

Análisis Numérico del Comportamiento a Tracción y Compresión de Estructuras
Biomiméticas

Fredy Hernando Castellanos Hernández e Iván Rene Orellano Ortiz

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo

Doctor en Ingeniería Civil - Estructuras

Codirectores

Diana Marcela Gómez Rodríguez

Arquitecta

Daniel Camilo Jaramillo Sánchez

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Teórico	13
2.1 Inicios de la Biomímesis	13
2.2 ¿Qué Es La Biomímesis?	14
2.3 Estructura Giroide	15
2.4 Estructura Trabecular	16
2.5 Estructura Helicoidal.....	17
2.6 Ensayo A Tracción Y Compresión	18
2.7 Ley De Hooke	19
2.8 Teorías De Falla	19
2.8.1 Teoría de la energía de distorsión.	19
3. Metodología	20
3.1 Preliminares.....	20
3.2 Modelado Paramétrico	21
3.3 Ensayos Lineales.....	24
3.4 Redes Neuronales.....	28
3.5 Ensayos No Lineales	32
4. Resultados	32

4.1 Análisis De Sensibilidad De Parámetros	32
4.1.1 Giroide	32
4.1.2 Helicoidal	34
4.1.3 Trabecular	37
4.2 Análisis Comparativo.....	39
5. Conclusiones	45
6. Recomendaciones.....	47
Referencias Bibliográficas	48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Parámetros y espacio de diseño</i>	22
Tabla 2 <i>Propiedades del acero estructural</i>	27
Tabla 3 <i>Arquitectura red neuronal giroide</i>	29
Tabla 4 <i>Arquitectura red neuronal helicoidal</i>	29
Tabla 5 <i>Arquitectura red neuronal trabecular</i>	30
Tabla 6 <i>Estructuras cuasi óptimas</i>	31

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Estructura del giroide</i>	15
Figura 2 <i>Estructura trabecular</i>	16
Figura 3 <i>Estructura helicoidal</i>	18
Figura 4 <i>Metodología del estudio</i>	20
Figura 5 <i>Flujo de modelado paramétrico giroide</i>	23
Figura 6 <i>Flujo de modelado paramétrico helicoidal</i>	24
Figura 7 <i>Flujo de modelado paramétrico trabecular</i>	24
Figura 8 <i>Espacio de diseño giroide</i>	25
Figura 9 <i>Espacio de diseño helicoidal</i>	25
Figura 10 <i>Espacio de diseño trabecular</i>	26
Figura 11 <i>Modelo 3D estructuras cuasi óptimas</i>	31
Figura 12 <i>Comportamiento del número de células en dirección radial</i>	33
Figura 13 <i>Comportamiento del espesor</i>	33
Figura 14 <i>Comportamiento del número de cilindros por capa</i>	34
Figura 15 <i>Comportamiento del ángulo entre capas</i>	35
Figura 16 <i>Comportamiento del espesor</i>	36
Figura 17 <i>Comportamiento de la semilla de inserción</i>	37
Figura 18 <i>Comportamiento del número de celdas Voronoi</i>	38
Figura 19 <i>Comportamiento del espesor o grosor</i>	38

Figura 20 <i>Comportamiento de rigidez</i>	39
Figura 21 <i>Comportamiento de absorción de energía</i>	40
Figura 22 <i>Deformación de la estructura giroide a compresión</i>	42
Figura 23 <i>Deformación de la estructura helicoidal a compresión</i>	42
Figura 24 <i>Deformación de la estructura trabecular a compresión</i>	43
Figura 25 <i>Deformación de la estructura giroide a tracción</i>	43
Figura 26 <i>Deformación de la estructura helicoidal a tracción</i>	44
Figura 27 <i>Deformación de la estructura trabecular a tracción</i>	44
Figura 28 <i>Esfuerzo Von Mises vs Deformación total</i>	45

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Código Grasshopper (.gh) de modelado paramétrico tridimensional de la estructura giroide.

Apéndice B. Código Grasshopper de modelado paramétrico tridimensional de la estructura helicoidal.

Apéndice C. Código Grasshopper de modelado paramétrico tridimensional de la estructura trabecular.

Apéndice D. Archivo Rhinoceros 5 (.3dm) de geometría cuasi óptima de la estructura giroide

Apéndice E. Archivo Rhinoceros 5 (.3dm) de geometría cuasi óptima de la estructura helicoidal

Apéndice F. Archivo Rhinoceros 5 (.3dm) de geometría cuasi óptima de la estructura trabecular

Apéndice G. Links de acceso a los códigos (cuadernos colab) de las redes neuronales

Resumen

Título: Análisis Numérico del Comportamiento a Tracción y Compresión de Estructuras Biomiméticas.*

Autores: Fredy Hernando Castellanos Hernández e Iván Rene Orellano Ortiz.**

Palabras Clave: Biomímesis, Construcción bio-inspirada, Giroide, Trabecular, Helicoidal, Modelado 3D, Redes Neuronales.

Descripción: Dado que el diseño bio-inspirado ha brindado soluciones óptimas en diferentes campos del conocimiento, y actualmente, el desarrollo de nuevas tecnologías computacionales provee algoritmos factibles para descifrar los conocimientos acumulados durante miles de millones de años en la naturaleza, los cuales también podrían dar solución a problemas estructurales en el campo de aplicación de la ingeniería civil. Este estudio integró el modelado tridimensional, la predicción por redes neuronales de aprendizaje profundo y la simulación por el método de elementos finitos mediante el software Ansys, para analizar y comparar el comportamiento a tracción y compresión de las estructuras biomiméticas: giroide, helicoidal y trabecular. De igual forma mediante análisis de sensibilidad se observó e identificó el comportamiento específico de cada geometría bio-inspirada y se determinó la relación y tendencia del volumen neto de material y la deformación, ante la variación de los parámetros geométricos propios, para un intervalo específico del espacio de diseño limitado a una probeta definida según la norma ASTM E9-09 con una altura de 14 cm. Los resultados muestran la comparación entre las curvas esfuerzo-deformación de cada estructura frente a las otras dos, en las cuales se analizaron las características de: rigidez, absorción de energía de deformación (tenacidad) y relación rigidez/volumen traducida como optimización de material.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Doctor en Ingeniería Civil - Estructuras. Codirectores: Diana Marcela Gómez Rodríguez, Arquitecta. Daniel Camilo Jaramillo Sánchez, Ingeniero Civil.

Abstract

Title: Numerical Analysis Of Tensile And Compressive Behavior Of Biomimetic Structures.*

Author(s): Fredy Hernando Castellanos Hernández Iván Rene Orellano Ortiz.**

Key Words: Biomimicry, Bio-inspired construction, Gyroid, Trabecular, Helical, 3D Modeling, Neural Networks.

Description: Since bio-inspired design has provided optimal solutions in different fields of knowledge, and currently, the development of new computational technologies provides feasible algorithms to decipher the knowledge accumulated over billions of years in nature, which could also provide solutions to structural problems in the field of civil engineering application. This study integrated three-dimensional modeling, prediction by deep learning neural networks and simulation by the finite element method using Ansys software, to analyze and compare the tensile and compressive behavior of biomimetic structures: gyroid, helical and trabecular. Likewise, by means of sensitivity analysis, the specific behavior of each bio-inspired geometry was observed and identified, and the relationship and tendency of the net volume of material and deformation was determined, in response to the variation of the geometric parameters, for a specific interval of the design space, limited to a specimen defined according to the ASTM E9-09 standard with a height of 14 cm. The results show the comparison between the stress-strain curves of each structure with respect to the other two, in which the following characteristics were analyzed: stiffness, strain energy absorption (toughness) and stiffness/volume ratio translated as material optimization.

* Degree Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD in Civil Engineering - Structures. Codirectores: Diana Marcela Gómez Rodríguez, Architect. Daniel Camilo Jaramillo Sánchez, Civil Engineer.

Introducción

El sector de la construcción va más allá de suplir la necesidad básica de vivienda y se considera como un medio para el desarrollo y crecimiento de las sociedades. En Colombia, según un informe del centro de investigación económica y social Fedesarrollo (Fedesarrollo, 2017), se ha demostrado que, por cada peso colombiano construido solo en obras civiles, se incrementa en 2.72 pesos la economía de los demás sectores, a raíz de que estos últimos demandan la infraestructura como insumo. Sin embargo, una de las falencias que se ha podido observar en los últimos años, es la dificultad al momento de incorporar la arquitectura contemporánea, ya que esta plantea diseños cada vez más imponentes y desafiantes, los cuales se ven limitados por las normativas y sistemas al requerir de procesos iterativos más complejos.

Considerando dicha falencia y que la naturaleza ha sido una de las fuentes de inspiración en una gran cantidad de disciplinas (Moreno De Luca et al., 2012), surge la idea de aplicar estructuras biomiméticas a la ingeniería estructural actual, ya que la biomímesis constituye una ciencia emergente que estudia los modelos, procesos y sistemas de la naturaleza para posteriormente imitarlos o inspirarse en ellos y resolver problemas humanos. A su vez, es una forma de valorar la naturaleza e introduce una era basada no en lo que se extrae del mundo natural, sino en lo que se aprende de él (Benyus, 1997).

Dos fases iniciales para tener en cuenta en la aplicación de estructuras biomiméticas son: la identificación y la caracterización mecánica. En la fase de identificación de dichas estructuras, una de las más investigadas en cuanto a sus propiedades mecánicas y geométricas

es el giroide, como parte de las superficies mínimas triplemente periódicas (SMTP) (Prasanth et al., 2021), muy similar al encontrado en la microestructura de las alas de mariposas *Callophrys rubi* cuyo efecto de interferencia y difracción de la luz genera el color de las alas de estas (Saranathan et al., 2010). Sin embargo, la búsqueda de estructuras que optimicen los recursos, se adapten a las necesidades y al entorno, constituye un pilar fundamental y una tarea prometedora en la innovación e investigación, es así como desde el punto de vista del movimiento biomimético, surge la pregunta ¿cómo hace la naturaleza para mantener el equilibrio entre los recursos y las necesidades? Un ejemplo adecuado para responder este interrogante se encuentra en la estructura trabecular del hueso esponjoso (Judd Shamus Day, 2005), la cual optimiza el material óseo y a su vez está construida de tal forma que distribuye las cargas entre sus trabéculas, haciendo frente a los requerimientos de resistencia en su entorno, de la misma forma en que lo hacen los sistemas estructurales convencionales. Otra estructura analizada, en gran parte por su alta capacidad en disipación de energía, es la estructura helicoidal de tipo Bouligand (Bouligand, 1972), encontrada en la cutícula de crustáceos como el camarón mantis (Naleway et al., 2015), con resultados prometedores en ensayos de impacto (Jiang et al., 2019).

Por otra parte, la fase de caracterización mecánica se hace cada vez más factible con el desarrollo de la cuarta revolución industrial, que facilita las nuevas herramientas y métodos para el análisis, de forma experimental con nuevas máquinas, técnicas de impresión 3D y de manera numérica con el modelado tridimensional de las estructuras. Así mismo, el avance de la inteligencia artificial aporta algoritmos y sistemas de procesamiento de información que reducen significativamente el coste computacional, como las redes neuronales de aprendizaje

profundo (Deep Learning). Sin embargo, aunque se cuente con dichas herramientas, el desafío actual se encuentra en la integración óptima para obtener resultados confiables y en corto tiempo. El presente estudio desarrolla parte de esta fase para las tres estructuras anteriormente mencionadas, utilizando el modelado tridimensional y simulación por el método elementos finitos (MEF).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar mediante análisis numérico el comportamiento a tracción y compresión de estructuras biomiméticas.

1.2 Objetivos Específicos

Definir los parámetros geométricos para cada tipo de estructura biomimética.

Realizar el diseño experimental de las estructuras biomiméticas: helicoidal, giroide y trabecular, variando sus parámetros geométricos.

Programar una red neuronal que prediga una configuración cuasi óptima para cada una de las estructuras.

Comparar la respuesta mecánica de las configuraciones predichas.

2. Marco Teórico

2.1 Inicios de la Biomímesis

En el siglo XV, se introduce el concepto de diseño bio-inspirado (diseño inspirado en la naturaleza), donde Leonardo Da Vinci realizó los primeros intentos de diseñar artefactos que imitaran funciones de los animales como, por ejemplo, la máquina voladora. Sin embargo, fue hasta en 1997, que se consolidó el concepto biomímesis e inició el conocido “movimiento biomimético”, con la publicación del libro “Biomimicry: Innovation Inspired by Nature” de la escritora y científica Janine Benyus (Sierra, 2020).

En la actualidad existen numerosas construcciones bio-inspiradas como es el caso de la torre Eiffel en París, el estadio nacional en Pekín y el edificio Tao Zhu Yin Yuan en Taiwán. Las cuales, han aplicado las lecciones que ofrece la naturaleza, involucrando la biomimética con los campos de la arquitectura y el diseño. A pesar de la existencia de un gran número de construcciones bio-inspiradas, las que reúnen a fondo las características de la biomimética representan un número muy reducido.

Un primer ejemplo neto de biomímesis a gran escala es el modelo biomimético que se ha adoptado en el diseño del edificio Eastgate en Harare-Zimbabwe, el diseño fue adoptado por el arquitecto africano Mick Pearce y utiliza sistemas pasivos de climatización basados en el gradiente térmico, los cuales están inspirados en las obras de las termitas (Contract Workplaces, 2015). Un segundo ejemplo puede ser el proyecto Qatar Sprouts en Doha-Qatar anunciado en 2009, el cual está inspirado en el comportamiento del cactus, que más allá de adoptar su forma, imita el funcionamiento de las estomas (poros), las cuales se mantienen cerradas durante el día para evitar el ingreso del aire caliente del desierto y se abren en la noche para permitir el ingreso del aire frío, de esta manera se mantiene la transpiración con el fin de hacer frente al clima del desierto (Diseño Vip, 2020).

2.2 ¿Qué Es La Biomímesis?

La biomímesis, del griego bios, que significa vida y mimesis, que significa imitar, constituye una ciencia emergente que estudia los modelos, procesos y sistemas de la naturaleza para posteriormente imitarlos o inspirarse de ellos para resolver problemas humanos, a su vez es una forma de valorar la naturaleza e introduce a una era basada no en lo que extrae del mundo natural si no en lo que aprende de él. “Pues después de 3.800

millones de años de investigación y desarrollo, los fracasos son fósiles, y lo que nos rodea es el secreto de la supervivencia” (Benyus, 1997).

2.3 Estructura Giroide

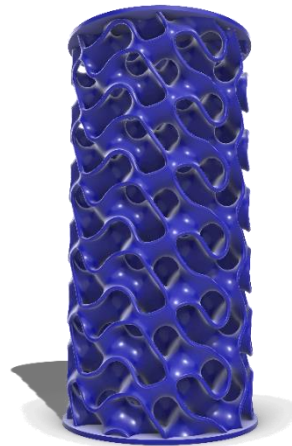
El giroide (Figura 1) es una estructura descubierta por Alan Schoen en 1970 y hace parte de las superficies mínimas triplemente periódicas e infinitamente conectadas, este tipo de estructura se encuentra a escala micro en las escamas de las alas de algunos tipos de mariposas cumpliendo la función de estructura biofotónica tridimensional, la cual, les da el color vivido a estos insectos (Saranathan et al., 2010).

Con el uso de software actualmente se ha podido parametrizar la celda unitaria de giroide con la siguiente ecuación (Cayleigh McCreight, 2021).

$$\sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x) \quad (1)$$

Figura 1

Estructura del giroide



Nota. Modelado 3D del giroide adaptado a una probeta cilíndrica. Elaboración propia.

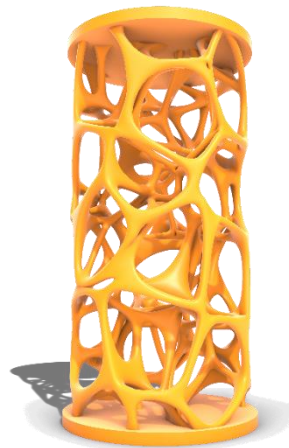
2.4 Estructura Trabecular

La estructura trabecular (Figura 2) se encuentra en la epífisis (extremos) de huesos largos, dentro de la columna y dentro de los huesos planos como el cráneo y pelvis, formando aproximadamente el 20% de la masa del esqueleto humano su estructura esponjosa, proporciona una estructura ligera y eficiente para soportar articulaciones articuladas del cuerpo. Tiene una gran superficie y una fracción volumétrica mineralizada que puede oscilar entre menos del 5% y más del 50% (Judd Shamus Day, 2005).

En 1977 Singh (Singh, 1978), basado en observación mediante estereofotografías utilizando una cámara réflex de dos lentes simples propuso una clasificación de 3 tipos y 3 subtipos de arquitecturas trabeculares.

Figura 2

Estructura trabecular



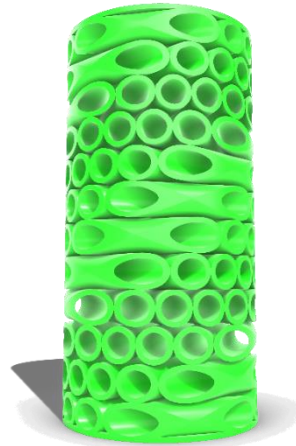
Nota. Modelado 3D del trabecular adaptado a una probeta cilíndrica. Elaboración propia.

2.5 Estructura Helicoidal

Una estructura helicoidal (Figura 3) consiste en un apilamiento de capas de fibras las cuales van rotando con un ángulo específico respecto a la anterior. Bouligand describió un modelo idealizado de esta estructura el cual consiste en que cada capa de fibras rota con un ángulo constante respecto a la anterior, completando así la disposición una rotación de 180° (Bouligand, 1972).

Este tipo de estructuras proporciona varios mecanismos de endurecimiento, puesto que las grietas producidas se transmiten a lo largo del tortuoso camino helicoidal lo que lleva a una mayor tolerancia al daño y a la absorción o alta disipación de energía (Yaraghi & Kisailus, 2017).

Generalmente se encuentran en las microestructuras de materiales biológicos como exoesqueletos de crustáceos, esponjas marinas altamente mineralizadas, insectos (saltamontes), mamíferos (colágeno óseo), y escamas de pescado cada uno con diferentes ángulos de giro y direcciones lo que proporciona resistencias específicas (Naleway et al., 2015).

Figura 3*Estructura helicoidal*

Nota. Modelado 3D del helicoidal adaptado a una probeta cilíndrica. Elaboración propia.

2.6 Ensayo A Tracción Y Compresión

Estos ensayos consisten en someter probetas de ensayo de un material específico generalmente metales, a un esfuerzo axial progresivo hasta que dicha probeta llegue a su punto de ruptura. En el estado de tracción según la ley de Hooke la probeta experimenta una elongación que a su vez genera una reducción en su sección transversal. Por otra parte, en el estado de compresión la probeta experimenta una contracción en el eje axial y un ensanchamiento en la sección transversal instantes antes de llegar a la ruptura, los dos ensayos se llevan a cabo en la denominada Máquina universal (Chang Nieto & Pérez Avendaño, 2015).

2.7 Ley De Hooke

Al realizar experimentos en barras prismáticas sometidas a extensión, se ha visto que el alargamiento de las barras es proporcional a la fuerza extensora entre ciertos límites (zona elástica). En 1678 el investigador inglés Robert Hooke enuncia por primera vez la relación lineal entre las fuerzas y deformaciones, dicha relación es expresada por la ecuación (2) la cual ha dado origen a otras expresiones (3),(4) dependiendo del estado y dimensiones que se estudie (Romero García et al., 2002; Timoshenko, 1957).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{Pl}{AE} \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] ; \varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] ; \varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (4)$$

2.8 Teorías De Falla

Son distintas formulaciones, usadas para determinar aproximaciones confiables de esfuerzos, en estructuras o elementos sometidos a cargas estáticas. Esto permite diseñar estructuras seguras, controlando que los esfuerzos aplicados no sobrepasen el rango elástico lineal del material. Entre estas teorías se tiene la teoría del esfuerzo normal (principal) máximo y la teoría de la energía de distorsión (esfuerzo Von-Mises), por nombrar unas de ellas. Su aplicación depende del tipo de material utilizado (dúctil o frágil) (Ponce Montengro, 2011).

2.8.1 Teoría de la energía de distorsión.

La teoría de la energía de distorsión mayormente utilizada en materiales dúctiles, está fundamentada en la comparación entre el esfuerzo Von Mises y la resistencia de fluencia del

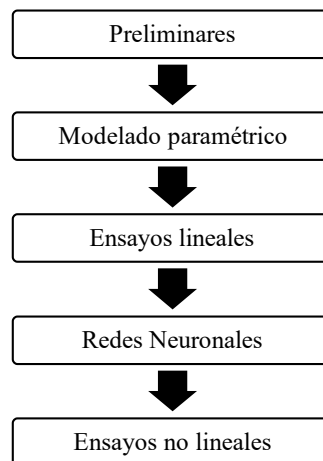
material, entendiéndose el esfuerzo Von Mises como el valor efectivo de un elemento de esfuerzo (Ponce Montengro, 2011).

3. Metodología

La metodología empleada en esta investigación comprende cinco (5) etapas principales (Figura 4).

Figura 4

Metodología del estudio



Nota. Diagrama de flujo de la metodología ejecutada. Elaboración propia

3.1 Preliminares

La caracterización de estructuras biomiméticas ha tenido cierto impacto en áreas dedicadas a la búsqueda de patrones que mejoren las propiedades de los productos manufacturados, esto ha dado lugar a publicaciones que contienen metodologías de diseño (Jiang et al., 2019; Serrano Ruiz, 2020; Sierra Preciado, 2015) y escenarios de resultados

(Amorim et al., 2021; Prasanth et al., 2021; Ramírez Díaz et al., 2010), que sirvieron como guía para esta investigación.

3.2 Modelado Paramétrico

Las estructuras biomiméticas seleccionadas para este análisis fueron: Giroide, Helicoidal y Trabecular. Se realizó una inspección geométrica para determinar sus parámetros principales (tabla 1) en base a su construcción mediante el software Rhinoceros 5 (Robert McNeel y asociados, 2013).

Se estableció el espacio de diseño para cada parámetro (Tabla 1), teniendo en cuenta una probeta con relación altura/diámetro de 2.0 según la norma ASTM E9-09 para probetas cortas, que mejor se adaptan a el análisis de materiales de alta resistencia (ASTM International, 2018). Se definió un diámetro de 70mm y una altura de 140mm, con el fin de facilitar la comprobación experimental de los resultados en futuros trabajos.

La estructura del giroide se construyó a partir de células unitarias definidas por la ecuación 1 (Serrano Ruiz, 2020), que componen la probeta establecida en un total igual a dos veces el cubo de las células en dirección radial. Los parámetros considerados fueron el número de células unitarias en dirección radial y el espesor de la superficie con intervalos de diseño de 1 a 3 células y de 1mm a 3mm respectivamente.

$$\cos(x) * \sin(y) + \cos(y) * \sin(z) + \cos(z) * \sin(x) = 0 \quad (5)$$

La estructura helicoidal se construyó en capas de cilindros y se consideraron 3 parámetros: el número de cilindros por capa limitado entre 3 y 8, el ángulo de rotación entre capas en un espacio de diseño de 5° a 90° y el espesor de los cilindros entre 1mm y 3mm.

La estructura trabecular se modeló mediante celdas de Voronoi (Sierra Preciado, 2015) con un espacio de diseño entre 26 a 45 celdas. Generadas a partir de puntos aleatorios mediante el algoritmo Populate (Grasshopper, 2014), el cual requiere de un número inicial denominado semilla de inserción. Este número al igual que el grosor mínimo de los enlaces se consideraron como parámetros, en intervalos de 1 a 30 y de 1mm a 3mm respectivamente.

Tabla 1

Parámetros y espacio de diseño

Estructura	Parámetro	Espacio de diseño
Giroide	# de células unitarias en dirección radial	1 a 3
	Espesor	1 a 3 mm
Helicoidal	# de cilindros por capa	3 a 8
	Ángulo entre capas	1 a 90°
	Espesor	1 a 3 mm
Trabecular	Semilla de inserción	1 a 30
	# de celdas Voronoi	26 a 45
	Espesor	1 a 3 mm

Nota. Parámetros de diseño de cada estructura para una probeta de 70mm de diámetro y una altura de 140mm. Elaboración propia

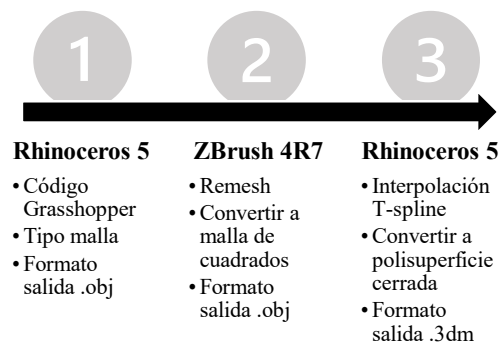
Aunque existe una gran variedad de software de modelado 3D, son pocos los que ofrecen herramientas de dibujo aptas para la parametrización de este tipo de estructuras. Después de realizar una etapa de pruebas de modelado en diferentes softwares se observó la necesidad de integrar varios de estos, con el fin de solucionar problemas geométricos y

obtener una geometría limpia, la cual es requerida para la simulación por el método de elementos finitos (MEF) en el software Ansys v19.2, licencia comercial (Ansys, 2018).

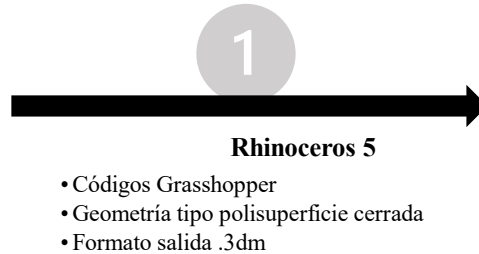
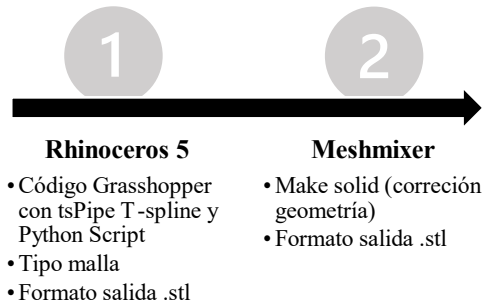
El flujo para el modelado de las estructuras se inició en la interfaz del plug in Grasshopper (David Rutten, 2014) del software Rhinoceros 5 (Robert McNeel y asociados, 2013), donde se realizó el código que permitiera la parametrización geométrica. Además, se trabajó en conjunto con los softwares ZBrush 4R7 (Pixologic, 2016), Meshmixer v3.5.474 (Autodesk, 2018) y el plug in T-Spline (Autodesk, 2013) para Rhinoceros 5 ([Figura 5](#), [Figura 6](#) y [Figura 7](#)). Cabe mencionar que los tiempos de generación geométrica para cada modelo de cada estructura estuvieron entre 10 min y 2 horas luego de la programación del código en Grasshopper (David Rutten, 2014).

Figura 5

Flujo de modelado paramétrico giroide



Nota. Subetapas importantes en el modelado 3D del giroide. Elaboración propia

Figura 6*Flujo de modelado paramétrico helicoidal**Nota.* Subetapas importantes en el modelado 3D del helicoidal. Elaboración propia**Figura 7***Flujo de modelado paramétrico trabecular**Nota.* Subetapas importantes en el modelado 3D del trabecular. Elaboración propia

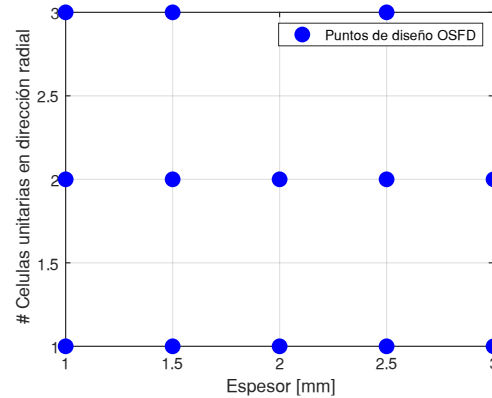
3.3 Ensayos Lineales

En la interfaz Desing Of Experiment de Ansys (Ansys, 2018) se generaron las diferentes configuraciones de parámetros para cada estructura, de acuerdo con el diseño de experimentos Optimal-Space Filling Design (OSFD) (Figura 8, Figura 9 y Figura 10). Estas configuraciones fueron modeladas teniendo en cuenta el flujo determinado para cada

estructura (figuras 3, 4 y 5), para luego ser importadas geométricamente al módulo Mechanical de Ansys (Ansys, 2018), donde se les realizaron ensayos lineales.

Figura 8

Espacio de diseño giroide

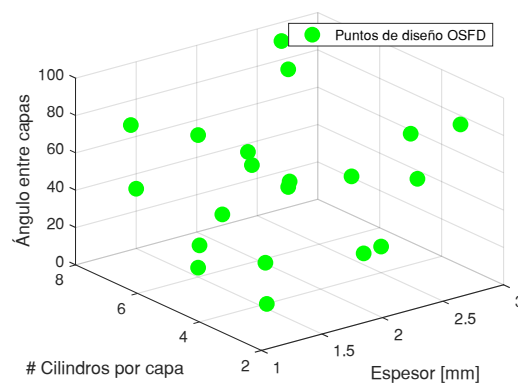


Nota. Configuraciones o puntos en el espacio de diseño de la estructura del giroide.

Elaboración propia

Figura 9

Espacio de diseño helicoidal

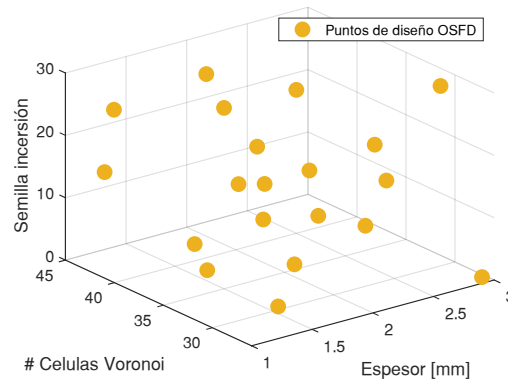


Nota. Configuraciones o puntos en el espacio de diseño de la estructura helicoidal.

Elaboración propia

Figura 10

Espacio de diseño trabecular



Nota. Configuraciones o puntos en el espacio de diseño de la estructura trabecular.

Elaboración propia

La simulación de ensayos lineales y no lineales se llevaron a cabo en un ordenador con una CPU Ryzen 5 3400G, memoria RAM de 16 GB 3200MHz y tarjeta gráfica GTX 1650 super 4GB, a través del software de elementos finitos Ansys (Ansys, 2018). En la interfaz Engineering Data de Ansys (Ansys, 2018) el material fue definido con las propiedades que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2*Propiedades del acero estructural*

ACERO ESTRUCTURAL	
Densidad	7850 [kg/m ³]
Coefficiente de expansión térmica	1.2 x10 ⁻⁵ [c-1]
Módulo de Young	2 x10 ⁵ [MPa]
Coefficiente de Poisson	0.3
Módulo de volumen	1.6667 x10 ¹¹ [Pa]
Módulo de corte	7.6923x10 ¹⁰ [Pa]
Límite elástico	250 [MPa]
Módulo tangente	1450 [MPa]
Resistencia a la tracción	250 [MPa]
Resistencia a la compresión	250 [MPa]
Resistencia última a la tracción	460 [MPa]
Resistencia última a la compresión	460 [MPa]

Nota. Propiedades físicas del acero estructural utilizado en los ensayos lineales y no lineales.

Elaboración propia.

El número de elementos finitos (malla) para cada ensayo fue definido en base a el tamaño y calidad de estos, teniendo como criterio en esta última una calidad superior al 50% en el 80% de los elementos, esto con el fin de reducir el coste computacional y los tiempos cálculo, sin embargo, la simulación para cada modelo tomo entre 2 min y 2.5 horas.

Los ensayos lineales fueron simulados con el fin de obtener el conjunto de datos, para el entrenamiento de la red neuronal de cada estructura. Se realizaron con la misma fuerza a tracción y a compresión, con los valores de 2.5KN, 1.4KN y 0.25KN para la estructura giroide, helicoidal y trabecular respectivamente. La definición de dicha fuerza se hizo de tal manera, que la configuración paramétrica menos segura en cada diseño experimental conservara un factor de seguridad mayor a 1.5, con el fin de mantener los ensayos en el rango lineal, usando la teoría del esfuerzo equivalente de Von Mises (Ponce Montengro, 2011). Las

respuestas a medir fueron: la deformación total [um] y el volumen [cm³] neto de material empleado.

Al utilizar un material isotrópico (Acero) las respuestas bajo las dos condiciones de carga en el rango lineal fueron iguales en cada geometría biomimética.

3.4 Redes Neuronales

En la simulación por elementos finitos, variables como la complejidad de la geometría, la densidad de elementos (densidad de malla) y el número de simulaciones están directamente relacionadas con el coste computacional. De no poseer hardware de altas capacidades de procesamiento puede convertirse en largos periodos de ejecución, que generan retrasos en cronogramas o dificultades al cometer errores de definición. Sin embargo, la inteligencia artificial a través de las redes neuronales de aprendizaje profundo (deep learning), ofrece una alternativa de solución a esta dificultad.

A partir del conjunto de datos producto de los ensayos lineales, con el fin de optimizar el tiempo de cálculo del análisis de sensibilidad de parámetros y encontrar una configuración cuasi óptima para el análisis comparativo, se realizó la programación de una red neuronal para cada estructura biomimética, utilizando el lenguaje de programación Python 3.6.9 con las respectivas arquitecturas que se muestran en la [Tabla 3](#), Tabla 4 y Tabla 5. El tipo de red neuronal artificial (RNA) utilizado fue el Perceptrón Multicapa (MLP) (Maarouf, 2016) con entrenamiento Backpropagation, función de activación Relu, función de perdida Mean Square Error y optimizador Adam. Se utilizó el entorno Colaboratory de Google y las librerías de inteligencia artificial Keras y Sklearn.

Tabla 3*Arquitectura red neuronal giroide*

Estructura	Capa	Neuronas
Giroide	Entrada	2
	Oculto 1	32
	Oculto 2	64
	Oculto 3	96
	Oculto 4	64
	Oculto 5	32
	Salida	2
Activación	Relu	
Pérdida	Mean square error	
Optimizador	Adam	
Batch size	64	
Epoch	256	

Nota. Capas, número de neuronas, funciones y entrenamiento definido para la red neuronal de la estructura giroide. Elaboración propia

Tabla 4*Arquitectura red neuronal helicoidal*

Estructura	Capa	Neuronas
Helicoidal	Entrada	3
	Oculto 1	32
	Oculto 2	64
	Oculto 3	128
	Oculto 4	64
	Oculto 5	32
	Salida	2
Activación	Relu	
Pérdida	Mean square error	
Optimizador	Adam	
Batch size	64	
Epoch	156	

Nota. Capas, número de neuronas, funciones y entrenamiento definido para la red neuronal de la estructura helicoidal. Elaboración propia

Tabla 5*Arquitectura red neuronal trabecular*

Estructura	Capa	Neuronas
Trabecular	Entrada	3
	Oculto 1	32
	Oculto 2	64
	Oculto 3	128
	Oculto 4	64
	Oculto 5	32
	Salida	2
Activación	Relu	
Pérdida	Mean square error	
Optimizador	Adam	
Batch size	64	
Epoch	156	

Nota. Capas, número de neuronas, funciones y entrenamiento definido para la red neuronal de la estructura trabecular. Elaboración propia

Las 3 redes neuronales alcanzaron el 100% de precisión en el entrenamiento y validación, no obstante, en la prueba final llegaron a una precisión en deformación y en volumen respectivamente de: 95.1% y 96.8% la RNA del giroide, 86% y 97% la RNA del helicoidal y 88.3 y 99.1% la RNA trabecular.

Mediante los modelos de RNAs en formato .h5 de Keras, se predijeron las respuestas (deformación y volumen neto de material) requeridas para el análisis de sensibilidad. Atendiendo al principio básico de este, se varió determinado parámetro de estudio mientras los demás, permanecían constantes, con el fin de observar el impacto en la respuesta.

A estos mismos modelos de RNAs se les articuló el algoritmo de optimización, definido en 1500 iteraciones y 10 ciclos supervisados, para predecir las configuraciones cuasi óptimas de cada estructura para un volumen neto de material de 100 cm³ (Tabla 6 y Figura

11) con el fin de poder comparar la respuesta mecánica y establecer la estructura con mayor relación rigidez/volumen.

Tabla 6

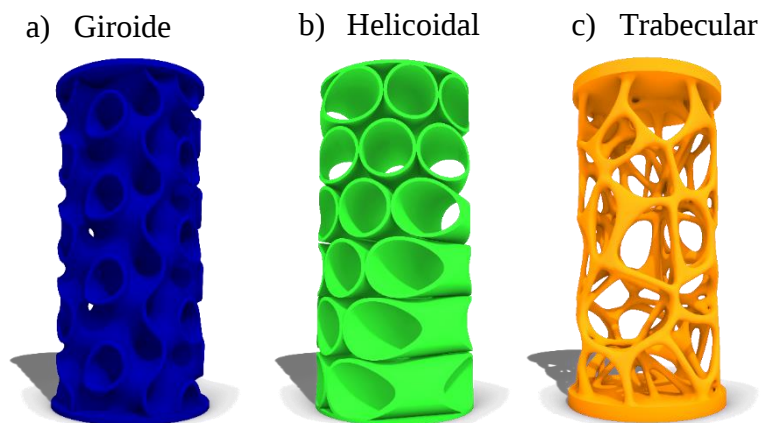
Estructuras cuasi óptimas

Estructura	Parámetro	Valor
Giroide	# de células unitarias en dirección radial	2
	Espesor	2.0
Helicoidal	# de cilindros por capa	3
	Ángulo entre capas	17
	Espesor	1.4
Trabecular	Semilla de inserción	11
	# de celdas Voronoi	43
	Espesor	2.7

Nota. Parámetros cuasi óptimos para una probeta de 70mm de diámetro, 140mm de altura y un volumen neto de material de 100 cm³. Elaboración propia

Figura 11

Modelo 3D estructuras cuasi óptimas



Nota. Vista tridimensional de las configuraciones cuasi óptimas de cada estructura, mencionadas en la Tabla 6. Elaboración propia

3.5 Ensayos No Lineales

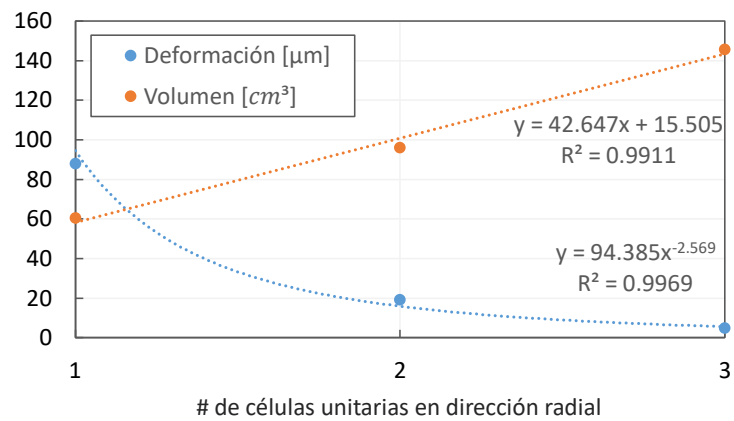
Luego de obtener las configuraciones cuasi óptimas para cada una de las estructuras, se realizó el modelado 3D correspondiente y la importación en el módulo Mechanical de Ansys (Ansys, 2018), para la realización de los ensayos no lineales a tracción y compresión. Se aplicó una fuerza progresiva hasta llegar a una deformación aproximada del 20% de la altura total de la probeta, con el fin de obtener la curva esfuerzo deformación, realizar el análisis comparativo entre las tres estructuras y determinar según los datos obtenidos la estructura con mejor relación entre rigidez/volumen. Para la obtención de la curva esfuerzo deformación se consideraron las probetas como homogéneas e isotrópicas.

4. Resultados

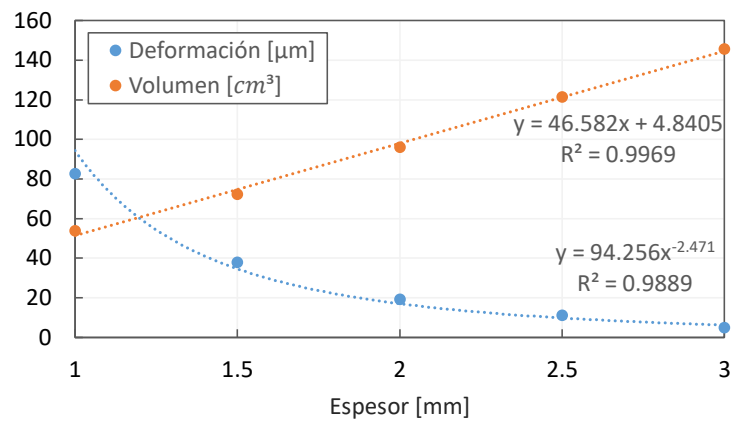
4.1 Análisis De Sensibilidad De Parámetros

4.1.1 *Giroide*

Como se intuía, los resultados obtenidos en [Figura 12](#) y Figura 13, demuestran que tanto el espesor, como el número de células unitarias presentan una relación directamente proporcional con el volumen total, además, la deformación de esta estructura varía de manera inversa y potencial de acuerdo con estos parámetros.

Figura 12*Comportamiento del número de células en dirección radial*

Nota. Teniendo en cuenta el coeficiente de correlación al cuadrado se muestra el ajuste de tendencia lineal y potencial para el volumen y la deformación respectivamente, frente al número de células unitarias en dirección radial. Elaboración propia

Figura 13*Comportamiento del espesor*

Nota. Teniendo en cuenta el coeficiente de correlación al cuadrado se muestra el ajuste de tendencia lineal y potencial para el volumen y la deformación respectivamente, frente al espesor. Elaboración propia

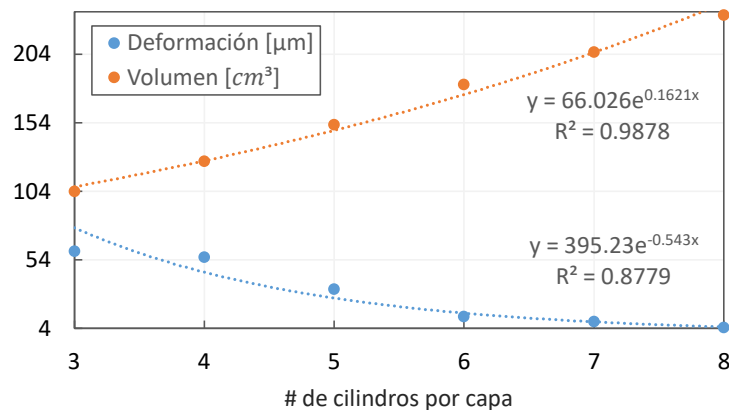
Teniendo en cuenta las ecuaciones de tendencias ajustadas para cada parámetro es posible establecer el espesor como el parámetro más sensible para esta estructura.

4.1.2 Helicoidal

La relación encontrada respecto a la deformación y el volumen total de la estructura se puede considerar de forma exponencial inversa y directa respectivamente (Figura 14).

Figura 14

Comportamiento del número de cilindros por capa



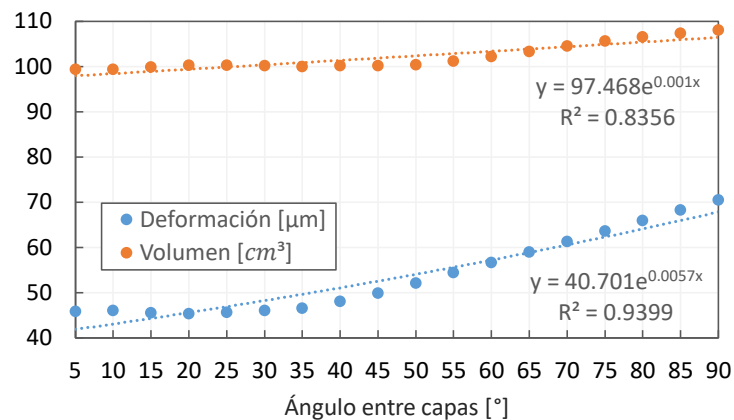
Nota. Teniendo en cuenta el coeficiente de correlación al cuadrado se muestra el ajuste de tendencia exponencial inversa y directa para el volumen y la deformación respectivamente, frente al número de cilindros por capa. Elaboración propia

En el ángulo entre capas, se evidenció que, aunque el impacto en la respuesta se ajustan a una tendencia exponencial, existen puntos de inflexión en intervalos pequeños entre

los 5 y 50° donde el comportamiento es diferente, esto se debe principalmente a el ángulo de rotación total de la estructura, el cual tiene un ciclo específico según el número de cilindros por capa y la cantidad total de estas, así mismo el volumen total se ve afectado, ya que el espacio de contacto entre los cilindros también varía. En la [Figura 15](#), se aprecia que, para esta configuración específica de parámetros constantes, el ciclo se cumple alrededor de un ángulo entre capas de 36°, con puntos de inflexión mínimos para deformación entre 15° y 25°. Por ende, se considera que un punto óptimo de menor deformación respecto a este parámetro se encuentra en el valor del ángulo que genera la mitad del ciclo de rotación de toda la estructura.

Figura 15

Comportamiento del ángulo entre capas



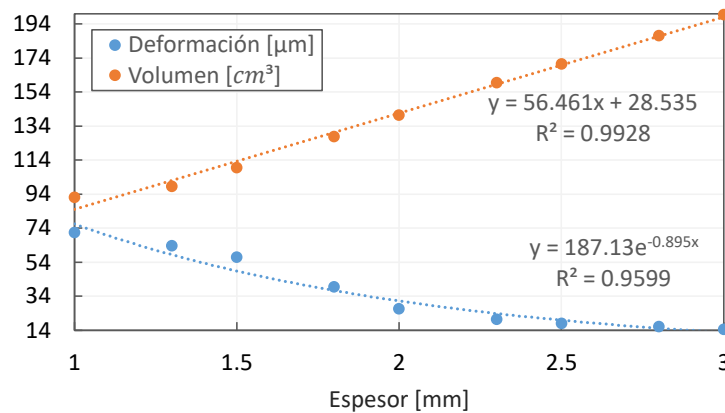
Nota. Teniendo en cuenta el coeficiente de correlación al cuadrado se muestra el ajuste de tendencia exponencial para el volumen y la deformación, frente al ángulo entre capas.

Elaboración propia

Por último, el espesor, presenta una relación exponencial inversa con la deformación y una lineal directa con el volumen (Figura 16). Se tuvo que aumentar la cantidad de muestras para confirmar dicha tendencia lineal.

Figura 16

Comportamiento del espesor



Nota. Teniendo en cuenta el coeficiente de correlación al cuadrado se muestra el ajuste de tendencia lineal y exponencial inversa para el volumen y la deformación respectivamente, frente al espesor. Elaboración propia

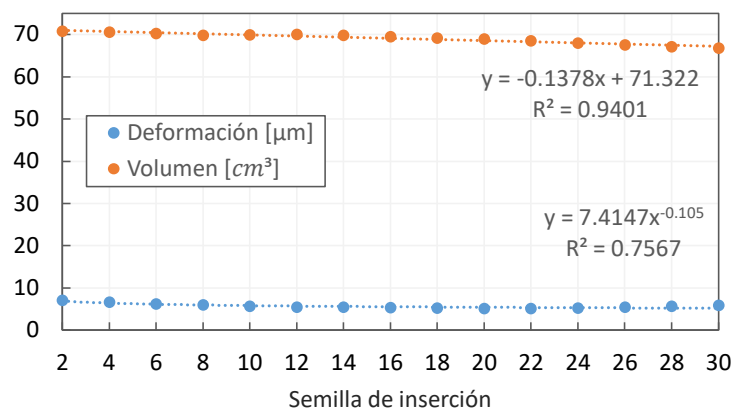
A partir del análisis y ajustes gráficos anteriores, se pudo establecer que, de los 3 parámetros estudiados para esta estructura, el que más impacta en la respuesta de volumen y deformación es el espesor, seguido del número de cilindros, por otra parte, aunque el impacto en el volumen del ángulo entre capas es bajo y cíclico, para la deformación los ciclos son más significativos y especiales que requieren de estudios más detallados.

4.1.3 Trabecular

El parámetro semilla de inserción, presenta una relación inversa tanto para el volumen como para la deformación (Figura 17). El impacto de este parámetro en la respuesta es muy bajo, debido a que constituye la aleatoriedad de la posición de las celdas en la estructura.

Figura 17

Comportamiento de la semilla de inserción



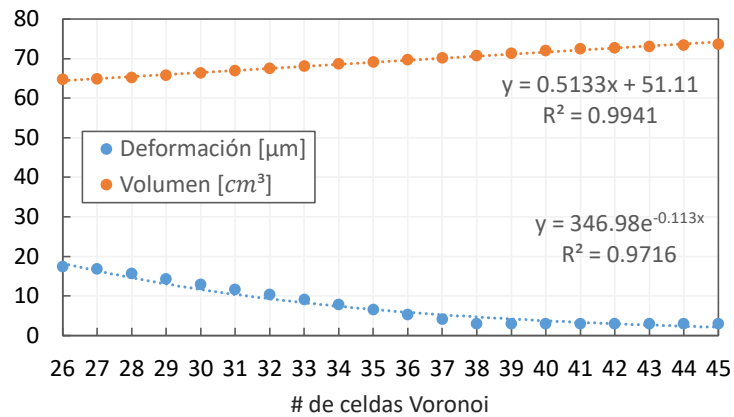
Nota. Teniendo en cuenta el coeficiente de correlación al cuadrado se muestra el ajuste de tendencia inversa para el volumen y la deformación, frente a la semilla de inserción.

Elaboración propia

En el intervalo estudiado para el número celdas Voronoi, se pudo evidenciar la relación directamente proporcional al volumen y exponencial decreciente a la deformación, como muestra la Figura 18, también fue posible observar que en el tramo de 26 a 38 celdas la deformación decrece de manera más rápida que en el espacio restante, lo que puede interpretarse como un subespacio de diseño con apreciables cambios de deformación.

Figura 18

Comportamiento del número de celdas Voronoi

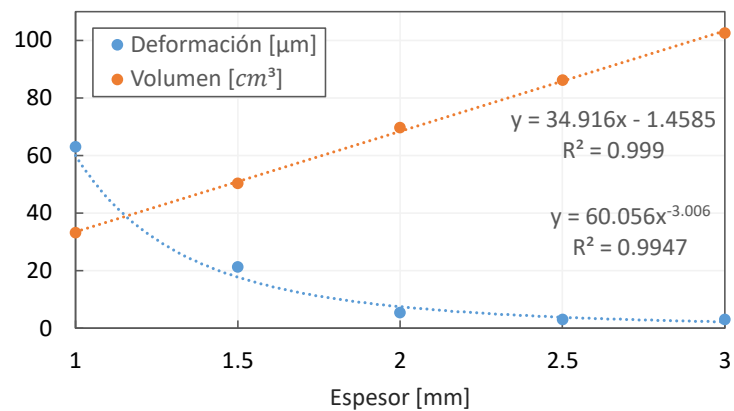


Nota. Teniendo en cuenta el coeficiente de correlación al cuadrado se muestra el ajuste de tendencia lineal y exponencial para el volumen y la deformación respectivamente, frente al número de celdas Voronoi. Elaboración propia

El espesor o grosor presentó una relación directamente proporcional frente al volumen e inversa exponencial a la deformación como se observa en la [Figura 19](#).

Figura 19

Comportamiento del espesor o grosor



Nota. Teniendo en cuenta el coeficiente de correlación al cuadrado se muestra el ajuste de tendencia lineal y exponencial para el volumen y la deformación respectivamente, frente al espesor. Elaboración propia

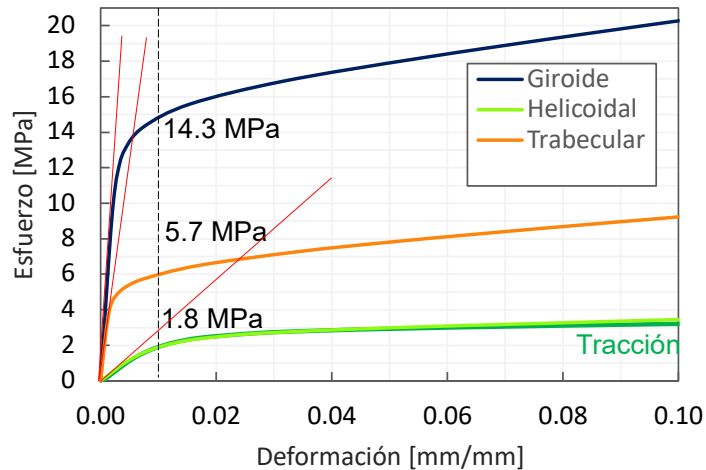
En base a lo observado los parámetros espesor y semilla de inserción, producen en el volumen y la deformación el mayor y menor cambio, respectivamente. En cuanto al número de celdas este presentó un intervalo donde los cambios de deformación son mínimos.

4.2 Análisis Comparativo

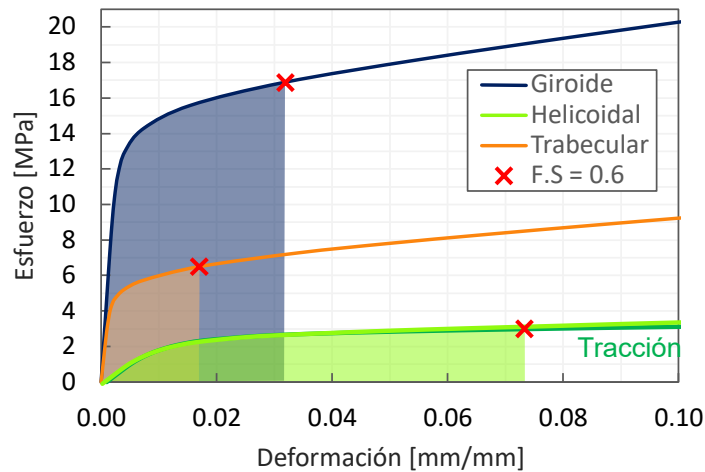
De las configuraciones cuasi óptimas predichas y sometidas a compresión y tracción no lineal se obtuvieron los comportamientos de las curvas esfuerzo deformación (Figura 20 y Figura 21).

Figura 20

Comportamiento de rigidez



Nota. Comparación entre el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación tanto a tracción como a compresión, con énfasis en las pendientes iniciales. Elaboración propia

Figura 21*Comportamiento de absorción de energía*

Nota. Comparación entre el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación tanto a tracción como a compresión, con énfasis en el área bajo la curva hasta el factor de seguridad de 0.6. Elaboración propia

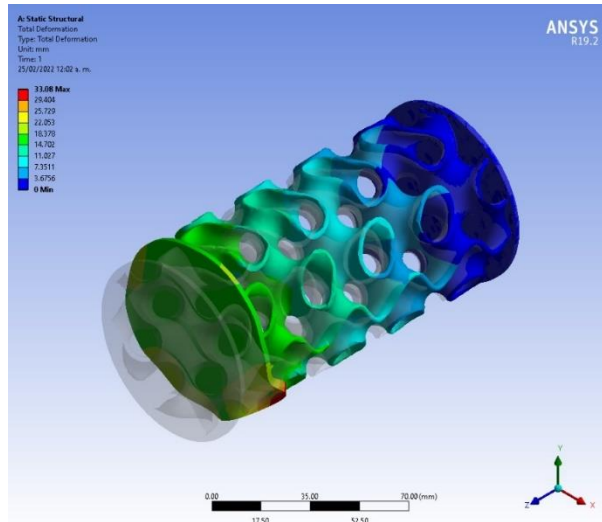
El ensayo numérico bajo las condiciones específicas como material, forma y dimensiones de probeta, entre otras de este estudio, indica que para generar 0.01 unidades de deformación en las estructuras giroide, helicoidal y trabecular se requiere aplicar un esfuerzo de 14.3 [MPa], 1.8 [MPa] y 5.7 [MPa] respectivamente a cada estructura tanto a compresión como a tracción [Figura 20](#), la igualdad de estas dos condiciones estudiadas es particular de las características isotrópicas del acero. Sin embargo, la estructura helicoidal exhibe un comportamiento diferente a partir de este valor de esfuerzo, lo cual está directamente relacionado con la fricción entre los cilindros producto de su particular deformación en el grado de libertad rotacional como se observa en la [Figura 23](#) y la [Figura 26](#).

Al comparar las pendientes de los gráficos en Figura 20, las cuales indican el módulo de Young para cada estructura, se observa que el giroide presenta una mejor rigidez tanto a compresión como a tracción, con un alto margen de diferencia respecto a las estructura helicoidal y trabecular, cabe mencionar, que su máxima deformación se presentó en la superficie de aplicación de la carga, ya que en esta se presenta un sector con mayor volumen en voladizo como se muestra en la Figura 22 y la Figura 25, producto de su periodicidad espacial. Se consideró un factor de seguridad de 0.6 Figura 21, siendo este muy bajo y solo con el objeto de análisis, para comparar el área bajo la curva, de lo cual se puede inferir, que la estructura giroide, presenta un mayor grado de absorción de energía frente a las demás estudiadas.

En el comportamiento entre el esfuerzo Von Mises y la deformación (Figura 28), resalta la estructura helicoidal, con un pico de esfuerzo máximo aproximado de 385 [MPa], seguido de un descenso fuerte, interpretados como el límite de ruptura o máximo endurecimiento por deformación y la estricción de fluencia, que son estados intrínsecos del acero. El fenómeno de ondulación producto de la densificación, es más común en el giroide. Los colapsos bruscos y relativamente instantáneos en este estudio están más asociados a la estructura trabecular como causa de su aleatoriedad y asimetría, que también produjo inestabilidades y volcamientos respecto al eje de aplicación de la carga (Figura 24 y Figura 27). Cabe resaltar el impacto que producen las configuraciones geométricas en la curva esfuerzo deformación propia del material. Por último, se estableció el giroide como la estructura con mejor relación rigidez/volumen de las tres estudiadas, motivo por el cual fueron construidas con la misma cantidad de material.

Figura 22

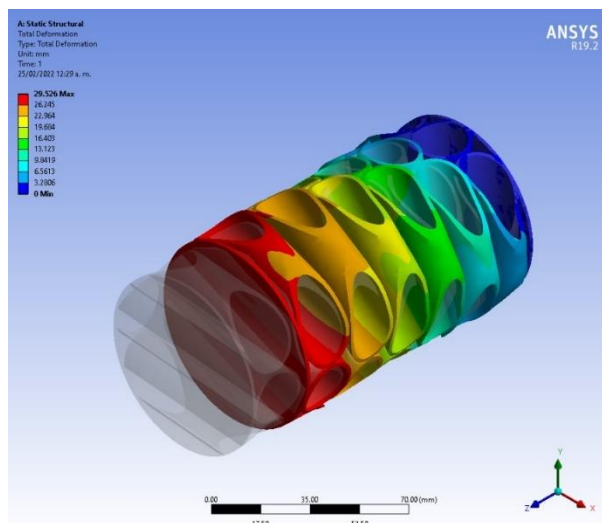
Deformación de la estructura giroide a compresión



Nota. Vista tridimensional de la deformación obtenida a compresión en la estructura del giroide, por medio del software de elementos finitos Ansys. Elaboración propia

Figura 23

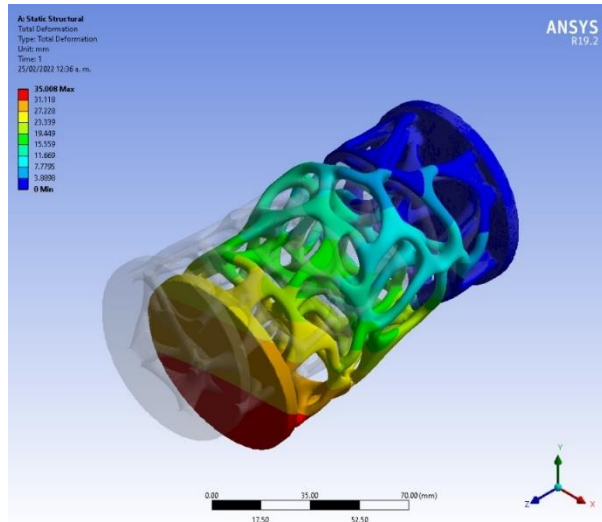
Deformación de la estructura helicoidal a compresión



Nota. Vista tridimensional de la deformación obtenida a compresión en la estructura helicoidal, por medio del software de elementos finitos Ansys. Elaboración propia

Figura 24

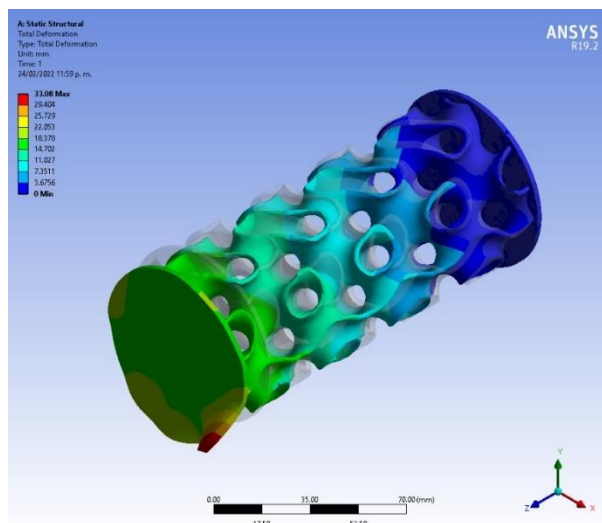
Deformación de la estructura trabecular a compresión



Nota. Vista tridimensional de la deformación obtenida a compresión en la estructura trabecular, por medio del software de elementos finitos Ansys. Elaboración propia

Figura 25

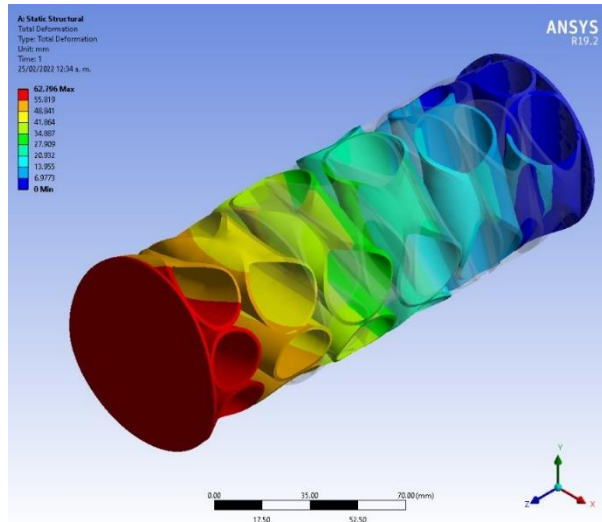
Deformación de la estructura giroide a tracción



Nota. Vista tridimensional de la deformación obtenida a tracción en la estructura del giroide, por medio del software de elementos finitos Ansys. Elaboración propia

Figura 26

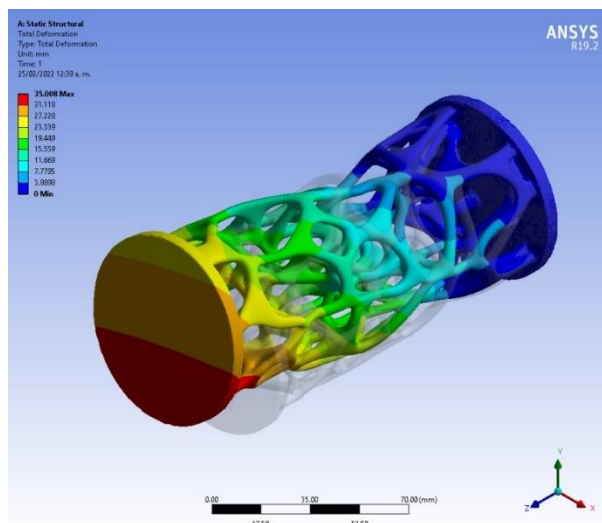
Deformación de la estructura helicoidal a tracción



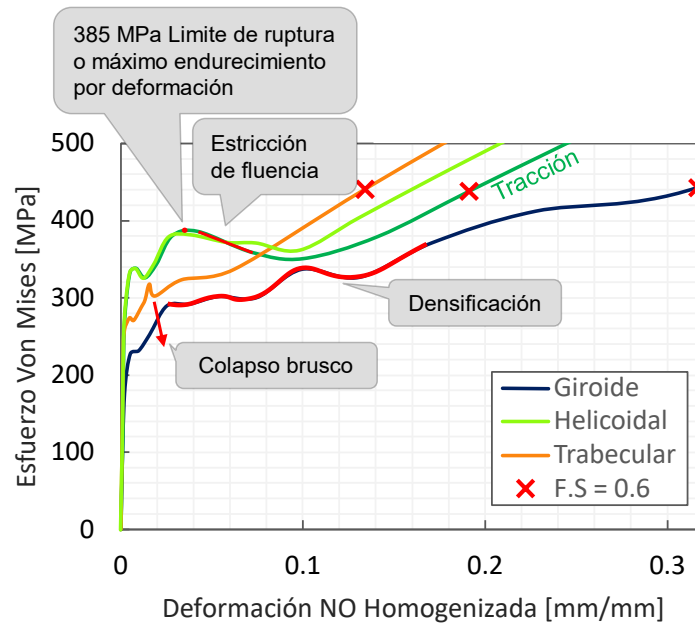
Nota. Vista tridimensional de la deformación obtenida a tracción en la estructura helicoidal, por medio del software de elementos finitos Ansys. Elaboración propia

Figura 27

Deformación de la estructura trabecular a tracción



Nota. Vista tridimensional de la deformación obtenida a tracción en la estructura trabecular, por medio del software de elementos finitos Ansys. Elaboración propia

Figura 28*Esfuerzo Von Mises vs Deformación total*

Nota. Comparación entre el comportamiento de las curvas esfuerzo von Mises vs deformación no homogenizada tanto a tracción como a compresión, con énfasis en los comportamientos específicos de cada estructura. Elaboración propia

5. Conclusiones

La presente investigación caracterizó mediante análisis numérico por elementos finitos, el comportamiento a compresión y tracción de las estructuras biomiméticas giroide, helicoidal y trabecular. Como resultado se estableció la curva esfuerzo deformación para cada estructura. En esta se observaron comportamientos propios de cada modelo biomimético, a su vez, por medio del análisis comparativo se identificó la estructura giroide

como la de mejor comportamiento bajo las condiciones mencionadas, resaltándose como la más rígida, tenaz y con mejor relación rigidez/volumen que se traduce en una mejor optimización del material frente a las tres estudiadas.

Así mismo, en el análisis de sensibilidad se determinó el espesor como el parámetro más susceptible a producir cambios en las respuestas volumen y deformación en cada geometría bio-inspirada. En la estructura trabecular el número de celdas Voronoi mostró un punto a partir del cual el aumento de volumen no contribuye a cambios significativos en la rigidez, mientras que la aleatoriedad no controlada puede llevar a inestabilidades y fragilidad en la estructura.

Por otra parte, en la estructura Helicoidal el ángulo de rotación entre capas exhibió comportamientos cíclicos significativos e interesantes para la rigidez que requieren de estudios más detallados, ya que se intuye una correlación de parámetros.

Se puede inferir que, con el desarrollo de nuevas investigaciones, el campo biomimético promete resultados potenciales, que pueden ser aprovechados en los diferentes sectores de construcción, en la fabricación de piezas mecánicas y especialmente en el campo de aplicación de la ingeniería civil. Aunque en este estudio, fueron sobresalientes las altas características mecánicas del giroide cada estructura posee propiedades adaptables según las necesidades.

A nivel general el uso de las redes neuronales para la optimización de recursos, no solo se vio reflejada en las simulaciones sino también en el cronograma de desarrollo de este

estudio, lo que sugiere una mayor integración y explotación del potencial que ofrece esta herramienta tecnológica en el campo científico.

6. Recomendaciones

En trabajos posteriores se sugiere:

- Realizar la comprobación experimental de los resultados obtenidos utilizando tecnología de impresión 3D.
- Investigar el comportamiento de estas y otras estructuras bajo análisis flexión, análisis modal entre otros.
- Estudiar otro tipo de respuestas como el coeficiente de Poisson

Por otra parte, se recomienda estudiar la viabilidad de aplicar y aprovechar las propiedades que ofrecen las geometrías biomiméticas, en elementos estructurales de la ingeniería civil, tales como: disipadores, columnas, vigas, losas, muros, etc.

Referencias Bibliográficas

- Amorim, L., Santos, A., Nunes, J. P., Dias, G., & Viana, J. C. (2021). Quasi static mechanical study of vacuum bag infused bouligand inspired composites. *Polymer Testing*, 100, 107261. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2021.107261>
- Ansys, I. (2018). *Ansys* (19.2). <https://www.ansys.com/>
- ASTM International. (2018). Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature ASTM E9-09. En *ASTM Metales - Ensayos mecánicos* (Volumen 03.01; p. 1830). <https://www.astm.org/e0009-09.html>
- Autodesk, I. (2013). *T-Splines for Rhino* (3.5 r8975 (64)). <https://knowledge.autodesk.com/es/search-result/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/Autodesk-T-Splines-plugin-for-Rhino-licensing.html>
- Autodesk, I. (2018). *Meshmixer* (3.5.474). <https://www.meshmixer.com/>
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry Innovation Inspired by Nature*. HarperCollins e-books. https://www.academia.edu/38300413/Janine_M_Benyus_Biomimicry_Innovation_Inspired_by_Nature_2002_Harper_Perennial_1_
- Bouligand, Y. (1972). Twisted fibrous arrangements in biological materials and cholesteric mesophases. *Tissue and Cell*, 4(2), 189–217. [https://doi.org/10.1016/S0040-8166\(72\)80042-9](https://doi.org/10.1016/S0040-8166(72)80042-9)
- Cayleigh McCreight. (2021, julio 8). ¿Qué ecuaciones se utilizan para crear los tipos de TPMS? - *nTopología*. Question: What equations are used to create the TPMS types used in nTopology? <https://support.ntopology.com/hc/en-us/articles/360053267814>
- Chang Nieto, G., & Pérez Avendaño, D. (2015). *Guías de laboratorio*. (Santa Marta: Editor...). Editorial Unimagdalena. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4259/es/ereader/uis/70100>
- Contract Workplaces. (2015, julio 17). *BIOMIMÉTICA, el futuro de la sustentabilidad*. <https://issuu.com/ndiricci/docs/fm74>
- David Rutten. (2014). *Grasshopper* (0.9.0076). <https://www.grasshopper3d.com/page/download-1>
- Diseño Vip. (2020). *Edificio Moderno y Sostenible Qatar Sprouts Biomimética - Diseño Vip*. Diseño Vip. <https://xn--diseo-rta.vip/edificios-modernos-qatar-sprouts/>
- Fedesarrollo. (2017). *Informe Mensual*. No. 179. <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/3468>
- Grasshopper. (2014). *Grasshopper Addons and Plugins | Grasshopper Docs*. Grasshopper Docs. <http://grasshopperdocs.com/>
- Jiang, H., Ren, Y., Liu, Z., Zhang, S., & Lin, Z. (2019). Low-velocity impact resistance behaviors of bio-inspired helicoidal composite laminates with non-linear rotation angle based layups. *Composite Structures*, 214, 463–475. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.02.034>
- Judd Shamus Day. (2005). *Bone Quality: The Mechanical Effects of Microarchitecture and Matrix Properties* [Erasmus University Rotterdam]. https://www.researchgate.net/publication/254800965_Bone_Quality_The_Mechanical_Effects_of_Microarchitecture_and_Matrix_Properties
- Maarouf, M. (2016). *Aplicación de redes neuronales para la resolución de problemas complejos de confiabilidad y riesgo* [Universidad Las Palmas de Gran Canaria].

- <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/18929>
- Moreno De Luca, L., Galvis Chacón, M. J., & García, R. J. (2012). BIOMÍMESIS EN ARQUITECTURA E INGENIERÍA ESTRUCTURAL. *Revista M*, 9(1), 101. <https://doi.org/10.15332/REV.M.V9I1.973>
- Naleway, S. E., Porter, M. M., McKittrick, J., & Meyers, M. A. (2015). Structural Design Elements in Biological Materials: Application to Bioinspiration. *Advanced Materials*, 27(37), 5455–5476. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201502403>
- Pixologic. (2016). *ZBrush 4R7* (Núm. 4R7). <https://pixologic.com/zbrush/features/ZBrush4R7/>
- Ponce Montengro, D. A. (2011). *Programa computacional didáctico para el aprendizaje del diseño estático y dinámico en ingeniería mecánica* [QUITO/EPN/2011]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4315>
- Prasanth, A. S., Ramesh, R., Nathish Kumar, S., Radhakrishnan, K., & Krishna, P. (2021). An experimental and numerical study on the tensile and compressive behavior of 3D printed biomimetic structures. *Materials Today: Proceedings*, 46, 550–554. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.11.111>
- Ramírez Díaz, E. I., Ortiz Prado, A., Schouwenaars-Franssens, R., & Ruiz Cervantes, O. (2010). Metodología para el modelado del comportamiento mecánico de hueso esponjoso a partir de sus microestructuras. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(2), 199–216. <https://doi.org/10.22201/FI.25940732E.2010.11N2.017>
- Robert McNeel y asociados. (2013). *Rhinoceros 3D* (5.5.30717.16015). <https://www.rhino3d.com/>
- Romero García, M., Museros Romero, P., Martínez Rodrigo, M. D., & Poy Gil, A. (2002). *Resistencia de materiales* (Universitat Jaume I, Vol. 12). Universitat Jaume I. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3806/a/14736>
- Saranathan, V., Osuji, C. O., Mochrie, S. G. J., Noh, H., Narayanan, S., Sandy, A., Dufresne, E. R., & Prum, R. O. (2010). Structure, function, and self-assembly of single network gyroid (I4132) photonic crystals in butterfly wing scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26), 11676–11681. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0909616107>
- Serrano Ruiz, D. E. (2020). *Caracterización y análisis del fenómeno de absorción de energía en materiales celulares de PLA con estructuras estocásticas de celda abierta y con estructuras TPMS*. <http://hdl.handle.net/1992/51619>
- Sierra, C. H. (2020). Re-descubriendo el mundo natural. La biomimesis en perspectiva. En C. H. Sierra (Ed.), *Libros Universidad Nacional Abierta y a Distancia: Vol. segunda ed.* Editorial UNAD. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/3717>
- Sierra Preciado, J. L. (2015). *Aplicativo CAD para generación de geometrías porosas internas en implantes óseos* [Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/670?show=full>
- Singh, I. (1978). The architecture of cancellous bone. *Journal of Anatomy*, 127(Pt 2), 305. <https://pmc/articles/PMC1235771/?report=abstract>
- Timoshenko, S. (1957). *Resistencia de materiales, Tomo I* (Vol. 1). CALPE S.A. https://www.academia.edu/26052581/Timoshenko_Resistencia_de_materiales_tomo_I
- Yaraghi, N. A., & Kisailus, D. (2017). Biomimetic Structural Materials: Inspiration from Design and Assembly. *Annual Review of Physical Chemistry*, 69, 23–57. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-PHYSCHEM-040215-112621>