fue así como se puede evidenciar en la Tabla 3.

Tabla 4 Matriz de decisión Pugh para la calificación de alternativas

Criterio	Peso del criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
Volumen	35%	4	1	5	2	5
Deformación	35%	4	3	1	5	1
Esfuerzo máximo presentado	15%	3	3	3	5	1
Manufactura	15%	3	1	1	3	3
Total		3,7	2	2,7	3,65	2,7

Según los resultados obtenidos de la matriz de decisión de Pugh la alternativa que obtuvo un mejor resultado fue la alternativa 1. Por tal motivo será la alternativa seleccionada con la que se desarrollará el presente proyecto. Para este desarrollo la alternativa será modelada y simulada con PLA debido que es material más rígido comparado con el ABS tal como se puede apreciar en la Tabla 2.

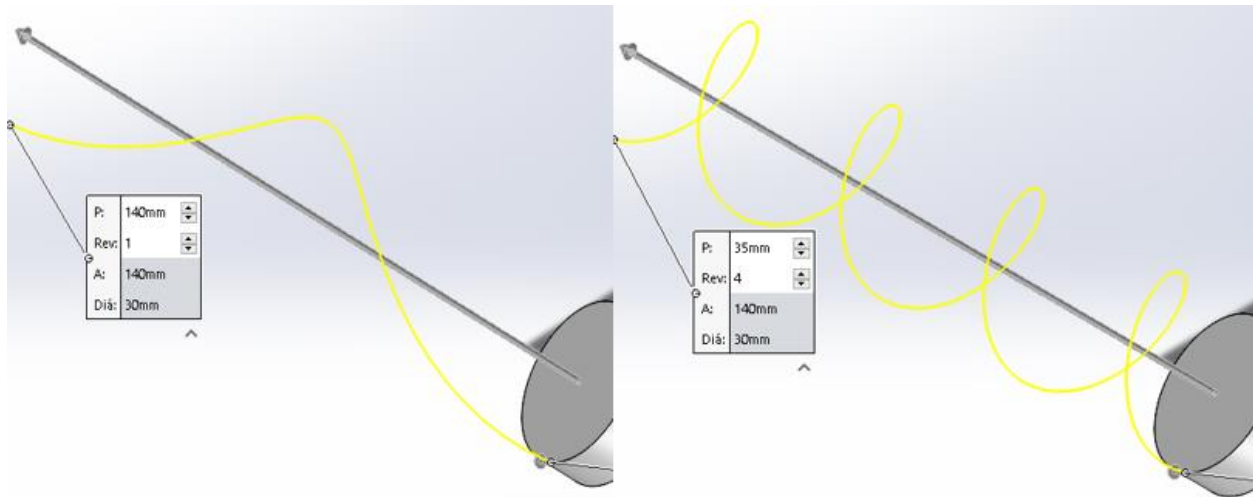
7. Optimización y desarrollo de la alternativa

Con el fin de obtener un mejor desempeño se opta por variar ciertos parámetros de la alternativa manteniendo su volumen inicial 38600 mm^3 de manera fija y debido a que el desarrollo de la alternativa será ácido poliláctico (PLA) del cual sus propiedades mecánicas se encuentran en la Tabla 2 las cuales se tomarán como punto de referencia para variaciones a realizar. Los parámetros para variar serán el número de superficies y paso de hélice.

7.1 Variación del paso de hélice

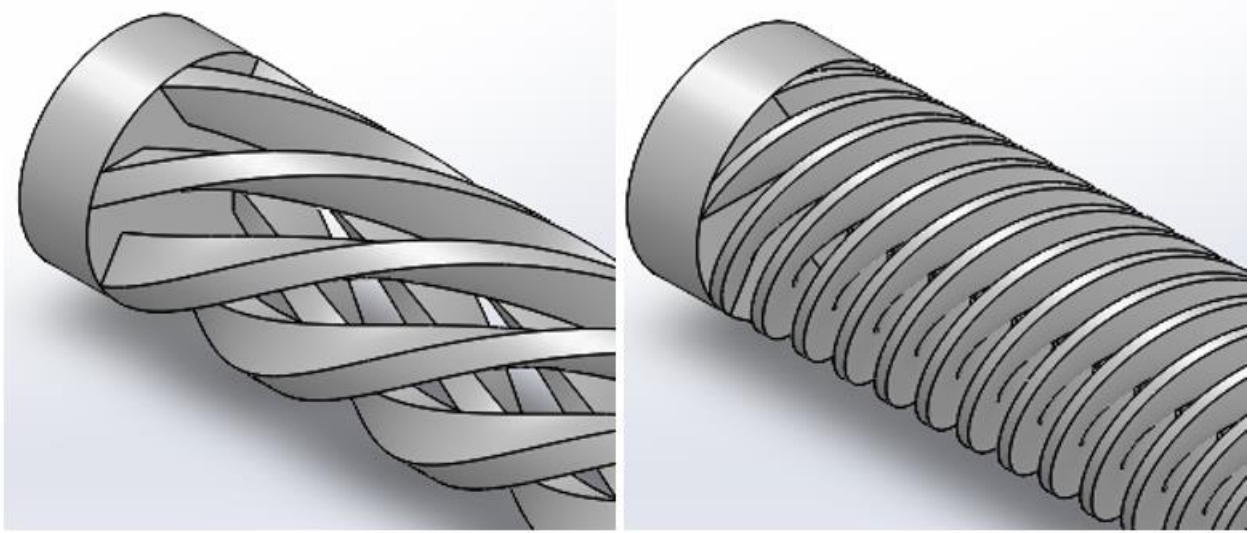
Se varía el paso de la hélice aumentando de manera progresiva su paso y reduciendo el espesor de las superficies con el fin de garantizar el volumen constante. Con la ayuda de SolidWorks se varía el paso de la hélice tal como se muestra en la Figura 19.

Figura 19 Variación del paso de la hélice, vista isométrica del perfil de la hélice guía



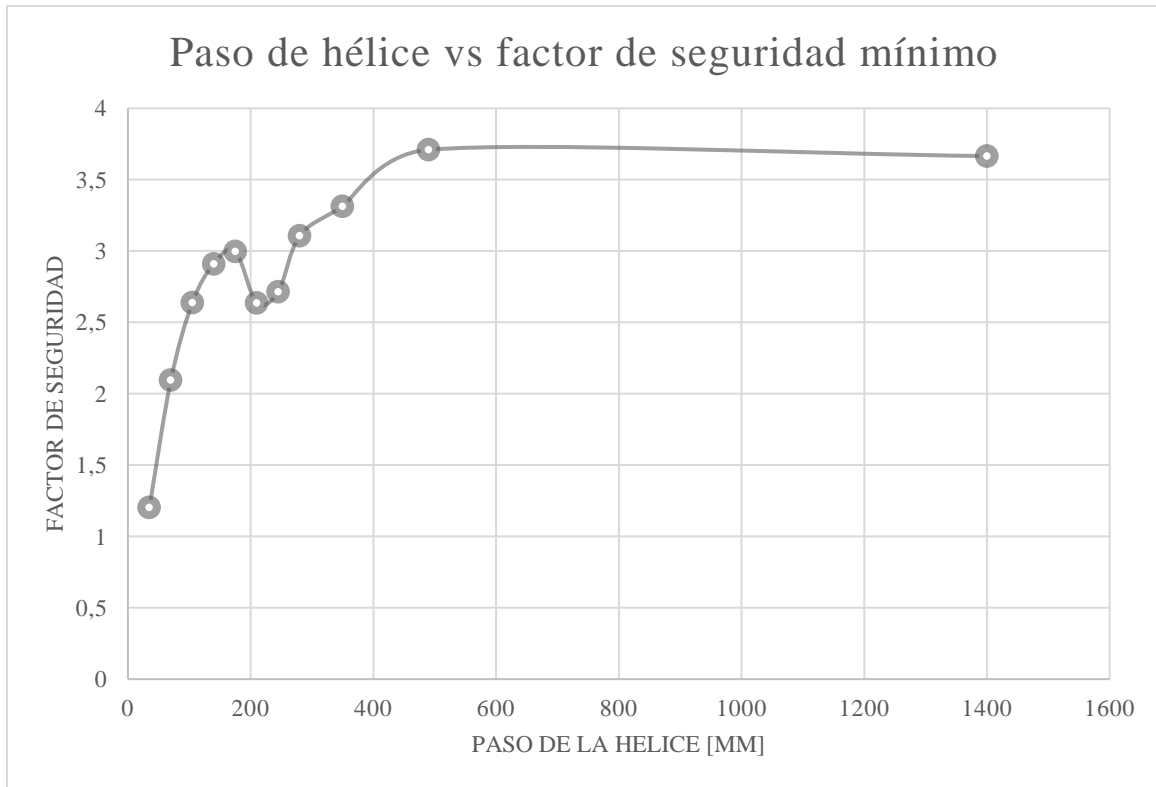
Se le da orden al software de variar el paso de la hélice de la alternativa original ya sea aumento el espesor de la superficie al tener un menor número de vueltas o disminuyendo dicho espesor al tener una mayor de vueltas tal como se puede apreciar en la siguiente Figura 20. Garantizando de esta manera esta que todos los parámetros se mantienen constantes y lo único que varía es el paso de la hélice y la distribución del material para generar dicha superficie que sigue la hélice.

Figura 20 Variación del paso de la hélice, modelos CADs



Una vez establecidos los parámetros los cuales se iban a variar para esta fase del proyecto, se realiza la simulación de los diferentes pasos a las mismas cargas y modos de aplicación las cuales fueron implementadas durante la selección de la mejor alternativa. Estos datos se tabularon y se graficaron, grafica en la cual se puede apreciar el cambio del paso de la hélice afecta la respuesta de la estructura tal como se puede apreciar en la Figura 21.

Figura 21 Diagrama de paso de hélice vs factor de seguridad mínimo



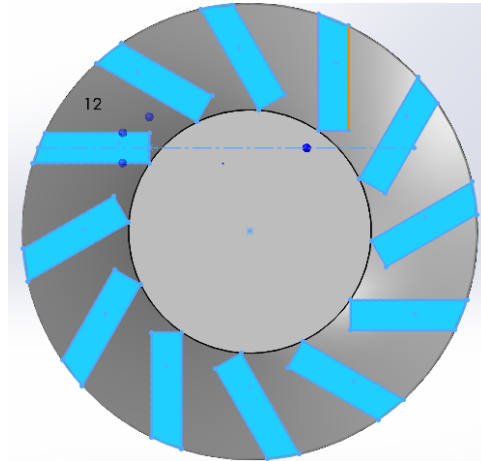
Como se puede ver en la Figura 21 el paso de hélice donde la estructura presenta un factor de seguridad mínimo más elevado se encuentra a un valor cercano a 490 mm y desde ese punto la gráfica presenta una decadencia hasta llegar un paso infinito, lo que sería igual tener la estructura sin un paso tal como se puede ver en la Tabla 5 donde el valor es mucho más bajo de que se podría presentar con pasos de hélices alrededor 490 mm.

Tabla 5 Resultados obtenidos de la simulación para pasos de hélices grandes

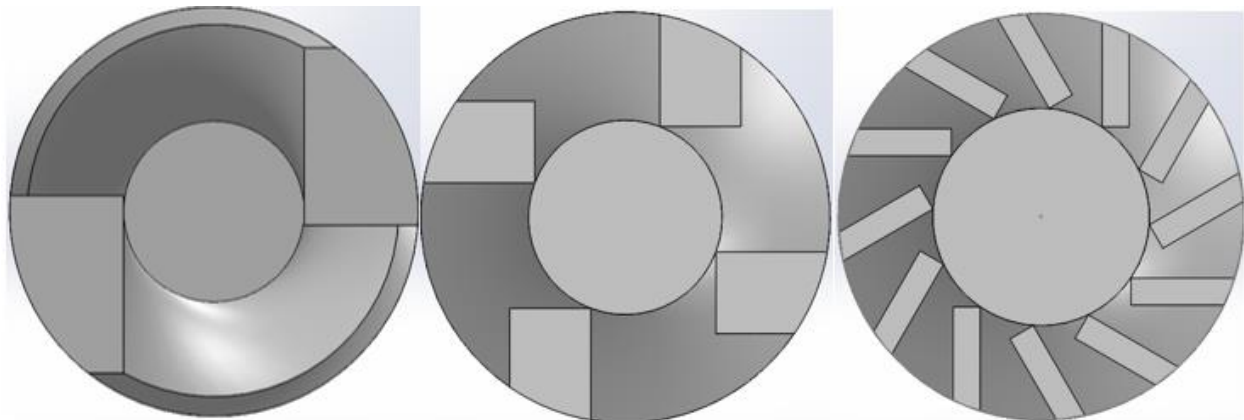
Paso de hélice	Deformación [m]	Esfuerzo [Mpa]	Factor de seguridad mínimo
1200	2,47E-03	3,00E-03	3,6652
1250	2,47E-03	3,00E-03	3,6648
1300	2,47E-03	3,00E-03	3,6712
1350	2,47E-03	3,02E-03	3,6382
1400	2,47E-03	3,00E-03	3,6653
1550	2,47E-03	3,01E-03	3,6566
2800	2,47E-03	3,01E-03	3,6622
10000	2,47E-03	2,98E-03	3,6037
Infinito	2,47E-03	4,73E-03	2,8884

7.2 Variación de la cantidad de superficies

La variación de la cantidad de superficies se realiza manteniendo el volumen constante, área transversal constante y el paso de hélice se mantiene constante. Para generar estas superficies se divide el área transversal en la una cantidad polígonos iguales con el mismo distanciamiento angular tal como se muestra en la Figura 22. Cada superficie sale estos polígonos de color celeste los cuales siguen un perfil dado por la hélice.

Figura 22 Forma de la variación de las superficies

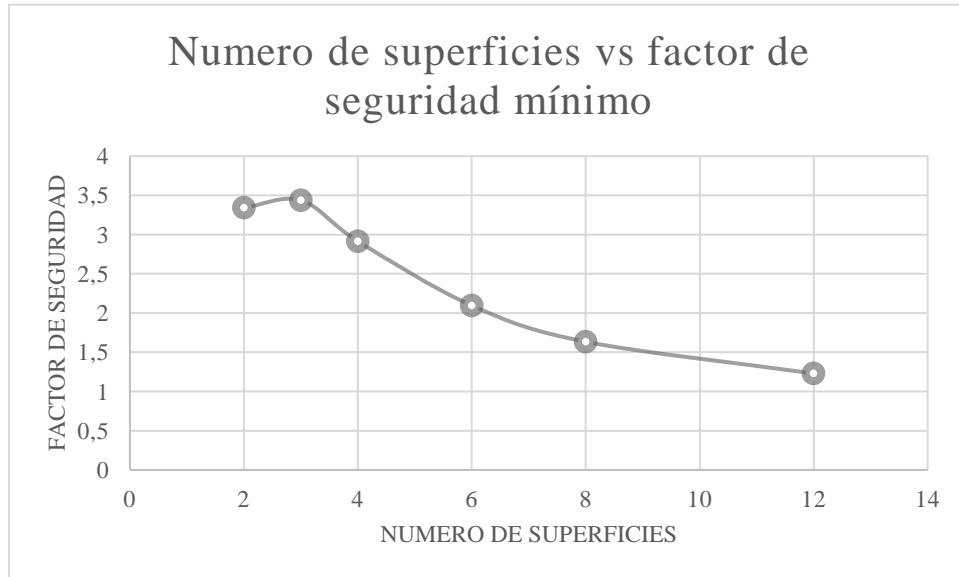
Para realizar la variación de superficies se tomó un punto medio del polígono sobre el cual se cambia el ancho de las superficies a partir de ese punto medio como aprecia en la Figura 23, se disminuye el área (color celeste) que encierra cada polígono y se aumenta la cantidad de polígonos manteniendo la separación uniforme tal se puede apreciar en la Figura 23.

Figura 23 cambio de la sección transversal al variar el número de superficies

Nota. En la Figura se presenta la configuración de cómo se varía el número de superficies generadas a partir de cada polígono, a mayor número de superficies menor área encierra el polígono

Una vez realizados los CADs se realizan las simulaciones bajo las mismas cargas y modos de aplicación al igual que los casos anteriores, estos datos de las simulaciones fueron tabulados y graficados los cuales se muestran en la Figura 24.

Figura 24 numero de superficies vs factor de seguridad mínimo

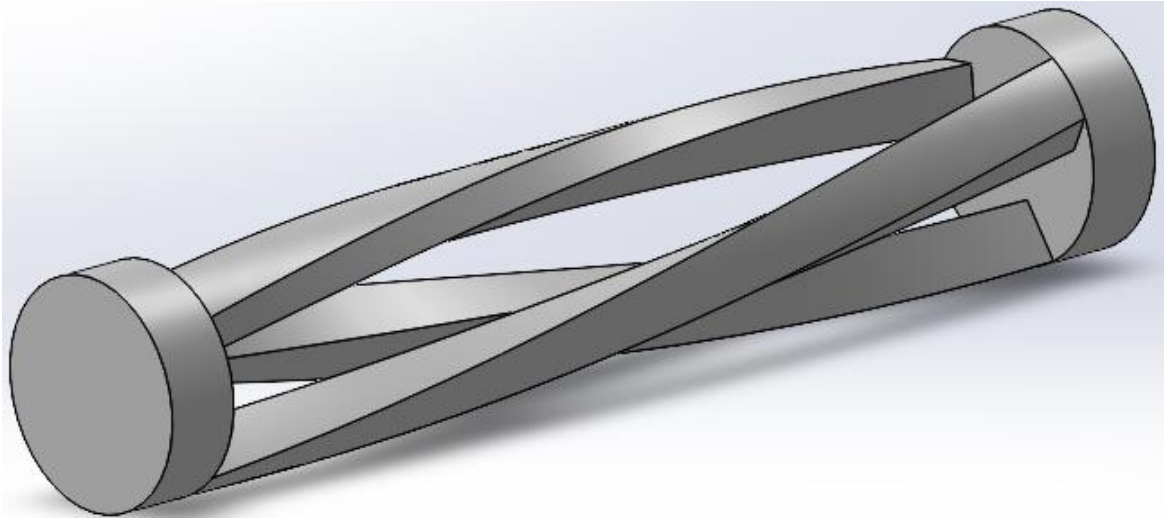


En la Figura se puede ver que el número de superficies óptimo es de 3, a partir de un número de 12 superficies el comportamiento de la estructura no presenta variaciones significativas.

7.3 Análisis de la mejor combinación de la alternativa seleccionada

Con base en los valores obtenidos de las simulaciones realizadas se puede ver que la estructura presenta un mejor desempeño con un paso de hélice de 490 mm y tres superficies. Por tal motivo se realiza un el CAD (Computer Aided Design o Diseño Asistido por Ordenador) con un paso de 490 mm y un número de tres superficies la cual se muestra en la Figura 25

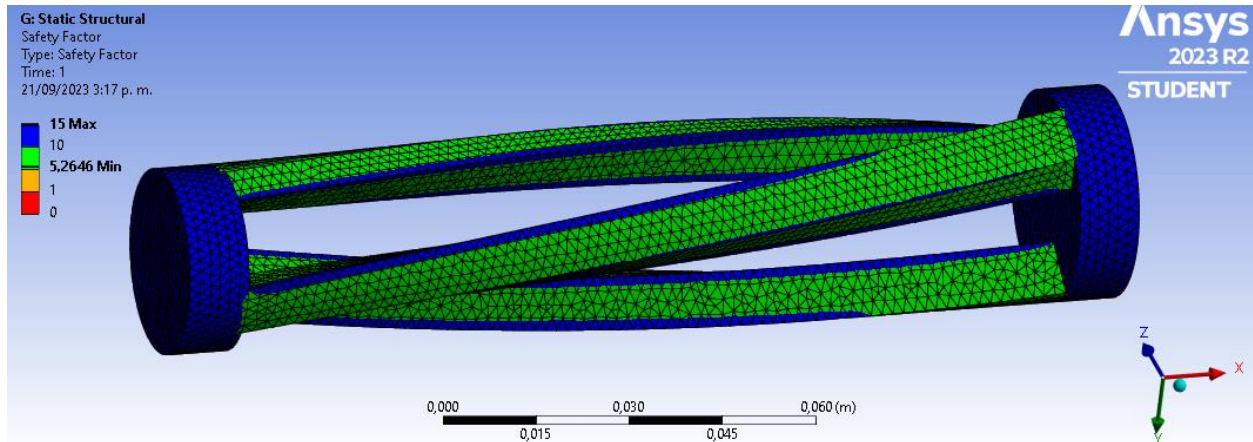
Figura 25 CAD de la alternativa con las mejores variaciones aplicadas



Nota. En la Figura se muestra el CAD de la alternativa seleccionada con la combinación de las mejores opciones obtenidas de la simulación.

Una vez con el diseño CAD se realizó la simulación de la alternativa con la mejor combinación de parámetros, la cual sería sometida a la misma situación de las simulaciones anteriores, con la finalidad tener un punto con el cual comparar los resultados obtenidos los cuales se muestran en la Figura 26.

Figura 26 Simulación de la alternativa seleccionada en combinación los mejores parámetros - factor de seguridad



Tal como se esperaba la alternativa presenta un rendimiento elevado comparado con el diseño original de la primera alternativa por un margen muy amplio duplicando el factor de seguridad mínimo de seguridad inicial y teniendo una deformación mínima.

7.4 Análisis modal de la alternativa

Una vez definida la estructura final, con la ayuda del software de ANSYS se realiza el análisis modal con el fin de determinar los modos de vibración de la estructura sin aplicar cargas y teniendo en cuenta que el PLA tiene un comportamiento similar a un material frágil, cabe destacar que durante todo el proyecto las simulaciones se realizó con una calidad de malla según los criterios vistos anteriormente los cuales fueron revisados con la ayuda del software. Los cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Modos de vibración de la alternativa con mejores variaciones aplicadas

Modo	Frecuencia [Hz]	Tipo del modo vibración
1	453,28	Torsión
2	519,82	Flexión
3	519,84	Flexión
4	558,93	Flexión
5	558,99	Flexión
6	684,6	Torsión
7	739,06	Torsión
8	1188,8	Flexión
9	1188,8	Flexión
10	1495,1	Flexión
11	1495,2	Flexión
12	1595,1	Torsión
13	1756,3	Torsión
14	1955,7	Flexión
15	1955,7	Flexión

Como se puede apreciar en la tabla anterior el primer modo de vibración de la estructura final se encuentra a una frecuencia de 453,28 HZ lo que sería igual a 27180 RPM aproximadamente, por tal motivo la estructura no presentará resonancia ya que el rango en cual se piensa probar la estructura está por debajo de los 3600 RPM ó 60 Hz, valor inferior del primer modo de vibración de la estructura por lo que se puede concluir que habrá un riesgo potencial por resonancia.

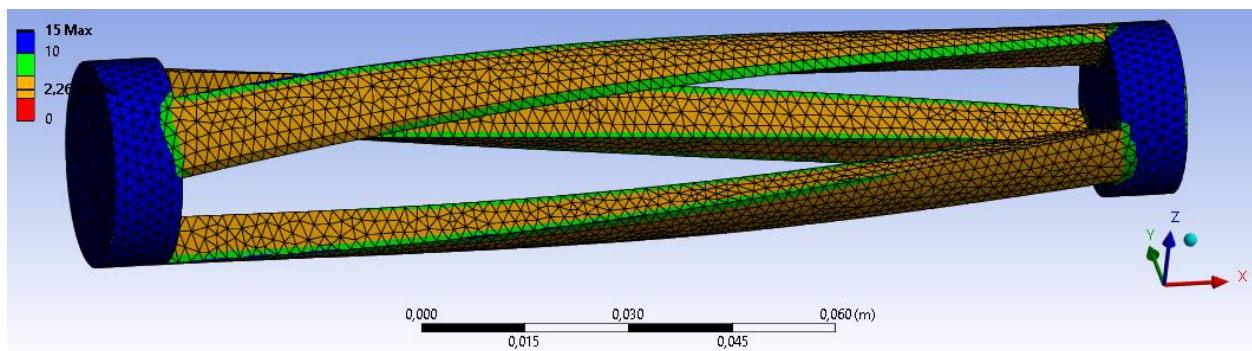
7.5 Ajuste de la alternativa final

Una vez realizada la simulación de la alternativa con las variaciones en las cuales se alcanzó un mejor desempeño, se obtuvo factor de seguridad muy grande lo cual es bueno, pero no resulta viable desde el punto de vista ingenieril. Por tal motivo se realiza un escalado de la

alternativa manteniendo la longitud inicial con el fin de que sea más acorde a la fuente de potencia con la que se cuenta, para nuestro caso es un motor de 0.5 caballos de fuerza y 3450 RPM y ofrece un torque aproximado de 1 N-m.

Con el nuevo eje se realiza la simulación la cual se muestra en la Figura 27. La simulación se efectuó bajo las cargas de trabajo a las cuales se encontrará sometido el eje. Obteniendo un factor de seguridad aceptable y debido al escalado se encuentra una reducción significativa en la cantidad de material empleada para la fabricación del eje traduciéndose en una reducción de tiempo de fabricación y materia prima empleada.

Figura 27 Simulación de la alternativa ajustada



Nota. En la imagen se puede apreciar la simulación del eje ajustado el cual se tiene un factor de seguridad más aceptable desde el punto de vista ingenieril cuyo valor es 2,25.

Finalmente se realiza el análisis modal de la alternativa ajustada en el cual se presenta en la Tabla 7, en las cuales, aunque variaron las frecuencias de los modos de vibración comparados con los de la Tabla 6, el primer modo vibración se mantiene una frecuencia lo cual no resulta al momento de que el eje encuentre en la velocidad de trabajo operativa.

Tabla 7 Tabla del análisis modal de la alternativa ajustada

Modo	Frecuencia [Hz]	Tipo del modo vibración
1	355,28	torsión
2	384,25	flexión
3	384,28	flexión
4	475,41	flexión
5	475,42	flexión
6	557,84	torsión
7	604,66	torsión
8	1027,9	flexión
9	1028	flexión
10	1213,4	flexión
11	1213,5	flexión
12	1278	torsión
13	1443,4	torsión
14	1574,6	flexión
15	1574,9	flexión

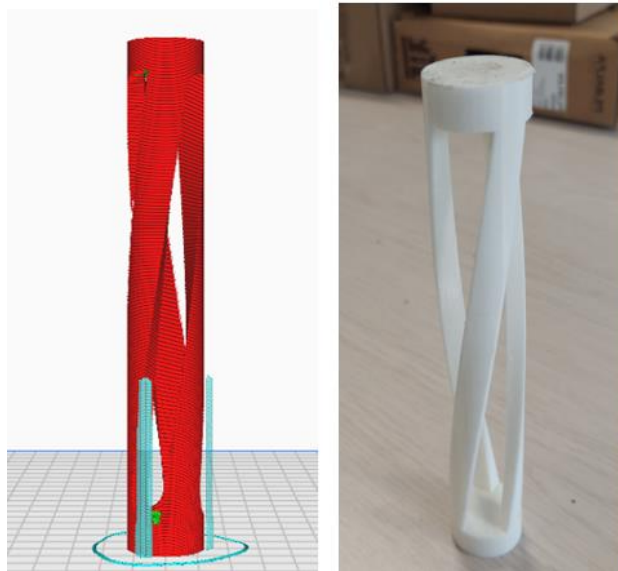
8. Construcción y montaje del eje

8.1 Impresión del eje

Para la impresión del eje se optó usar un redondeo en las bases de las superficies con la finalidad de reducir la cantidad de soportes y evitar de esta manera también cambios de sección abruptos.

En la impresión del eje se tomaron dos opciones de impresión las cuales fueron la impresión de manera transversal obteniendo de esta manera una superficie más pulida debido a que no se encuentran soportes pegados a la superficie, tal como se puede apreciar en la Figura 28 donde se pueden ver los soportes usados para la impresión.

Figura 28 Vista previa del software UltiMaker Cura del modelo para impresión

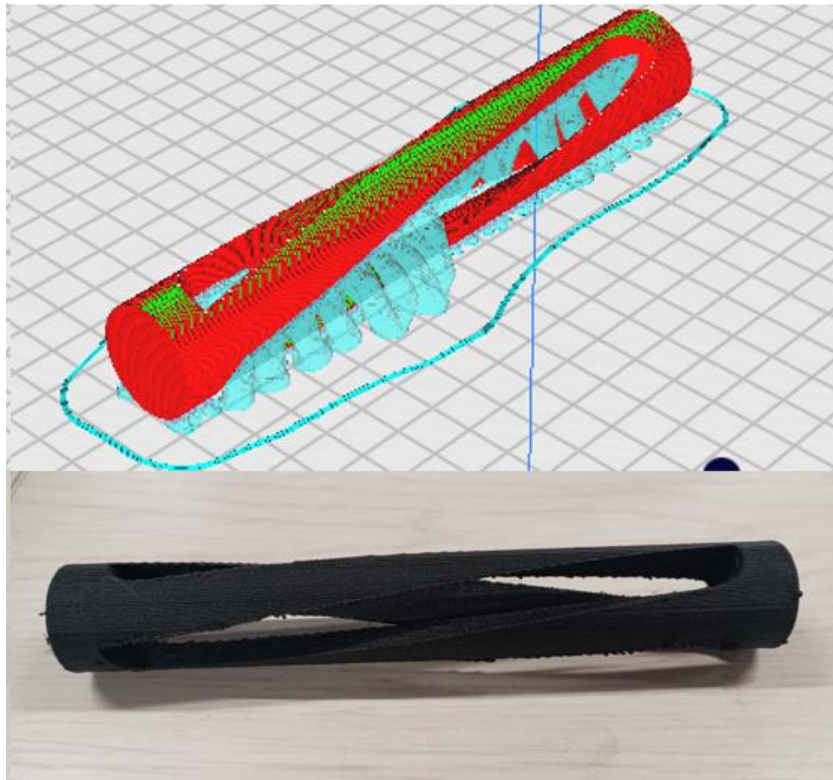


Nota. En la imagen se puede apreciar la vista previa del software UltiMaker Cura en la parte izquierda de la imagen y en el parte de derecha se muestra el modelo impreso el cual se puede ver una superficie pulida debido a que no se encuentran cantidad considerable de soportes necesarios para llevar cabo la impresión.

El otro método de impresión que se utilizó fue orientar el eje de manera longitudinal debido a que se requería que el eje se sostuviera en la primera mitad de la impresión fue necesario usar una gran cantidad de soportes obteniendo de esta manera una superficie rugosa

como se evidencia en la Figura 29, la superficie fue lijada con la finalidad de eliminar material pegado proveniente de los soportes usados en la impresión.

Figura 29 Vista previa del software UltiMaker Cura del modelo para impresión e impresión



Nota. En la imagen se puede ver en la parte superior, la vista previa del software UltiMaker cura en cual se aprecia una cantidad considerable de soportes y en la parte inferior se puede apreciar el modelo impreso, en el cual se puede ver una superficie rugosa donde se encontraban adheridos los soportes del proceso de impresión.

8.2 Construcción del bastidor para montaje del eje

En la etapa de construcción se utilizó un motor Pedrollo de referencia PKm 60, cual entrega una potencia de 0,5 HP, 0,37 KW y 3450 RPM tal como se muestra en la Figura 30. El cuál será la fuente de potencia para el eje objeto de estudio.

Figura 30 Motor encargado de suministrar potencia al eje objeto de estudio



Nota. Placa del motor usado para las pruebas del eje objeto de estudio

Este motor fue montado en una placa en la cual se colocaron 2 apoyos, los cuales tenían la función de mantener fijas 2 chumaceras de parche para las alojarían los acoples tanto del eje del motor como al eje objeto de estudio, así como también el acople del eje objeto en la cual iría montado el rotor del freno disco tal como se muestra en la Figura 31.

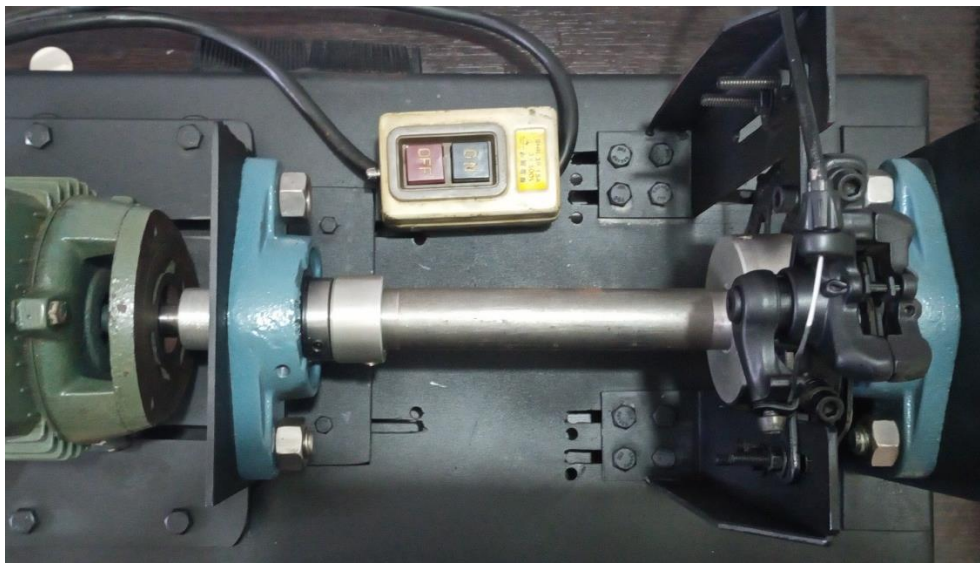
Figura 31 Montaje del eje objeto de estudio en banco de pruebas



Nota. En la Figura se puede ver como se encuentra la disposición del eje objeto de estudio, el cual está entre los acoples uno de los cuales se le fue fijado el rotor del freno el cual se encuentra en la parte izquierda de la imagen y el acople de la derecha será acoplado al motor PKm 60.

Con el fin de alinear el eje del motor y el eje objeto de estudio con se optó por reemplazar este último por eje de acero del mismo diámetro y longitud como se aprecia en la , debido a que este nuevo eje sería mucho más rígido comparado con el material usado para la fabricación del eje que se desea probar. Facilitando de esta de esta forma la tarea de alinear juntos ejes y mejorando la precisión.

Figura 32 Alineación de los ejes



Nota. Forma en la cual se alinea el eje del motor con la posición donde estaría el eje objeto de estudio.

Una vez con los ejes alineados se da una capa de pintura para evitar la oxidación de las láminas de hierro fueron material usado en el bastidor del banco de pruebas del eje. Con esta capa de pintura se logró mejorar el acabado superficial de toda la estructura como se aprecia en la Figura 33 y también brindar la protección ante la oxidación.

Figura 33 Proceso de pintado de las láminas de hierro

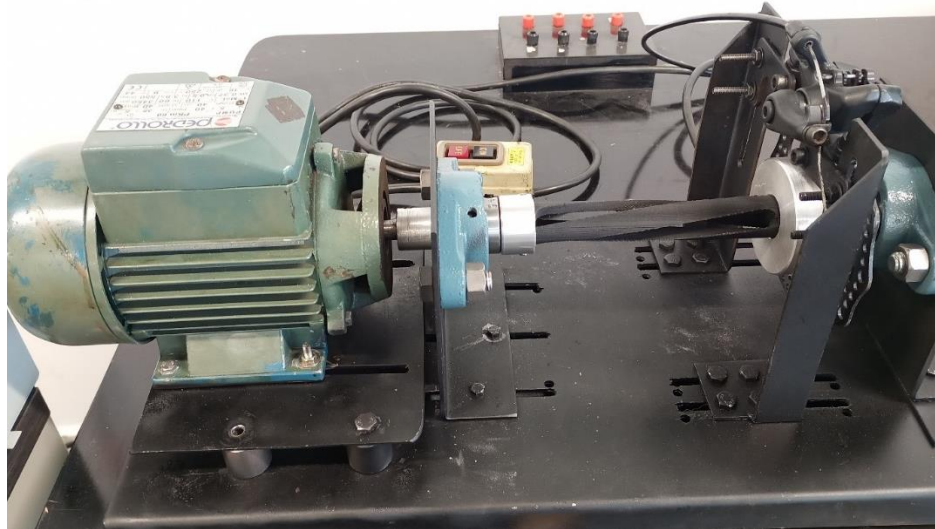


Nota. durante el proceso de pintado se buscó solo cubrir las placas de hierro y se evitó tanto las chumaceras, motor, disco del freno y roscas de los pernos con el fin de evitar que un despiece a futuro sea sencillo.

El montaje cuenta con sistema de frenos de disco, cuyo disco fue a tornillado al acople apuesto de donde se encuentra ubicado el motor dicho sistema tiene la capacidad de una capacidad de frenado de 5 N-m cuyo dato es proporcionado por el fabricante. Este sistema freno tiene la capacidad de detener totalmente al motor.

Una vez alineado el motor y con el recubrimiento de pintura de las láminas de hierro, se montó el eje impreso tal como se muestra en la Figura 34.

Figura 34 Montaje final con el eje objeto de estudio



9. Análisis de resultados

Con el eje objeto de estudio montado en el banco de pruebas, el primer eje a probar fue el impreso de manera transversal (Figura 28). Se energizó el motor y durante el primer momento de frenado el eje falló tal como se puede ver en la Figura 35. Al revisar de manera detallada el modo de falla se puede ver que el inicio de la grieta se presentó entre dos capas de material agregado por la impresora, dicha falla se dio de manera instantánea.

Al determinar que el modo falla se presentó entre capas de filamentos agregados, se puede concluir que fue por baja adherencia del material. Producto de un rápido enfriamiento de la capa inferior, la cual entre más avanzaba el proceso de impresión esta se alejaba mucho más de la cama de construcción dificultando mantener la temperatura de la capa. También al presentar un área transversal tan delgada fue otro motivo de la aceleración del enfriamiento del material extruido y bajando la adherencia entre capas.

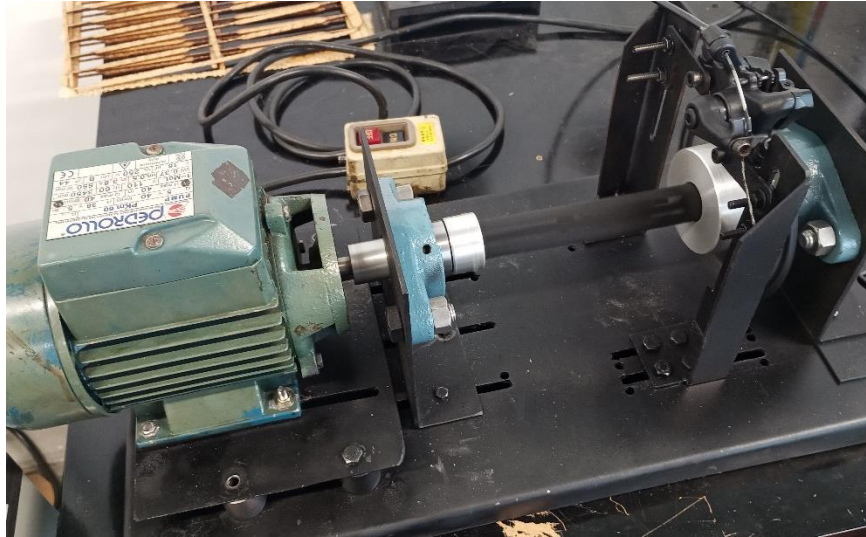
Figura 35 Eje de objeto de estudio después de la falla.



Nota. Eje impreso de manera transversal después de la falla

La segunda prueba se realizó montando el eje impreso de manera longitudinal (Figura 29), El eje tuvo que ser lijado con el objetivo de eliminar remanentes de material adherido y tener un mejor acople; se energizo el motor y el eje funciono perfectamente tal como se puede en la Figura 36. Este eje presento un mejor desempeño soportando varios ciclos de arranque y paradas totales del motor sin presentar fallas evidentes.

Figura 36 Funcionamiento del del banco con eje impreso de manera transversal



Nota. Banco en funcionamiento con eje impreso de manera trasversal después de varios de ciclos de pruebas

El eje presento mejor comportamiento debido a su método de impresión hubo una mayor superficie de adherencia en entre las capas de material agregado, debido a que la impresión se realizó de manera longitudinal la superficie de impresión no se encontraba en muy alejada de la cama de impresión comparado del primer método de impresión, motivo por el cual se mantuvo una temperatura cerca de la cama impresión y mejorando la adherencia entre capas.

10. Conclusiones

El campo de los metamateriales mecánicos aún se encuentra un crecimiento como se pudo comprobar en la búsqueda biográfica, aunque los estudios sean escasos estos muestran resultados con resultados muy optimistas abriendo el camino a futuras investigaciones esta rama.

con el avance de la computación en los últimos años ha dado lugar la posibilidad de simular situaciones con comportamiento muy cercano al real, de manera fácil y rápida, gracias a esto, se realizaron diversas simulaciones este proyecto variando dos parámetros los cuales fueron la cantidad de hélices y la variación del paso de la hélice obteniendo una configuración óptima para la variación de estos parámetros.

Dicha ventaja permite la simulación de modelos en un corto periodo de tiempo sin la necesidad de recurrir a la creación física de un modelo para analizar su comportamiento, cual es un ahorro significativo de materiales a la hora de desarrollar nuevas piezas o elementos mecánicos.

La manufactura aditiva fue gran soporte en la realización de este proyecto, debido a la rapidez al momento de fabricar las probetas y con una buena precisión sin importar la complejidad esta, sin embargo, cabe destacar que la adherencia de las capas de material aplicado puede variar dependiendo de la distancia de la capa aplicada a la cama, la temperatura de extrusión y la velocidad de la boquilla con el fin de corregir esto realizaron diferentes probetas hasta encontrar la configuración más idónea la cual que la última capa de la pieza tuviera la menor distancia posible a la cama.

La probeta fabricada mediante el método de deposición fundida presentó un excelente comportamiento soportando en varias ocasiones el rango máximo de operación del motor sin

presentar deformaciones o grietas entre las capas, lo cual resultado positivo y puede servir de base para nuevas investigaciones y variación de diferentes parámetros.

11. Referencias

- ANSYS. inc. (2009, September 1). *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 6.2.2 Mesh Quality*.
<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm>
- Argüelles Iñiguez Tutor, A., & Rubio Alonso, H. (n.d.). *Análisis modal de un eje ferroviario mediante Pro/ENGINEER*.
- Argüello, I., Exequiel, M., Molina, M. S., & Cruz, J. (n.d.). *Tesis Maestria Arguello M*.
- Barchiesi, E., Spagnuolo, M., & Placidi, L. (2019). Mechanical metamaterials: a state of the art. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 24(1), 212–234.
<https://doi.org/10.1177/1081286517735695>
- Buccino, F., Martinoia, G., & Vergani, L. M. (2021). Torsion—resistant structures: A nature addressed solution. In *Materials* (Vol. 14, Issue 18). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/ma14185368>
- Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. P. (2018). Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93–103.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.04.054>
- Carreon, G. (2020). *Técnicas de mallado, aspectos y consideraciones iniciales – CAE 4 EVERYONE*. <https://cae4everyone.wordpress.com/2020/08/01/tecnicas-de-mallado-aspectos-y-consideraciones-iniciales/>

- Chen, Y., Mai, Y. W., & Ye, L. (2023). Perspectives for multiphase mechanical metamaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 153, 100725. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2023.100725>
- Coelho, A. W. F., Araujo, A. C., & Thiré, R. M. da S. M. (2018). Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(4). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0600>
- Del Río Fernández, P. (n.d.). *CREACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UNA VIGA MEDIANTE ANÁLISIS MODAL*. Retrieved September 25, 2023, from https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23534/TFG%20Pablo-del-Rio_Fernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Dul, S., Fambri, L., & Pegoretti, A. (2016). Fused deposition modelling with ABS–graphene nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 85, 181–191. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2016.03.013>
- Ghaedizadeh, A., Shen, J., Ren, X., & Xie, Y. M. (2016). Tuning the Performance of Metallic Auxetic Metamaterials by Using Buckling and Plasticity. *Materials 2016*, Vol. 9, Page 54, 9(1), 54. <https://doi.org/10.3390/MA9010054>
- Gómez Peral, I. (2022). *Análisis Modal de un Eje*.

- Hou, X., & Silberschmidt, V. V. (2015). Metamaterials with Negative Poisson's Ratio: A Review of Mechanical Properties and Deformation Mechanisms. *Engineering Materials*, 155–179. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17118-0_7/FIGURES/13
- Jaén, U. DE, Quevedo Pérez Tutor, F., & Felipe Sesé Fernando Suárez Guerra, L. A. (2017). *Escuela Politécnica Superior de Linares PARAMETRIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D*.
- Jiao, C., & Yan, G. (2021). Design and elastic mechanical response of a novel 3D-printed hexachiral helical structure with negative Poisson's ratio. *Materials & Design*, 212, 110219. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2021.110219>
- Kadic, M., Bückmann, T., Stenger, N., Thiel, M., & Wegener, M. (2012). On the practicability of pentamode mechanical metamaterials. *Applied Physics Letters*, 100(19). <https://doi.org/10.1063/1.4709436>
- Karlsson, J., Snis, A., Engqvist, H., & Lausmaa, J. (2013). Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder fractions. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), 2109–2118. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2013.06.010>
- Kolken, H. M. A., & Zadpoor, A. A. (2017). Auxetic mechanical metamaterials. In *RSC Advances* (Vol. 7, Issue 9, pp. 5111–5129). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c6ra27333e>

- Kumar, R., Kumar, M., Chohan, J. S., & Kumar, S. (2022). Overview on metamaterial: History, types and applications. *Materials Today: Proceedings*, 56, 3016–3024. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.423>
- Larsen, U. D., Sigmund, O., & Bouwstra, S. (1997). Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 6(2), 99–106. <https://doi.org/10.1109/84.585787>
- Laudato, M., Manzari, L., Scerrato, D., Göransson, P., & Giorgio, I. (2020). Spectral properties of 2D pantographic metamaterial: Experimental results. *Mechanics Research Communications*, 109, 103613. <https://doi.org/10.1016/J.MECHRESCOM.2020.103613>
- Love, L. J., Kunc, V., Rios, O., Duty, C. E., Elliott, A. M., Post, B. K., Smith, R. J., & Blue, C. A. (2014). The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing. *Journal of Materials Research* 2014 29:17, 29(17), 1893–1898. <https://doi.org/10.1557/JMR.2014.212>
- Luo, H. C., Ren, X., Zhang, Y., Zhang, X. Y., Zhang, X. G., Luo, C., Cheng, X., & Xie, Y. M. (2022). Mechanical properties of foam-filled hexagonal and re-entrant honeycombs under uniaxial compression. *Composite Structures*, 280, 114922. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114922>
- Meng, L., Shi, J., Yang, C., Gao, T., Hou, Y., Song, L., Gu, D., Zhu, J., Breitkopf, P., & Zhang, W. (2020). An emerging class of hyperbolic lattice exhibiting tunable elastic properties and impact absorption through chiral twisting. *Extreme Mechanics Letters*, 40, 100869. <https://doi.org/10.1016/J.EML.2020.100869>

- Milton, G. W., & Cherkaev, A. V. (1995). Which elasticity tensors are realizable? *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 117(4), 483–493. <https://doi.org/10.1115/1.2804743>
- Misra, A., Lekszycki, T., Giorgio, I., Ganosch, G., Müller, W. H., & dell’Isola, F. (2018a). Pantographic metamaterials show atypical Poynting effect reversal. *Mechanics Research Communications*, 89, 6–10. <https://doi.org/10.1016/J.MECHRESCOM.2018.02.003>
- Misra, A., Lekszycki, T., Giorgio, I., Ganosch, G., Müller, W. H., & dell’Isola, F. (2018b). Pantographic metamaterials show atypical Poynting effect reversal. *Mechanics Research Communications*, 89, 6–10. <https://doi.org/10.1016/J.MECHRESCOM.2018.02.003>
- Navarro Julio, R., Viñas Jaime, A. F., Salazar Marco, O. A., & Wasik Dariusz, S. (n.d.). *Estudio dinámico de estructuras mecánicas mediante los poliespectros*.
- Ortiz Prado, A., Ruiz Cervantes, O., & Ortiz Valera, J. A. (2013). *CAPÍTULO 8 CONCEPTOS BÁSICOS DEL MÉTODO POR ELEMENTO FINITO 8.1 GENERALIDADES*.
- Otero Pereiro, L. L. (2006). Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos. In *Ingeniería Mecánica* (Vol. 3).
- Overvelde, J. T. B., Shan, S., & Bertoldi, K. (2012). Compaction Through Buckling in 2D Periodic, Soft and Porous Structures: Effect of Pore Shape. *Advanced Materials*, 24(17), 2337–2342. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201104395>
- Protolabs Network. (2020). *What is SLS 3D printing? | Hubs*. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>

- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286–1296. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.06.089>
- Syed, W. (2023). *All Models are Wrong-Structural analysis with ANSYS Workbench*. <https://featips.com/2022/11/21/ansys-mesh-metrics-explained/>
- Wang, Y. Bin, Liu, H. T., & Zhang, Z. Y. (2020a). Rotation spring: Rotation symmetric compression-torsion conversion structure with high space utilization. *Composite Structures*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112341>
- Wang, Y. Bin, Liu, H. T., & Zhang, Z. Y. (2020b). Rotation spring: Rotation symmetric compression-torsion conversion structure with high space utilization. *Composite Structures*, 245, 112341. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.112341>
- Wang, X. T., Chen, Y. L., & Ma, L. (2018). The manufacture and characterization of composite three-dimensional re-entrant auxetic cellular structures made from carbon fiber reinforced polymer: <https://doi.org/10.1177/0021998318764021>, 52(23), 3265–3273. <https://doi.org/10.1177/0021998318764021>
- Woodson, T., Alcantara, J. T., & do Nascimento, M. S. (2019). Is 3D printing an inclusive innovation?: An examination of 3D printing in Brazil. *Technovation*, 80–81, 54–62. <https://doi.org/10.1016/J.TECHNOVATION.2018.12.001>
- Wu, H., Fahy, W. P., Kim, S., Kim, H., Zhao, N., Pilato, L., Kafi, A., Bateman, S., & Koo, J. H. (2020). Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive

manufacturing. *Progress in Materials Science*, 111, 100638.
<https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2020.100638>

Yang, S., Qi, C., Wang, D., Gao, R., Hu, H., & Shu, J. (2013). A Comparative Study of Ballistic Resistance of Sandwich Panels with Aluminum Foam and Auxetic Honeycomb Cores: *Http://Dx.Doi.Org/10.1155/2013/589216*, 2013, 15. <https://doi.org/10.1155/2013/589216>

Yang, W., Li, Z. M., Shi, W., Xie, B. H., & Yang, M. B. (2004). Review on auxetic materials. *Journal of Materials Science* 2004 39:10, 39(10), 3269–3279.
<https://doi.org/10.1023/B:JMISC.0000026928.93231.E0>

Yu, X., Zhou, J., Liang, H., Jiang, Z., & Wu, L. (2018). Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review. In *Progress in Materials Science* (Vol. 94, pp. 114–173). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.003>

Zadpoor, A. A. (2016). Mechanical meta-materials. In *Materials Horizons* (Vol. 3, Issue 5, pp. 371–381). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c6mh00065g>

Zhong, R., Fu, M., Chen, X., Zheng, B., & Hu, L. (2019). A novel three-dimensional mechanical metamaterial with compression-torsion properties. *Composite Structures*, 226, 111232.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.111232>

