

REPORTE FINAL DE PROYECTO DE ESPECIALIDAD TITULADO

“Simulación numérica de paneles tipo sándwich fabricados a partir de micro-armaduras poliméricas y bio-laminados “

QUE PARA OBTENER
LA ESPECIALIDAD TECNÓLOGO EN MECATRÓNICA

PRESENTA

**Ing. Jaqueline de los Ángeles Viveros
González**

Tutores Académicos:

Dr. Salomón Miguel Ángel Jiménez Zapata

Dr. Edgar Adrián Franco Urquiza



QUERETARO, QRO. JUNIO 2018.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia por confiar en mi y apoyarme en todo momento en esta nueva etapa, en especial a mis padres por no desesperarse y nunca perder la fé en mi.

Agradezco a CIDESI por permitirme formar parte de su comunidad en la realización de este proyecto y así poder culminar una etapa más en mi desarrollo profesional, a mis asesores el Dr. Salomón Miguel Ángel Jiménez Zapata y Dr. Edgar Adrián Franco Urquiza por compartir sus conocimientos y su apoyo incondicional durante el desarrollo de este proyecto.

De igual manera agradezco a CONACYT por el apoyo económico que me brindo durante el transcurso de la especialidad.



CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL
CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN TECNOLÓGICA

**AUTORIZACIÓN
PUBLICACIÓN EN FORMATO ELECTRÓNICO DE TESIS**

Fecha: 22 junio 2018.

El que suscribe Alumno (a) Jaqueline de los Angeles Viveros González

CURP: VIGJ930802MVZVNQ07 CVU: 789301

ORCID: 0000-0003-3979-3477

Correo electrónico (opcional): jaqueviveros02@gmail.com

Egresado (a) de: Especialidad Tecnólogo en Mecatrónica

Autor de la Tesis titulada: Simulación numérica de paneles tipos sándwich fabricados a partir de micro-armaduras.

Por medio del presente documento autorizo¹ en forma gratuita y permanente a que la Tesis arriba citada sea divulgada y reproducida para publicarla mediante almacenamiento electrónico que permita el acceso al público a leerla y conocerla visualmente, así como a comunicarla públicamente en Página Web. La única contraprestación que condiciona la presente autorización es la del reconocimiento del nombre del autor en la publicación que se haga de la misma.

Atentamente

Jaqueline de los Angeles Viveros González
Nombre y firma del tesista

¹ Ley Federal de Derechos de Autor

Para obtener tu ORCID regístrate en: <https://orcid.org/register>

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702 Desarrollo San Pablo. C. P. 76125
Santiago de Querétaro, Qro., México México.
Tel. 01 (442) 211 98 40
E-mail: jvite@cidesi.edu.mx

RESUMEN

El presente proyecto, se encuentra dividido en dos apartados. De primera instancia, se realiza la simulación numérica de paneles tipo sándwich, diseñados a partir de micro-armaduras octaédricas de material ABS, con el fin de encontrar el núcleo más adecuado que formara la estructura. La segunda parte del proyecto, consta de la manufactura de bio-laminados utilizando fibra de yute mediante el proceso de infusión.

La simulación numérica se realiza con el fin de llevar a cabo la caracterización de los paneles tipo sándwich y poder estudiar su comportamiento mecánico dominado por tensión-compresión. Utilizando el método de elemento finito se concluyó que la armadura realizada con 4 celdas octaédricas con un ángulo de 60° , diámetro de 5mm y una altura 4mm presento un mejor comportamiento mecánico, mayor resistencia bajo tensión y una mejor rigidez.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	II
AUTORIZACIÓN PUBLICACIÓN EN FORMATO ELECTRÓNICO DE TESIS.....	III
RESUMEN.....	IV
JUSTIFICACIÓN	1
OBJETIVO.....	2
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
CAPÍTULO I. “ANTECEDENTES”	3
CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN.....	5
2.1 Micro armaduras y paneles tipo sándwich.	5
2.1.1 Características de los paneles tipo sándwich.	5
2.2 Materiales compuestos.	6
2.2.1 Clasificación de los materiales compuestos.....	6
2.2.2 Laminados compuestos.....	8
2.3 Fibras naturales.....	8
2.4 Proceso de manufactura por infusión.....	9
CAPITULO III. METODOLOGÍA.	10
3.1 Diseño CAD de estructuras 2D de un nivel.	10
3.1.1 Mallado.....	12
3.2 Diseño CAD de microarmaduras 3D.	14
3.2.1 Simulación de la celda unitaria.	16
3.3 Manufactura de laminado por el proceso de infusión.	17
3.3.1 Materiales.....	18
3.3.2 Procedimiento.	18
CAPITULO IV. RESULTADOS.	22
4.1 Bio-laminado por el proceso de infusión.	22

4.2	Estructura de un nivel.	23
4.2.1	Estructura $H=5\text{mm}$, $\phi=0.5\text{mm}$, $\theta=60^\circ$	23
4.3	Celda unitaria octaédrica.	29
4.3.1	Estructura $H=5\text{mm}$, $\phi=0.5\text{mm}$, $\theta=60^\circ$	30
4.3.2	Estructura $H2\text{mm}$, $\phi=0.5\text{mm}$, $\theta=60^\circ$	36

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. COMPONENTES DE UN PANEL TIPO SÁNDWICH.	6
FIGURA 2. MAPA CONCEPTUAL DE LA CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.	7
FIGURA 3. CONFIGURACIÓN DE FIBRAS BIDIRECCIONAL Y UNIDIRECCIONAL (“DESCRIPTION OF COMPOSITE STRUCTURES,” N.D.)	8
FIGURA 4. PROCESO DE INFUSIÓN. (“TECNOLOGÍA DE INFUSIÓN DE RESINA SHING SHENG FA BOAT BUILDING CO., LTD.,” N.D.) ...	10
FIGURA 5. PARÁMETROS DE LA GEOMETRÍA.	11
FIGURA 6. PUESTA A PUNTO DEL MALLADO UTILIZANDO EL <i>GLOBAL MESHING CONTROL</i> DE ANSYS.....	13
FIGURA 7. PARÁMETROS DE LAS CELDAS UNITARIAS.	15
FIGURA 8. TIPOS DE ESTRUCTURAS CONSTRUIDAS A PARTIR DE LA CELDA UNITARIA.....	16
FIGURA 9. APLICACIÓN DE RELÉASE FILM EN EL MOLDE.....	19
FIGURA 10. COLOCACIÓN DE LA FIBRA, ENTRADA DE RESINA Y VACÍO.	19
FIGURA 11. COLOCACIÓN DEL PEEL PLY Y GREEN MESH.	20
FIGURA 12. MOLDE TERMINADO.	21
FIGURA 13. PROCESO DE LA PREPARACIÓN DE LA RESINA. A) RECIPIENTE PARA LA PREPARACIÓN DE LA RESINA, B) RESINA VERTIDA (COLOR MORADA), C) VERTER ENDURECEDOR, D) MEZCLADO DE LA RESINA Y ENDURECEDOR Y E) RESINA FINAL.	21
FIGURA 14. PROCESO DE IMPREGNACIÓN DE RESINA.	21
FIGURA 15. A) LAMINADO CON POROSIDAD, B) LAMINADO SIN POROSIDAD.	22
FIGURA 16. ESPESOR DE LAMINADO FINAL.....	22
FIGURA 17. COMPARACIÓN DE LOS CONTORNOS DEL CRITERIO DE VON MISES PARA TRES NIVELES DE REFINAMIENTO DE MALLADO. EL TAMAÑO GLOBAL DEL ELEMENTO ES A) 0.05 MM, B) 0.075 MM Y C) 0.1 MM.	25
FIGURA 18. VISTA ISOMÉTRICA DE LA MALLA FINA DE 0.15MM.....	26
FIGURA 19. VISTA ISOMÉTRICA DE LA MALLA FINA DE 0.075MM.....	26
FIGURA 20. VISTA ISOMÉTRICA DE LA MALLA FINA DE 0.075MM.....	26
FIGURA 21. PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA.	27
FIGURA 22. GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LOS TRES MALLADOS UTILIZADOS EN COMPARACIÓN CON EL ABS.	28
FIGURA 23. VISTA ISOMÉTRICA DE LA MALLA FINA DE 0.15MM	30
FIGURA 24. VISTA INFERIOR Y SUPERIOR DE LA MALLA 0.15MM.	31
FIGURA 25. VISTA ISOMÉTRICA DE LA MALLA 0.075MM.....	31
FIGURA 26. VISTA INFERIOR Y SUPERIOR DE LA MALLA 0.075MM.	31
FIGURA 27. VISTA ISOMÉTRICA DE LA MALLA 0.05MM.....	32
FIGURA 28. VISTA INFERIOR Y SUPERIOR DE LA MALLA 0.05MM.	32
FIGURA 29. ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON-MISES EN CELDA UNITARIA OCTAÉDRICA CON UN ELEMENTO DE MALLA DE 0.15MM.	33
FIGURA 30. ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON-MISES EN CELDA UNITARIA OCTAÉDRICA CON UN ELEMENTO DE MALLA DE 0.075MM.	33
FIGURA 31. ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON-MISES EN CELDA UNITARIA OCTAÉDRICA CON UN ELEMENTO DE MALLA DE 0.05MM.	34
FIGURA 32. PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA.	35
FIGURA 33. GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN, MOSTRANDO LOS TRES TIPOS DE MALLADO EN LA ARMADURA UTILIZANDO LA CELDA UNITARIA OCTAÉDRICA CON ALTURA H=4MM.	35
FIGURA 34. VISTA ISOMÉTRICA DE LA MALLA FINA DE 0.15MM.....	36
FIGURA 35. VISTA INFERIOR Y SUPERIOR DE LA MALLA 0.15MM.	36
FIGURA 36. VISTA ISOMÉTRICA DE LA MALLA 0.075MM.....	37

FIGURA 37. VISTA INFERIOR Y SUPERIOR DE LA MALLA 0.075MM.	37
FIGURA 38. VISTA ISOMÉTRICA DE LA MALLA 0.05MM.	37
FIGURA 39. VISTA INFERIOR Y SUPERIOR DE LA MALLA 0.05MM.	38
FIGURA 40. ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON-MISES EN CELDA UNITARIA OCTAÉDRICA CON UN ELEMENTO DE MALLA DE 0.15MM.	38
FIGURA 41. ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON-MISES EN CELDA UNITARIA OCTAÉDRICA CON UN ELEMENTO DE MALLA DE 0.075MM.	39
FIGURA 42. ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON-MISES EN CELDA UNITARIA OCTAÉDRICA CON UN ELEMENTO DE MALLA DE 0.05MM.	39
FIGURA 43. PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA.	40
FIGURA 44. GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN, MOSTRANDO LOS TRES TIPOS DE MALLADO EN LA ARMADURA UTILIZANDO LA CELDA UNITARIA OCTAÉDRICA CON ALTURA H=2MM.....	41

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. PARÁMETROS DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA DE UN NIVEL.	11
TABLA 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL ABS.	12
TABLA 3. TAMAÑOS DE LA MALLA PARA ESTRUCTURA DE UN NIVEL.	13
TABLA 4. CONDICIONES DE FRONTERA Y CARGA EN ESTRUCTURA DE UN NIVEL.	14
TABLA 5. PARÁMETROS DE LA GEOMETRÍA DE LA CELDA UNITARIA.	15
TABLA 6. PARÁMETROS DE LA GEOMETRÍA DE LA CELDA UNITARIA.	15
TABLA 7. CONDICIONES DE FRONTERA Y TIPO CARGA DE LA CELDA UNITARIA.	16
TABLA 8. TAMAÑO DEL ELEMENTO DE LA MALLA DE LA ARMADURA.	25
TABLA 9. NIVELES DE ESFUERZO DE CADA UNA DE LAS ESTRUCTURAS SIMULADAS.	28
TABLA 10. PARÁMETROS DE LA GEOMETRÍA DE LA CELDA UNITARIA.	29
TABLA 11. TAMAÑO DEL ELEMENTO DE LA MALLA DE LA CELDA UNITARIA.	29
TABLA 12. NÚMERO DE ELEMENTOS Y NODOS DE CADA UNA DE LAS ESTRUCTURAS.	30
TABLA 13. ESFUERZO MÁXIMO Y DESPLAZAMIENTO DE CADA ARMADURA CON EL TIPO DE MALLADO.	35
TABLA 14. . ESFUERZO MÁXIMO Y DESPLAZAMIENTO DE CADA ARMADURA CON EL TIPO DE MALLADO.	41

JUSTIFICACIÓN

El uso de fibras naturales en materiales compuestos ha ido en aumento, debido a la disponibilidad, diversidad, el bajo costo en su fabricación y su baja densidad (De Poliéster, Quesada-Solís, Alvarado-Aguilar, Sibaja-Ballester, & Vega-Baudrit, n.d.). Se busca mejorar sus propiedades físicas y mecánicas como resistencia a la tensión, compresión, al impacto de los materiales compuestos al utilizar fibras como refuerzo.

Los biomateriales surgen de la necesidad de crear materiales con una buena resistencia, rigidez, respetuoso con el medio ambiente y con un bajo peso, son utilizados en la industria aeroespacial y automotriz por mencionar algunas, ya que, al reducir el peso de algunas partes móviles, se incrementa el desempeño y un ahorro de energía (“Materiales Compuestos,” n.d.). Por tal motivo existe la necesidad de desarrollar micro-armaduras tipo sándwich que cumplan las características antes mencionadas.

Todo lo anterior ha motivado el desarrollo de este proyecto, el cual se encuentra dividido en dos secciones. En la primera se realiza la simulación numérica para caracterizar los paneles tipo sándwich fabricados a partir de micro-armaduras con el fin de encontrar el núcleo más adecuado que conformará la estructura y en una segunda parte llevar a cabo la manufactura de bio-laminados utilizando fibra de yute mediante el proceso de infusión de resina.

OBJETIVO

1.1Objetivo general

Realizar simulación numérica para caracterizar paneles tipo sándwich fabricados a partir de micro-armaduras poliméricas con comportamiento mecánico dominado por tensión-compresión.

Manufacturar, mediante el proceso de infusión de resina, bio-laminados a partir de fibra de yute.

1.2Objetivos específicos

- Determinar las características geométricas de la micro-armadura.
- Realizar simulaciones en ANSYS 17.1 workbench.
- Manufactura de bio-laminados por el método de transferencia de resina asistido por vacío (infusión).
- Análisis de Resultados.

CAPÍTULO I. “ANTECEDENTES”

Los materiales celulares han llamado la atención debido a su alta multifuncionalidad, la cual se debe a la arquitectura abierta que pueden tener la celda unitaria. Existen diversos tipos de núcleos; pirámide, tetraédrico, octaédrica, panal(Lim & Kang, 2006). En los últimos años, una variedad de espumas metálicas y poliméricas han sido para una amplia gama de posibles aplicaciones, como los núcleos de paneles sándwich (Deshpande, Fleck, & Ashby, 2001).

Los sólidos celulares, cerámicas, polímeros, metales tienen propiedades que dependen tanto de la topología como del material. Las espumas de polímero son las más ampliamente investigadas, debido que son las primeras en ser desarrolladas (Gibson & Ashby, 1997).

Los recientes avances en la manufactura de este tipo de materiales han permitido la fabricación en escalas que van desde milímetros hasta decenas de centímetros en su longitud, junto con los avances en los métodos de fabricación de estos materiales, se están realizando esfuerzos para investigar sus propiedades mecánicas(Deshpande, Fleck, et al., 2001).

(Wallach & Gibson, 2001) estudiaron la resistencia y rigidez de una armadura de manera experimental y teórica por el método de elementos finitos, y descubrieron que sus propiedades se comparan con la de las espumas.

(Ashby, 2006) determinan que si se busca rigidez y resistencia a bajo peso, el núcleo de la estructura debe configurarse de tal forma que se evite la flexión, dejando el estiramiento del puntal como el modo dominante de deformación. Esto sugiere la posibilidad de una familia de materiales con microestructura.

(Wicks & Hutchinson, 2001) muestran que los paneles tipo sándwich con núcleo de armadura son excepcionalmente eficientes en cuanto al peso para transportar cargas de flexión y compresión, en comparación con otras alternativas como los paneles tipo sándwich con núcleo de panal.

(Deshpande & Fleck, 2001) Investigaron el mecanismo de colapso de paneles sándwich de núcleo armadura tetraédrica u octaédrica.

(Rathbun et al., 2004) han demostrado que el método de elementos finitos se puede utilizar para simular con éxito el comportamiento de colapso de paneles sándwich con núcleo de armadura.

(Sypeck & Wadley, 2002) propusieron que las armaduras tetraédricas podrían fabricarse a partir de metales comenzando con láminas de metal perforadas y doblándolas a lo largo de nodos diagonales. Esto conlleva a que el producto sea más robusto debido a la naturaleza del material y menos rentable. (Deshpande, Ashby, & Fleck, 2001; Hundley, Clough, & Jacobsen, 2015) motivados por los avances recientes en la tecnología de fabricación y los beneficios de eficiencia de los materiales de núcleo tipo sándwich en comparación con las arquitecturas distribuidas aleatoriamente, como las espumas metálicas y poliméricas, en los últimos años se desarrollaron materiales con mayor resistencia y rigidez a bajas densidades, de modo que cumplan con los requisitos estructurales, dichos materiales se emplean comúnmente en la industria del transporte por sus propiedades mecánicas.

Debido a las preocupaciones sobre el medio ambiente y los problemas de sostenibilidad, este siglo ha sido testigo de notables mejoras en materiales verdes en el campo de la ciencia de los polímeros a través del desarrollo de biocompuestos. Las fibras, como el lino, el cáñamo, el kenaf, el henequén, el plátano, la palma aceitera y el yute, por mencionar alguna, han atraído una atención considerable como sustitutos de las fibras sintéticas, como el vidrio, las fibras de carbono y aramida (Gurunathan, Mohanty, & Nayak, 2015).

Actualmente en el centro de ingeniería y desarrollo industrias (CIDESI), se desarrolla un proyecto de investigación de bio-laminados multifuncionales de matriz bio-termoestable y fibra natural, y preparados mediante técnicas de manufactura avanzadas (Adrián & Urquiza, 2015), el interés para el desarrollo de este proyecto, nace del proyecto de doctorado de Lourdes Martínez, en el cual se pretende ayudar en el desarrollo de materiales tipo sándwich fabricados a partir de bio-laminados.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN.

2.1 Micro armaduras y paneles tipo sándwich.

Las micro-armaduras están formadas por un número de elementos(vigas), que al ser unidos forman una celda unitaria, existen dos clasificaciones de las celdas unitarias, la primera está formada por prismas regulares, estos son el cuadrado, el triángulo y hexágono y la segunda se constituye de polígonos semi-regulares, por ejemplo, el tetraedro y octaedro. Las micro-armaduras pueden ser dominadas por flexión o por extensión-compresión. (Fleck, Deshpande, & Ashby, 2010)

Los paneles tipo sándwich se están empleando en la industria aeroespacial, automotriz, marina, por mencionar algunas, se busca crear materiales ligeros que sean adecuadamente rígidos y resistentes con un bajo peso, el tipo de núcleo que conforma el sándwich esta dictado por las necesidades estructurales del material, las estructuras de sándwich demuestran una excelente tolerancia al daño si el núcleo está diseñado adecuadamente. (Hundley et al., 2015)

Una estructura tipo sándwich consta de dos laminas delgadas con características de alta resistencia, denominadas pieles que cubren una placa gruesa de material ligero, llamada núcleo. Este tipo de estructuras permite obtener elevados valores de rigidez a flexión con un bajo peso.

2.1.1 Características de los paneles tipo sándwich.

Un material tipo sándwich está constituido por los siguientes componentes(Juan Maria Malavia Otero, n.d.):

- Piel, se define como los laminados que envuelven al núcleo, están fabricados de material compuesto.
- Núcleo, es el elemento que separa los laminados en una estructura sándwich, es un elemento de baja densidad.

- Adhesivo, se encarga de unir el núcleo con la piel, dependiendo del proceso de fabricación se define si será necesario implementar un adhesivo.

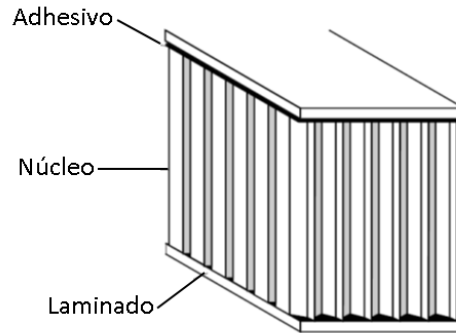


Figura 1. Componentes de un panel tipo sándwich.

2.2 Materiales compuestos.

Un material compuesto es una combinación de dos o más materiales que difieren en forma y composición química, su objetivo es encontrar materiales que mejoren las propiedades que presentan los materiales por si solos.

En el compuesto se pueden diferenciar dos partes, la matriz y el refuerzo. El refuerzo es la parte resistente del material compuesto y le proporciona resistencia y rigidez, es determinante para obtener las principales propiedades mecánicas del material, los refuerzos pueden ser fibras o partículas. La matriz es la responsable de las propiedades físicas y químicas, trasmite los esfuerzos al agente reforzante, protege al refuerzo del deterioro mecánico y químico, es la fase menos rígida que constituye los materiales compuestos.

2.2.1 Clasificación de los materiales compuestos.

Una categoría de materiales compuestos son los biocompuestos, son materiales en los que una o más fases pueden ser de origen biológico. Los refuerzos pueden ser fibras naturales como por ejemplo el lino, algodón, yute, henequén, cáñamo o fibras procedentes del reciclado de la madera o del papel o subproductos procedentes de cultivos agrícolas.

Los biocompuestos están siendo desarrollados debido al impacto ambiental que presentan los materiales compuestos elaborados de fibras sintéticas. Se busca sustituir sus elementos por materiales de fuentes renovables, reduciendo el deterioro ambiental y el costo económico. Este tipo de materiales se ha utilizado en diversas aplicaciones, como la industria aeronáutica, automotriz, aeroespacial, medicina, construcción por mencionar algunas, debido a las propiedades que presentan las fibras naturales, como lo son resistencia a la corrosión, bajo peso, rigidez, resistencia, baja densidad, es por ello que están siendo sustituidas por las fibras sintéticas (Gurunathan et al., 2015) .

Los materiales compuestos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de matriz y al tipo de refuerzo, como se muestra en la Figura 1.

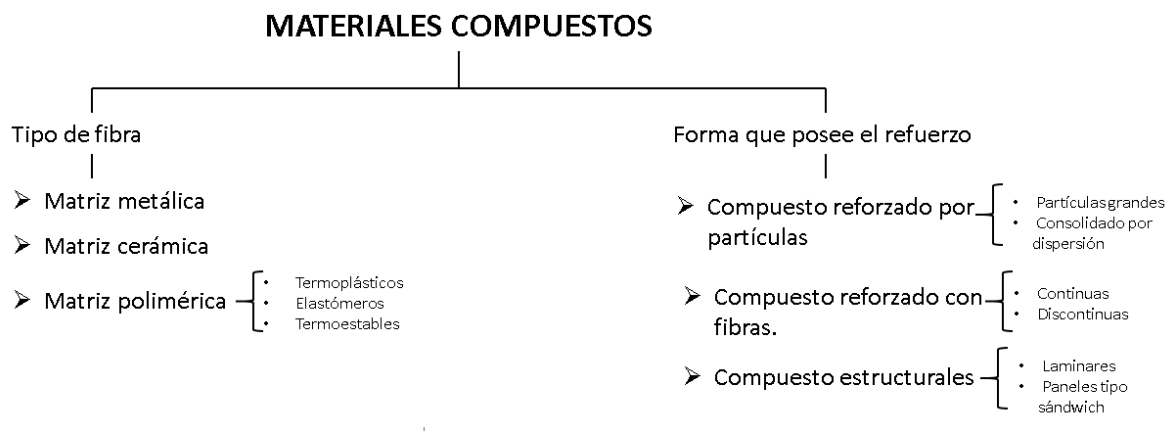


Figura 2. Mapa conceptual de la clasificación de los materiales compuestos.

Principales características de los materiales compuestos

- Baja densidad
- Alta resistencia
- Alta resistencia dieléctrica
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a la fatiga
- Facilidad de fabricación

- Excelentes propiedades mecánicas
- Reducción de costes de mantenimiento

2.2.2 Laminados compuestos.

Un laminado es un material conformada por láminas de fibras unidas por un adhesivo. Las orientaciones más utilizadas en los laminados son 0° , 90° , 45° , -45° , dependiendo el tipo de carga al cual reaccionara el lamido se elige su configuración, por ejemplo 0° para cargas axiales, ± 45 cargas cortantes y 90° cargas lateral. La rigidez y resistencia de un material compuesto depende de la secuencia y orientación de las capas. Otros factores que intervienen en las propiedades del laminado son el porcentaje de fibra, longitud de la fibra y configuración. Existen diversos tipos de configuraciones de lamido los más utilizados son (“Description of Composite Structures,” n.d.):

- Unidireccional: Las fibras se encuentran orientas en una única dirección.
- Bidireccional: Las fibras se encuentran orientadas en dos direcciones, con un ángulo de 90° de separación.
-

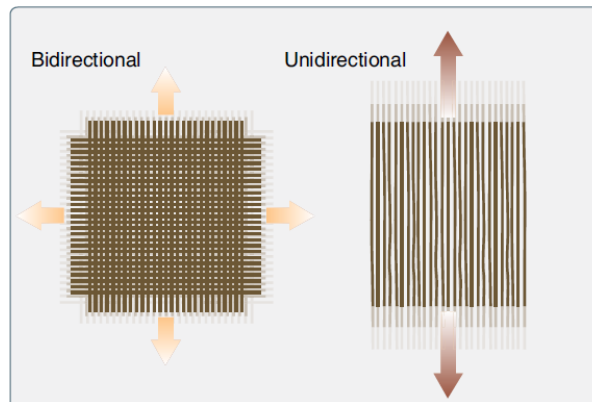


Figura 3. Configuración de Fibras bidireccional y unidireccional (“Description of Composite Structures,” n.d.)

2.3 Fibras naturales

Las fibras son estructuras unidimensionales, largas y delgadas. Su propósito principal es la creación de tejidos. Las fibras naturales son aquellas fibras que como tales se encuentran en estado natural y que no exigen más que una ligera adecuación para ser hiladas y utilizadas como materia textil. Pueden dividirse según el medio del cual provienen, medio animal, vegetal y mineral. Tienen una ventaja sobre las fibras de vidrio y carbono, ya que son de bajo costo, más ligeras, su producción tiene menor impacto ambiental.

2.4 Proceso de manufactura por infusión.

La infusión de resina es un proceso para fabricar polímeros reforzados con fibras, en el cual en un molde cerrado se coloca la fibra orientada de acuerdo a las características que se requieren obtener en el laminado, por una diferencia de presión la resina es succionada hacia el interior del molde y fluye sobre el laminado de fibra seca hasta impregnarlo, Figura 3.

El proceso de infusión ofrece ventajas sobre procesos como la impregnación de resina, por ejemplo:

- Una mejor relación fibra a resina.
- Un laminado más resistente.
- Se reduce la exposición del operador a emisiones perjudiciales.
-

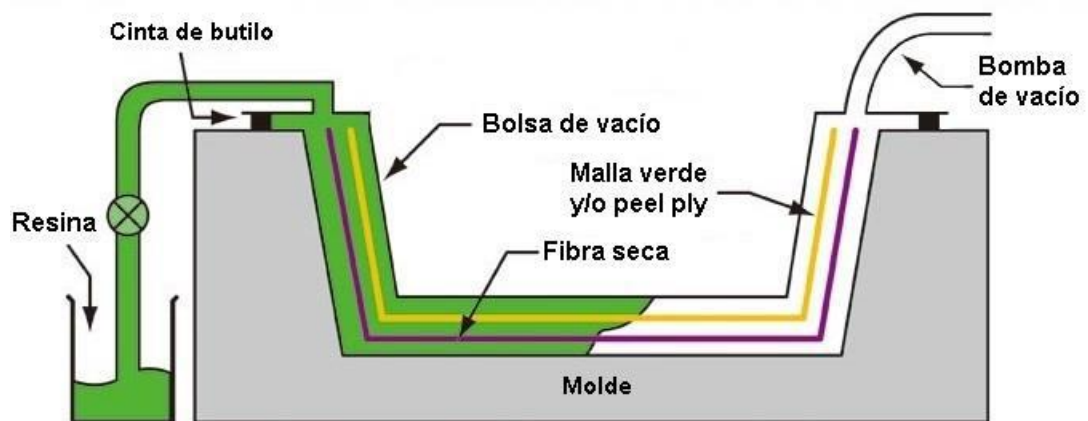


Figura 4. Proceso de infusión. (“Tecnología de infusión de resina | Shing Sheng Fa Boat Building Co., Ltd.,” n.d.)

CAPITULO III. METODOLOGÍA.

Este capítulo describe la metodología para la realización de este proyecto. En primera instancia, se describe el diseño CAD y los modelos de elemento finito de cada una de las estructuras consideradas para el núcleo del panel tipo sándwich. La descripción de los modelos de elemento finito incluye el tipo de material utilizado y propiedades mecánicas, las condiciones de frontera a las que están sujetas las estructuras y el tipo de malla utilizada. Posteriormente, se describe la metodología seguida para fabricar materiales compuestos a base de bio-resina reforzada con fibras naturales.

3.1 Diseño CAD de estructuras 2D de un nivel.

Se realizó el diseño CAD, utilizando SolidWorks, de una familia de micro-armaduras que formaran la celda unitaria octaédrica, caracterizada por los parámetros altura (H), diámetro de las barras (ϕ) y el ángulo de inclinación, theta, (θ) tal como se muestra en la Figura 5. La Tabla 1 muestra los rangos y combinaciones de estos parámetros utilizados en el presente estudio.

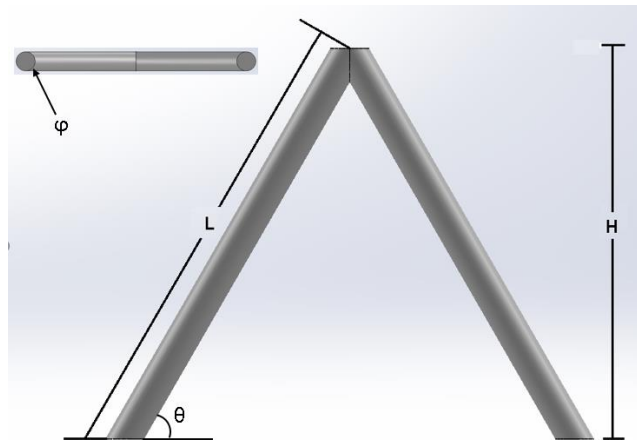


Figura 5. Parámetros de la geometría.

La geometría de cada configuración se guardó en formato parasolid (extensión .x_t).

Tabla 1. Parámetros de la geometría de la estructura de un nivel.

H(mm)	L(mm)	Φ(mm)	θ
5	5.77	0.5	60°
5	7.78	0.5	40°
5	5.77	0.25	60°
5	7.78	0.25	40°
5	5.77	0.1	60°
5	7.78	0.1	40°
1.73	2	0.5	60°
1.29	2	0.5	40°
1.29	2	0.25	40°
1.73	2	0.25	60°
1.73	2	0.1	60°
1.29	2	0.1	40°

Con base en los resultados de reportados por otros grupos de investigación (Hammetter, Rinaldi, & Zok, 2013; Schaedler et al., 2011) se logra partir de un rango de valores de longitud (L) de 2 mm, diámetro (ϕ) de 0.1-0.5 mm, y un ángulo de inclinación (Theta) de 40°-60° ,para determinar los parámetros de la geometría.

Se construyeron modelos de elementos finitos (FEM por sus siglas en ingles) en el software ANSYS Workbench 17.1 a partir de los modelos CAD en formato parasolid de las micro-

armaduras listadas en la Tabla 1. Posteriormente, el análisis del comportamiento mecánico de las micro-armaduras se realizó utilizando el módulo Static Structural.

Las simulaciones consideran que la respuesta mecánica del material está dada por un material elástico isótropo. En particular, una resina ABS (Ensiger S.A) con las propiedades listadas en la Tabla 2. La selección de ABS para representar la respuesta elástica de las micro armaduras obedece a que ésta resina se utiliza como materia prima en algunas impresoras 3D.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del material ABS.

Propiedad	Valor
Densidad	1.04 gr/cm ³
Módulo de Young	2000 Mpa
Coefficiente de Poisson	0.4
Limite elástico	32Mpa

3.1.1 Mallado

Se realizó un análisis de sensibilidad de la solución de elemento finito al grado de refinamiento del mallado. Se utilizó una estrategia global de mallado, con un tamaño de elemento definido por la siguiente expresión:

$$\Delta = \pi \frac{\phi}{N}$$

Ecuación 1. Tamaño del elemento.

Donde Δ es el tamaño del elemento, ϕ es el diámetro de las barras, N el número de elementos en el perímetro de la sección transversal de las barras. Para un diámetro fijo de 0.5 mm y N = 10, el tamaño de elemento es $\Delta = 0.15$ mm. Este tamaño de elemento se tomó como punto de partida para el estudio de sensibilidad a la malla. La Tabla 3 muestra los diferentes tamaños de elemento para $\phi = 0.5$ mm y varios valores de N.

Tabla 3. Tamaños de la malla para estructura de un nivel.

Tamaño	N
0.15mm	12
0.075mm	24
0.05mm	32

Para crear el mallado se utilizó la opción *Global Meshing Control, Sizing Section* (Figura 6). En el apartado de Element Size se introduce el tamaño del elemento correspondiente al grado de refinamiento (N) seleccionado (Tabla 3).

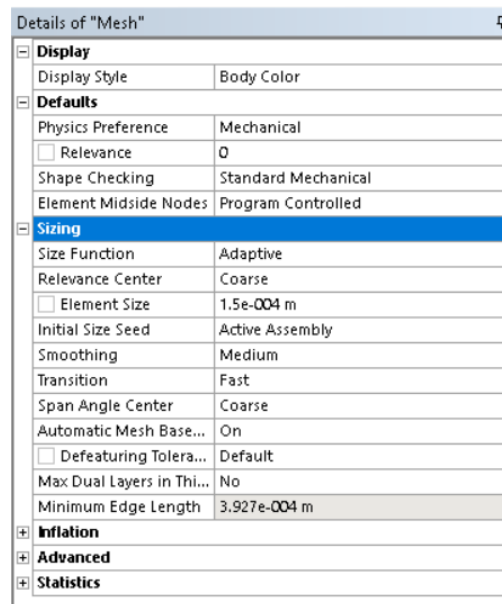
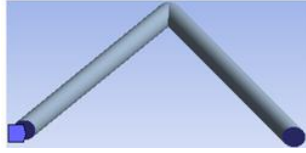
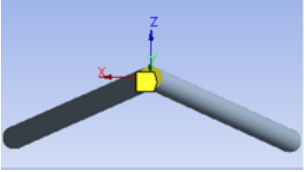
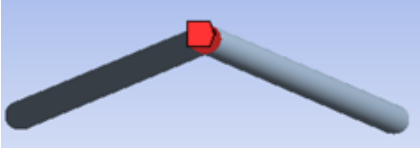


Figura 6. Puesta a punto del mallado utilizando el *Global Meshing Control* de ANSYS.

La estructura se sometió a dos condiciones de carga diferentes, control de carga y control de desplazamiento. El control de carga considera que la estructura se desplazara en los tres ejes, implementando condiciones de presión. Por otra parte, el control de desplazamientos consiste en controlar el desplazamiento de los ejes de la estructura, restringiendo su desplazamiento en dos de sus ejes. La Tabla 4 describe las condiciones de frontera impuestas a las micro-armaduras en cada escenario de carga.

Tabla 4. Condiciones de frontera y carga en estructura de un nivel.

Condiciones de frontera y tipo de carga	
Condición de frontera fija: Se aplicó a las caras de la parte inferior de estructura	
Condición de frontera con desplazamiento: Se aplicaron las restricciones en la cara de la parte superior de la estructura, en la cual se restringe el movimiento en los ejes x & z. Por otra parte, la cara superior es libre de desplazarse a lo largo del eje y.	
Carga: se aplicó una presión en la cara de la parte superior de estructura, la cual actúa en la dirección negativa del eje y.	

Los resultados de las simulaciones se pueden discutirán en la sección 4.2.

3.2Diseño CAD de microarmaduras 3D.

El diseño de la celda unitaria se realizará en base a los resultados obtenidos de la simulación del comportamiento elástico de la estructura 2D de un nivel. Se analizarán los resultados y seleccionaran los parámetros que hacen que el comportamiento de la estructura esté dominado por extensión y compresión de las barras.

Tomando en cuenta la literatura estudiada(Deshpande, Fleck, et al., 2001; Hundley et al., 2015)se diseñaron dos tipos de estructuras con base a la celda unitaria octaédrica mostrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Los valores de los parámetros de l a celda octaédrica utilizados para construir las estructuras 3D se muestran en la Tabla 5 . Las estructuras conformadas por este tipo de celda octaédrica tienen una mayor resistencia y

rigidez a densidades bajas en comparación a las espumas estocásticas (Bernal Ostos et al., 2012).

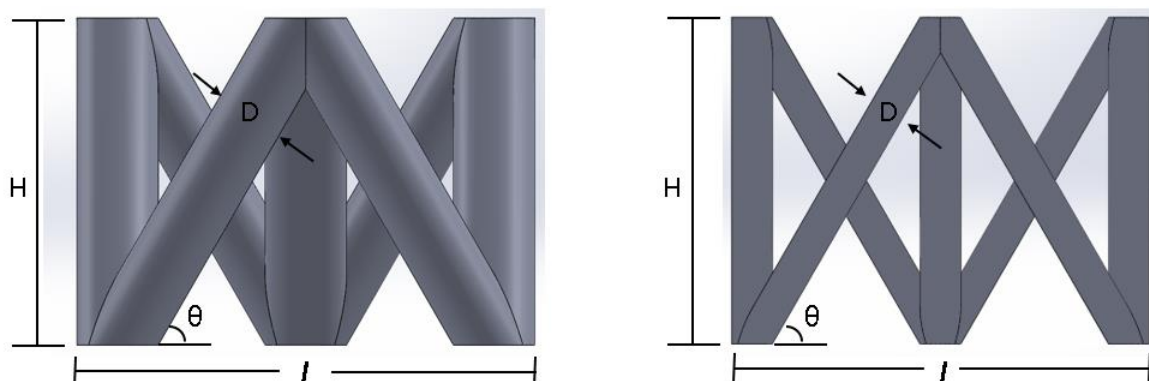


Figura 7. Parámetros de las celdas unitarias.

Tabla 5. Parámetros de la geometría de la celda unitaria

$H_{total}(mm)$	$H(mm)$	$L(mm)$	Número barras	$\Phi(mm)$	θ
8	4	5.12	24	0.5	60°
8	2	2.81	48	0.5	60°

Las estructuras 3D se construyeron uniendo dos celdas octaédricas con una altura ($H=4mm$) y cuatro celdas octaédricas con altura ($H=2mm$), respectivamente, como se puede observar en la Figura 8. Este acomodo se realizó manteniendo una altura ($H_{total}=8mm$) pero variando el número de barras que conforman la estructura 3D, se puede observar el número de barras para cada estructura en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de la geometría de la celda unitaria

$H_{total}(mm)$	$H(mm)$	$\Phi(mm)$	θ
8	4	0.5	60°

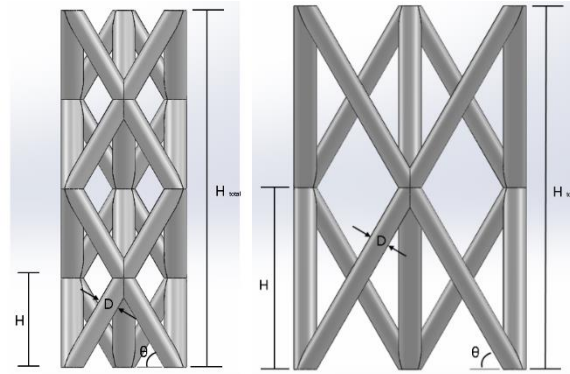


Figura 8. Tipos de estructuras construidas a partir de la celda unitaria.

3.2.1 Simulación de la celda unitaria.

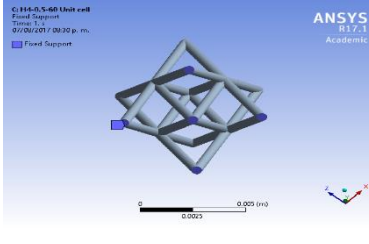
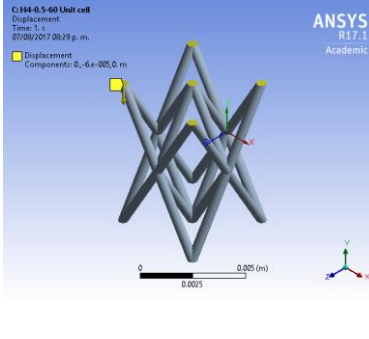
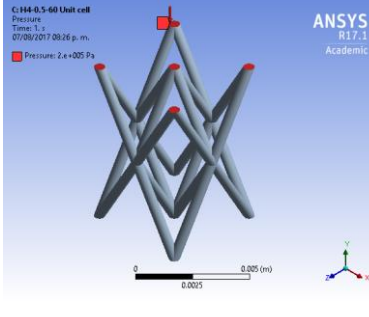
La simulación que se realizará para la celda unitaria es igual a las secciones 3.2 es por ello que no serán escritas nuevamente ya que fueron mencionados anteriormente.

En la celda unitaria se realizarán dos tipos de mallado. La primera malla que se implementará será una malla uniforme en toda la estructura. Se identificarán las regiones en donde se generaba la mayor concentración de esfuerzos se realizará un refinamiento. El tamaño de los elementos se determinará utilizando la Ecuación 1.

Las condiciones de frontera que se implementaron a la celda unitaria, son condiciones fijas en las caras inferiores, y en las caras superiores se controló el desplazamiento en los ejes. La Tabla 7 muestra el tipo de restricción y en que pate de la celda fue aplicado.

Tabla 7. Condiciones de frontera y tipo carga de la celda unitaria.

Condiciones de frontera y tipo de carga	

<p>Condición de frontera fija: Se aplicó a las caras de la parte inferior de la celda unitaria. Restringiendo el movimiento de las caras en los tres ejes.</p>	 <p>C:\144-0.5-60 Unit cell Fixed Support Time: 2.1 07/09/2017 09:30 p. m.</p>
<p>Condición de frontera con desplazamiento: Se aplicaron las restricciones en las caras de la parte superior de la estructura, en la cual se restringe el movimiento en los ejes x & z. Por otra parte, la cara superior es libre de desplazarse a lo largo del eje y.</p>	 <p>C:\144-0.5-60 Unit cell Displacement Time: 1.3 07/09/2017 09:29 p. m.</p>
<p>Carga: se aplicó una presión en las caras de la parte superior de estructura, la cual actúa en la dirección negativa del eje y.</p>	 <p>C:\144-0.5-60 Unit cell Pressure Time: 1.5 07/09/2017 09:28 p. m.</p>

3.3 Manufactura de laminado por el proceso de infusión.

El proceso de infusión consiste en la impregnación de fibras mediante el flujo de algún tipo de resina. El flujo de resina es producido con la ayuda de una bomba de vacío. Esta sección describe la manufactura del material bio-laminado mediante el proceso de infusión de resina. Los constituyentes del bio-laminado son una resina bio-termoestable con 44% biomasa (Sicomín Epoxy Systems, France) y láminas de fibra de yute. La fibra de yute tiene una configuración de tejido tafetán, en el cual las fibras están orientadas en dos direcciones, 0° y 90°, respectivamente. El laminado está conformado por 3 láminas de yute, cada lámina tiene dimensiones de 30×30 cm y 2.5 mm. El espesor es determinado por la cantidad de láminas utilizadas.

3.3.1 Materiales.

- Molde de aluminio.
- Láminas de fibras de yute
- Cinta de butilo.
- Cera desmoldeante o Release film.
- Peel ply.
- Green mesh.
- Bolsa de vacío.
- Manguera de nivel.
- Manguera en espiral de ½ pulgada.
- Boquillas tipo T.
- Bomba de vacío.
- Toma de vacío de ½ pulgada.
- Pinzas de presión.
- Cinta doble cara.

3.3.2 Procedimiento.

Se procede a realizar la preparación de molde, el cual tiene dimensiones de 100cmx50cm. Se utiliza acetona y una espátula de plástico para remover residuos e impurezas de la cavidad y superficies de ajuste del molde. Posteriormente, encerar el molde con 4 capas de cera desmolde ante como se describe en seguida. Aplicar la primera capa en un solo sentido. Esperar 5 minutos a que seque la cera y aplicar la segunda capa en sentido contrario a la primera. Seguir el mismo procedimiento para aplicar las capas restantes.

Se puede utilizar reléase film en lugar de cera desmolde ante. En este caso, cortar dos hojas de reléase film al mismo tamaño que la cavidad del molde. Posteriormente, adherir el reléase film al molde utilizando cinta doble cara (cinta color amarillo), Figura 9.

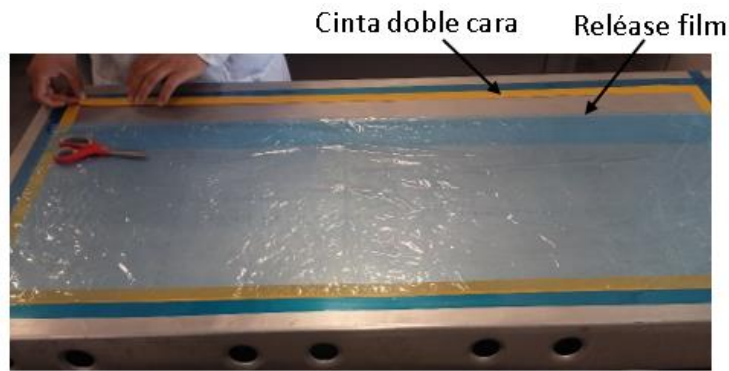


Figura 9. Aplicación de reléase film en el molde.

Colocar la cinta de butilo en las superficies de ensamble del molde para evitar fugas de vacío. Colocar 3 capas de fibra de yute orientadas en la misma dirección. Posicionar la toma de vacío y la boquilla con la manguera en forma de espiral en el lugar como se muestra en la Figura 10.

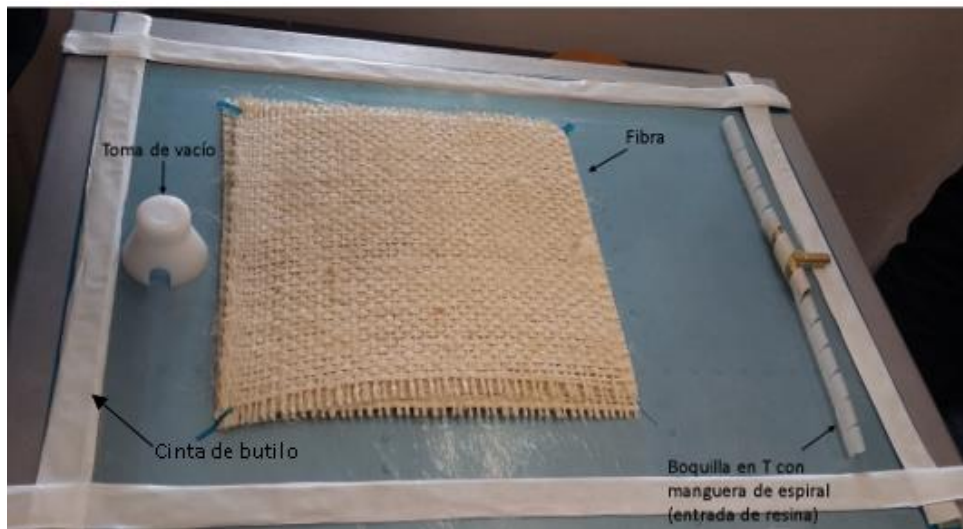


Figura 10. Colocación de la fibra, entrada de resina y vacío.

Cortar el peel ply y colocar sobre el molde. A lo largo el peel ply abarca desde la toma de vacío hasta la boquilla en T con la manguera en espiral. A lo ancho se corta del tamaño de la fibra, esta es utilizada para que no se pegue el laminado. El Green mesh es cortado más pequeño que el tamaño de la fibra y colocado sobre el peel ply. El corte al Green mesh se realiza para poder tener una mejor distribución e impregnación de la resina. Colocar la

manguera de nivel en la boquilla tipo T. Esta manguera permite ingresar la resina al molde, ver Figura 11

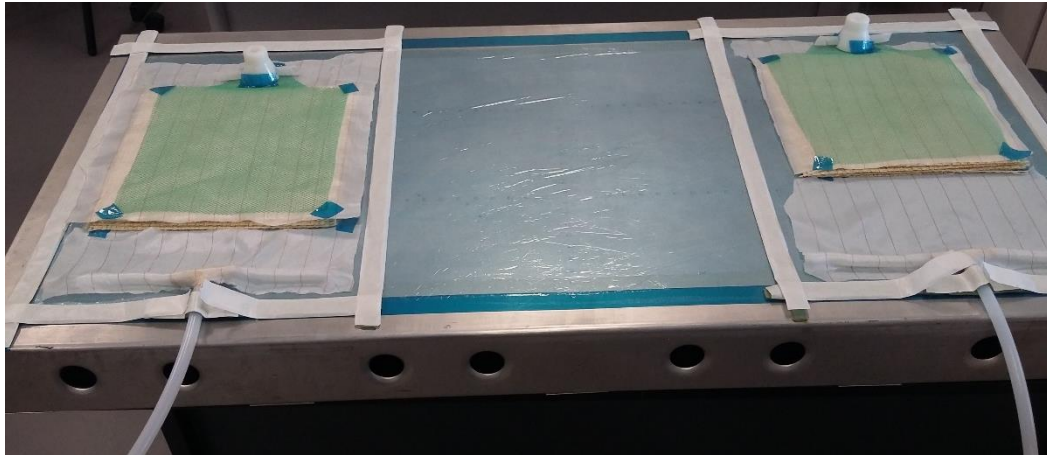


Figura 11. Colocación del peel ply y Green mesh.

Encapsulado del molde. Pegar la bolsa de vacío con la cinta de butilo alrededor del molde cuidando dejar holgura en la bolsa. Esta holgura permite pinzar alrededor del molde como se muestra en la Figura 12(en círculos rojos se puede observar las pinzas realizadas). Y así tener área de trabajo al momento de realizar el vacío, el área de trabajo consta de la bolsa de vacío que se deja de sobra, y al momento de crear el vacío tener la bolsa necesaria para cubrir el molde total sin pérdidas de aire. Verificar que las pinzas estén cerradas de manera correcta antes de producir el vacío. Las pinzas son las zonas de mayor riesgo de pérdida de vacío.



Figura 12. Molde terminado.

Una vez que se tiene creado el molde se procede a preparar la cantidad de resina requerida para el tamaño de laminado a realizar. Se utilizó un recipiente de plástico de 1 litro, en el cual se mezcló 240gr de resina EVO 44% Biomasa, agregando 30% de endurecedor equivalente a 72gr.

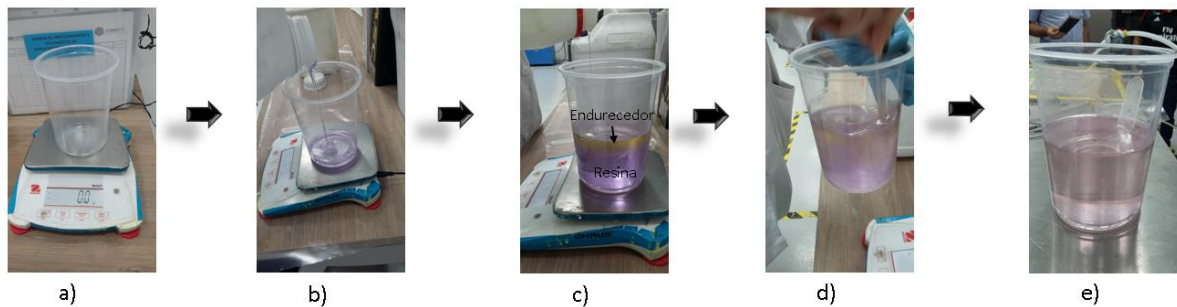


Figura 13. Proceso de la preparación de la resina. a) recipiente para la preparación de la resina, b) resina vertida (color morada), c) verter endurecedor, d) Mezclado de la resina y endurecedor y e) resina final.

Ingresar la resina en estado líquida por medio de una manguera, se puede observar en la Figura 14 el proceso de impregnación de resina . Una vez que la resina cubrió por completo el laminado se mantiene una presión de -22 inhg hasta que la resina se solidifica completamente (esto lo podemos observar en la resina sobrante de nuestro recipiente), esto indica que el laminado llegó a su etapa de curado. Posteriormente, retirar el peel ply del molde con la ayuda de una espátula y cuidando para no romper o dañar el laminado final.

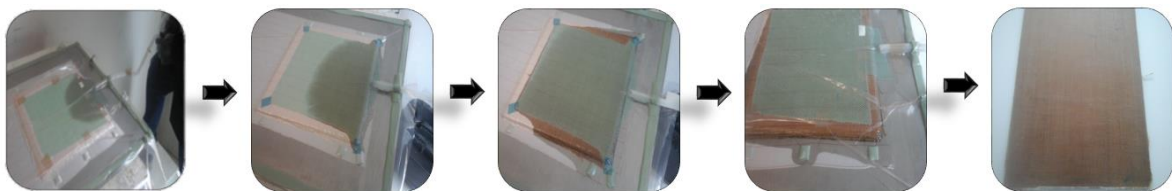


Figura 14. Proceso de impregnación de resina.

CAPITULO IV. RESULTADOS.

4.1 Bio-laminado por el proceso de infusión.

Se realizaron más de tres laminados, debido a que se presentaba entrada de aire y esto daba como resultado laminados porosos inadecuados para realizar pruebas mecánicas.

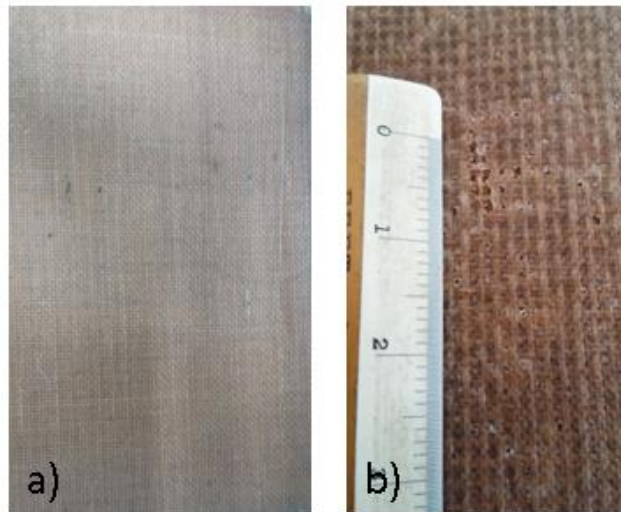


Figura 15. a) Laminado con porosidad, b) Laminado sin porosidad.



Figura 16. Espesor de laminado final.

En la Figura 15, se muestran ~~dos tipos de laminados, en la figura a) se muestra un~~ laminado con porosidad ~~, el cual no puede ser utilizado para realizar pruebas mecánicas y en la figura b) se observa un laminado y~~ sin porosidad, ~~útil para la realización de pruebas mecánicas requeridas,~~ y en la Figura 16 se puede observar la toma del espesor del bio-laminado mediante un vernier.

La masa final del laminado manufacturado es de 169.6g, teniendo este valor se realizó el cálculo para obtener su densidad, el cual se obtuvo de la Ecuación 2.

$$\rho = m/v$$

Ecuación 2. Ecuación de la densidad del bio-laminado.

Donde m es la masa del bio-laminado y v el volumen, cual se obtiene $v=l^2 * h$.

$$\rho = \frac{169.6 \text{ g}}{(30\text{cm})^2(0.25\text{cm})} = 0.753\text{g/cm}^3$$

Ecuación 3. Calculo de la densidad del bio-laminado.

De los bio-laminados obtenidos sin porosidad se realizarán probetas, las cuales se someterán a ensayos mecánicos para determinar las propiedades del material, cabe señalar que la realización de estos ensayos no se encuentra dentro de los alcances de este proyecto.

4.2 Estructura de un nivel.

Este apartado muestra las gráficas y simulaciones del comportamiento de cada una de las estructuras analizadas, serán mostradas de manera independiente de acuerdo al tipo de parámetros utilizados.

Las estructuras de un nivel fueron diseñadas con los parámetros mostrados en la Tabla 1. A continuación se mostrarán los resultados de manera independiente y la comparación entre ellos.

4.2.1 Estructura H=5mm, $\phi=0.5\text{mm}$, $\theta=60^\circ$

Este tipo de estructura cuenta con una altura de 5mm, un diámetro de 0.5mm, un ángulo de 60° . Para la simulación del comportamiento mecánico de esta estructura se sometió a diferentes niveles de presión. En particular, estas simulaciones se utilizaron para determinar el nivel máximo de presión que soporta la estructura antes de sobrepasar el límite elástico del ABS. Así mismo, la observación de la distribución de esfuerzos y deformaciones unitarias en las barras nos permitirá determinar si el comportamiento mecánico de la estructura está dominado por flexión o tensión/compresión. La Figura 17 a continuación muestra los

contornos del criterio de von Mises para tres niveles de refinamiento de malla. El tamaño del elemento para cada uno de los niveles de refinamiento se calculó utilizando Ecuación 1. El criterio de von Mises se utiliza para identificar el nivel de esfuerzos en el cual un metal dúctil alcanza su límite elástico. Por supuesto que los mecanismos que gobiernan la elasticidad de un metal son diferentes aquellos que gobiernan a los polímeros. Utilizamos el criterio de von Mises para identificar el nivel de presión al cual el ABS alcanza su límite

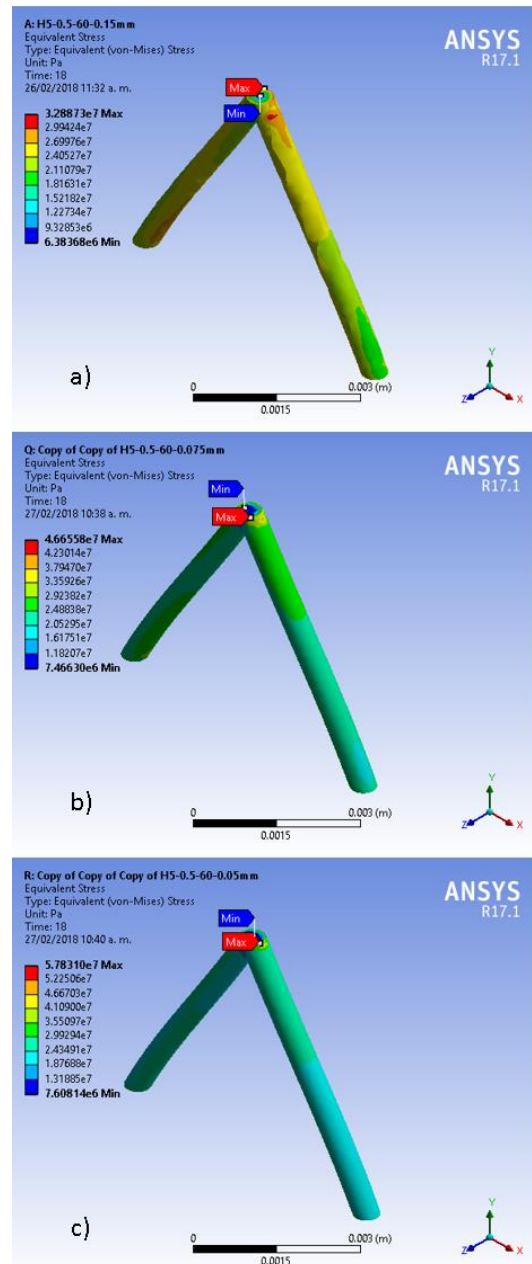


Figura 17. Comparación de los contornos del criterio de von Mises para tres niveles de refinamiento de mallado. El tamaño global del elemento es a) 0.05 mm, b) 0.075 mm y c) 0.1 mm.

Se puede observar que, al aplicar el mismo nivel de desplazamiento a las tres estructuras, cada una alcanza el límite elástico en condiciones de esfuerzo diferentes, esto debido al refinamiento de la malla.

Se realizó un análisis de la sensibilidad de la malla en el software ANSYS 17.1 workbench módulo static structural. Este análisis consideró 3 mallas denominadas gruesa, media y fina. Los tamaños de los elementos de malla utilizados en la armadura son mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Tamaño del elemento de la malla de la armadura..

Tamaño	Tipo
0.15mm	Gruesa
0.075mm	Media
0.05mm	Fina

En las Figura 18 Figura 19 Figura 20 se muestra una vista isométrica de cada una de las estructuras analizadas con los elementos de malla mostrados en la Tabla anterior. Se realiza un análisis lineal el cual se restringe a las limitaciones de la licencia de ANSYS 17.1 la cual resuelve 250 000 nodos/elementos.

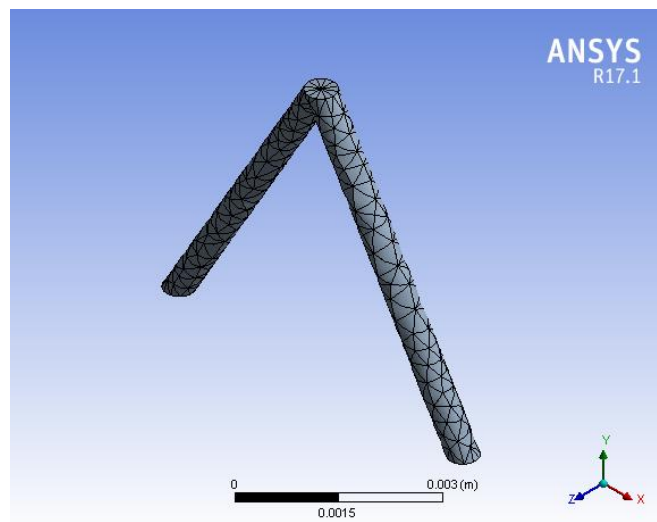


Figura 18. Vista isométrica de la malla fina de 0.15mm.

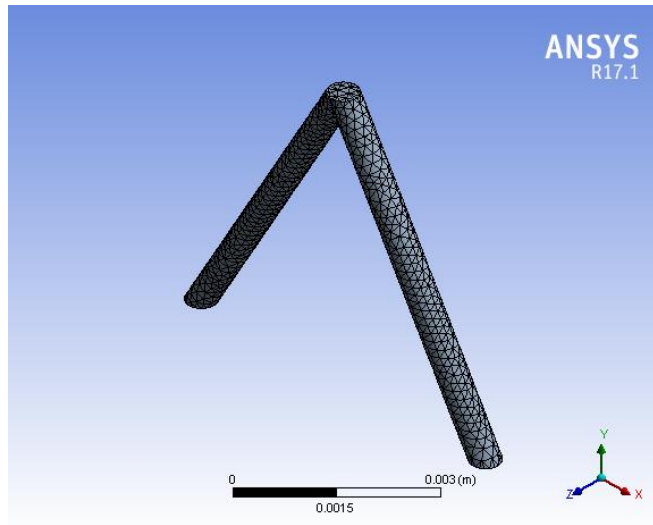


Figura 19. Vista isométrica de la malla fina de 0.075mm.

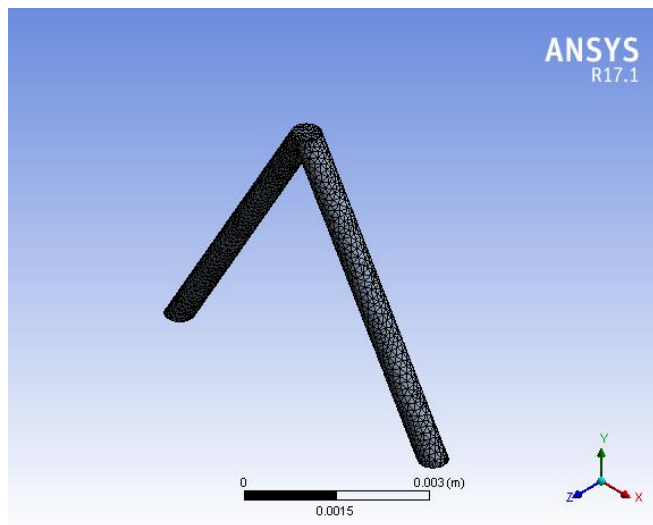


Figura 20. Vista isométrica de la malla fina de 0.075mm.

La gráfica esfuerzo-deformación, se realizó con base a los resultados obtenidos de nuestra simulación, se procede a calcular el esfuerzo y deformación tomando en consideración la Ecuación 4 y Ecuación 5.

$$\sigma = F/A$$

Ecuación 4. Fórmula para el valor del esfuerzo.

Donde σ (sigma) es el esfuerzo máximo que la estructura resistirá antes de alcanzar el límite elástico (expresado en Pa), F es la fuerza adquirida de ANSYS(N) y A el área(m²), se considera b*h (b igual .00625m y h igual a 0.0005m) tomando en cuenta las dimensiones de la celda unitaria, como se muestra en la Figura 21.

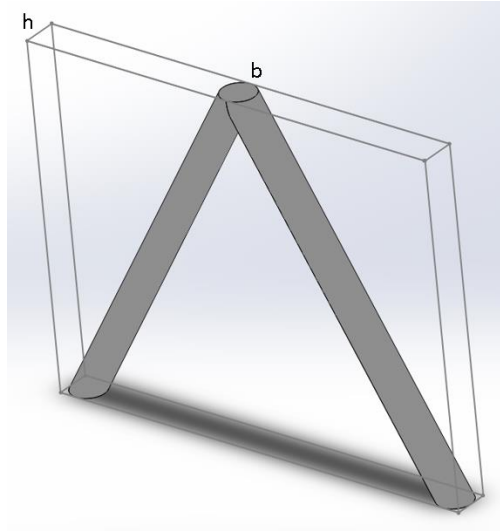


Figura 21. Parámetros para el cálculo del área.

$$\varepsilon = \delta/L$$

Ecuación 5. Formula de la deformación.

Donde ε (épsilon) es la deformación unitaria, δ (delta) es la deformación total y L es la altura inicial de la estructura, que es igual a 5mm. En la Figura 22, se muestra la gráfica esfuerzo-deformación, elaborada con los datos arrojados al utilizar las ecuaciones antes mencionadas.

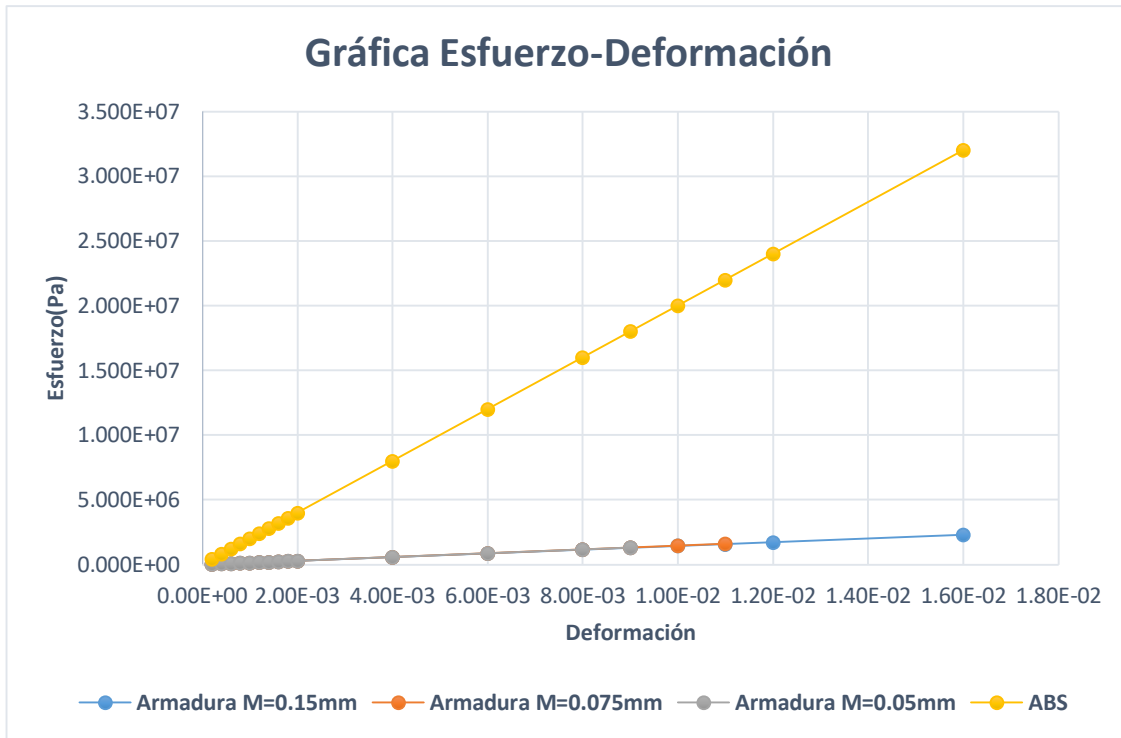


Figura 22. Grafica esfuerzo-deformación de los tres mallados utilizados en comparación con el ABS. La recta en color azul, representa la armadura con un tamaño de elemento de malla de 0.15mm, la recta en color naranja la armadura con un tamaño de elemento de malla de 0.075mm, la recta en color gris la armadura con un tamaño de elemento de malla de 0.05mm, la rigidez en las tres estructuras es igual, se puede notar que el mallado no crea diferencia para determinar la rigidez de la estructura, el módulo de elasticidad de la estructura es de 100Mpa, este se obtiene a partir de la pendiente de la recta .

Tabla 9. Niveles de esfuerzo de cada una de las estructuras simuladas.

Tamaño de elemento de malla (m)	Esfuerzo (Pa)
1.5e-4	2.30e7
7.5e-5	1.60e7
5e-5	1.30e7

Se observa en la Tabla 9, en la columna denominada esfuerzo, el esfuerzo en el cual la estructura alcanza el límite elástico del ABS, con cada una de las mallas utilizadas. La armadura con un tamaño de elemento de malla de 0.05mm tiende a soportar un esfuerzo menor, al tener un mallado más fino se tiene mayor precisión en los resultados.

4.3 Celda unitaria octaédrica.

En base a los resultados obtenidos en el análisis de las estructuras de un nivel, se llegó a la conclusión de utilizar un diámetro(ϕ)=0.5mm y un ángulo(θ)=60° por las razones expuestas en las secciones anteriores. Se realizaron dos tipos de celda unitaria, cambiando la altura de la celda octaédrica, en la sección 3.3 se presentan los valores de la geometría de cada celda. Se realizaron dos tipos de análisis en las estructuras, aplicando control de presión y desplazamientos.

Se condujo un análisis de la sensibilidad de la solución MEF en el software ANSYS 17.1 workbench módulo static structural, se realiza un análisis lineal el cual se restringe a las limitaciones de la licencia la cual resuelve 250 000 nodos/elementos.

Posteriormente se analizarán dos tipos de estructuras 3D con los parámetros mostrados en la Tabla 10 y considerando 3 mallas denominadas gruesa, media y fina, con el tamaño el tamaño de elementos de cada una es mostrado en la Tabla 11.

Tabla 10. Parámetros de la geometría de la celda unitaria.

<i>H</i>	<i>(mm)</i>	<i>H(mm)</i>	<i>Φ(mm)</i>	<i>θ</i>
8		4	0.5	60°
8		2	0.5	60°

Tabla 11. Tamaño del elemento de la malla de la celda unitaria.

<i>Tamaño</i>	<i>Tipo</i>
0.15mm	Gruesa
0.075mm	Media
0.05mm	Fina

Los tres tipos de malla se tomaron en consideración respetando el número de elementos y nodos que resuelve la licencia de ANSYS con la que se cuenta CIDESI.

Tabla 12. Número de elementos y nodos de cada una de las estructuras.

<i>Estructura</i>	<i>H(mm)</i>	ϑ	$\phi(mm)$	<i>Malla(mm)</i>	<i>Núm. de Nodos</i>	<i>Núm. de Elementos</i>
H=4mm- $\phi=0.5mm-\theta=60^\circ$	4	60°	0.5	0.05	126252	69323
	4	60°	0.5	0.075	114470	62270
	4	60°	0.5	0.15	19555	9504
H=2mm- $\phi=0.5mm-\theta=60^\circ$	2	60°	0.5	0.05	133491	74960
	2	60°	0.5	0.075	86076	47331
	2	60°	0.5	0.15	20756	10523

4.3.1 Estructura H=5mm, $\phi=0.5mm$, $\theta=60^\circ$

La estructura cuenta con una altura H total a 8mm, está conformada por dos celdas unitarias octaédricas de 4mm de altura cada una, la estructura fue simulada con tres tipos de malla, el tamaño de los elementos que conforman el mallado son descritos en la Tabla 11.

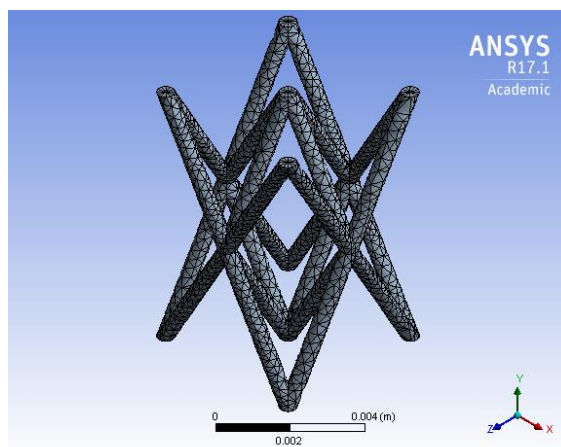


Figura 23. Vista isométrica de la malla fina de 0.15mm

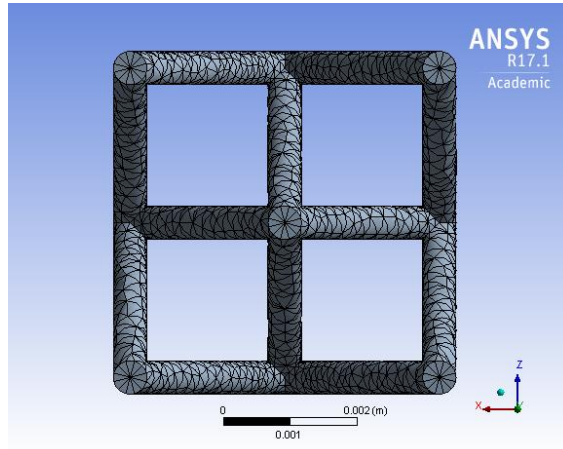


Figura 24. Vista inferior y superior de la malla 0.15mm.

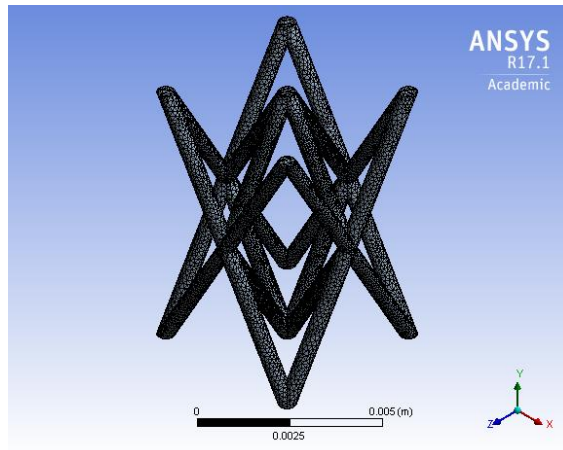


Figura 25. Vista isométrica de la malla 0.075mm

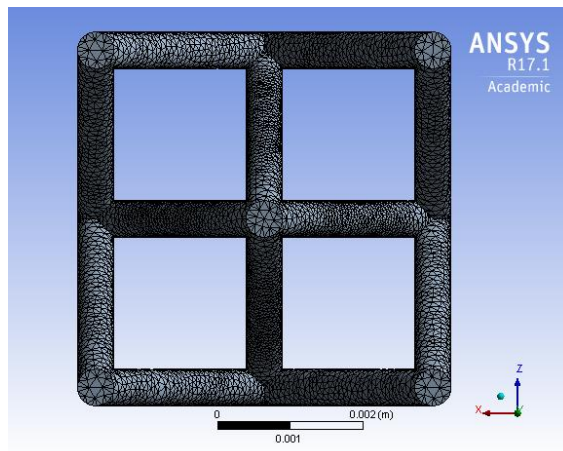


Figura 26. Vista inferior y superior de la malla 0.075mm.

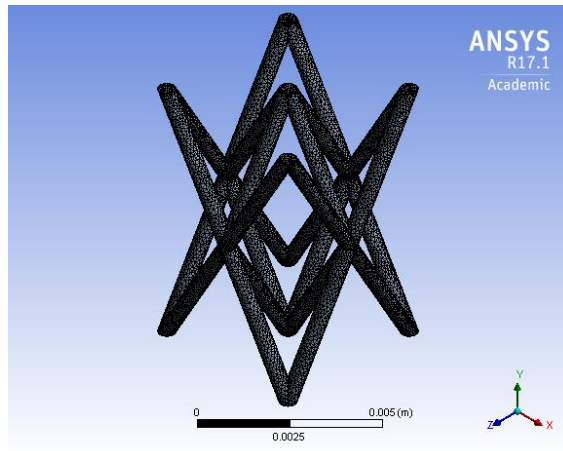


Figura 27. Vista isométrica de la malla 0.05mm

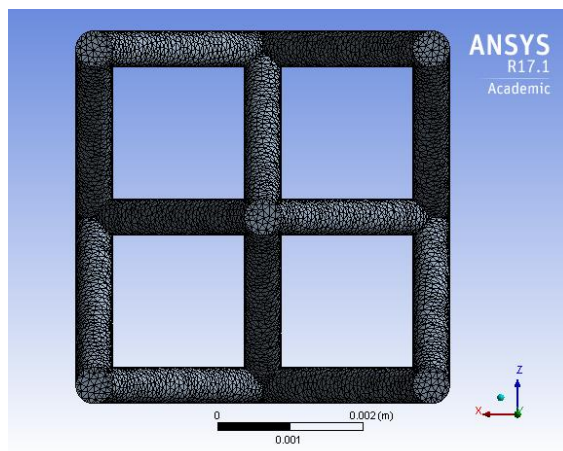


Figura 28. Vista inferior y superior de la malla 0.05mm.

Las Figura 24, Figura 26 y Figura 28 muestran una vista superior e inferior, en la cual podemos observar el número de elementos en el perímetro de la sección transversal de las barras, debido a que la estructura es simétrica se puede manejar los dos tipos de vistas de la estructura en una sola imagen. Las figuras antes mencionadas son el resultado de la sección 3.2.1 Mallado, descrita anteriormente.

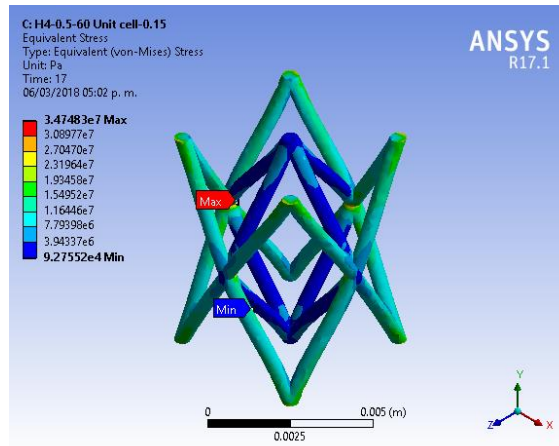


Figura 29. Esfuerzo equivalente de von-mises en celda unitaria octaédrica con un elemento de malla de 0.15mm.

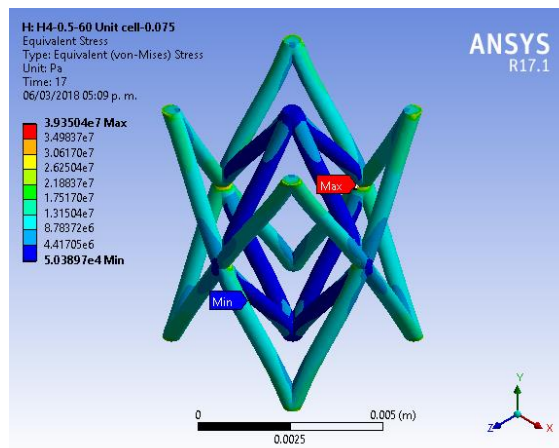


Figura 30. Esfuerzo equivalente de von-mises en celda unitaria octaédrica con un elemento de malla de 0.075mm.

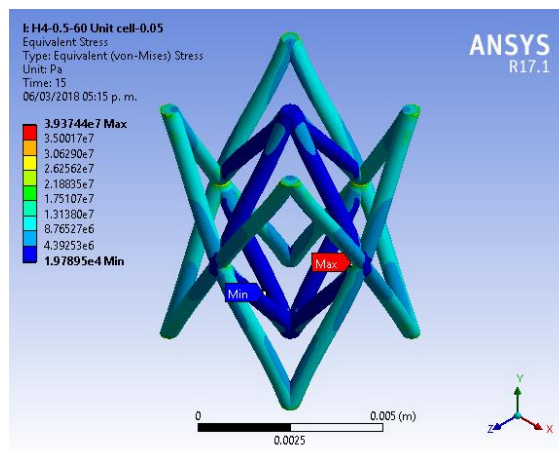


Figura 31 . Esfuerzo equivalente de von-mises en celda unitaria octaédrica con un elemento de malla de 0.05mm.

El esfuerzo máximo y mínimo equivalente de von-mises se puede observar en las Figura 29Figura 30Figura 31. La mayor concentración de esfuerzos se presenta en la parte media de la armadura, donde se unen las dos celdas unitarias de altura $H=4\text{mm}$. Dicho comportamiento se presenta de la misma manera en las tres estructuras.

La gráfica esfuerzo-deformación, se realizó con base a los resultados obtenidos de nuestra simulación, se procede a calcular el esfuerzo y deformación tomando en consideración las Ecuación 4Ecuación 5, mencionadas en la sección anterior.

Donde σ (sigma) es el esfuerzo máximo que la estructura resistirá antes de alcanzar el limite elástico (expresado en Pa), F es la fuerza adquirida de ANSYS(N) multiplicada por 5 que son las caras donde se aplicó la concentración de desplazamiento y A el área(m^2), se considera l^*l , debido a que la superficie es un cuadrado (donde $l= 0.00512\text{m}$) tomando en cuenta las dimensiones de la celda unitaria, como se muestra en la Figura 32, ϵ (épsilon) es la deformación unitaria, δ (delta) es la deformación total y L es la altura inicial de la estructura, que es igual a 8mm.

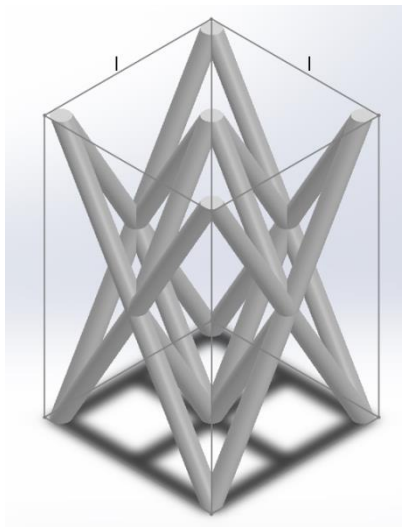


Figura 32. Parámetros para el cálculo del área.

En la Figura 33 se aprecia la gráfica esfuerzo-deformación, elaborada con los datos obtenidos de la simulación e implementando las ecuaciones descritas anteriormente.

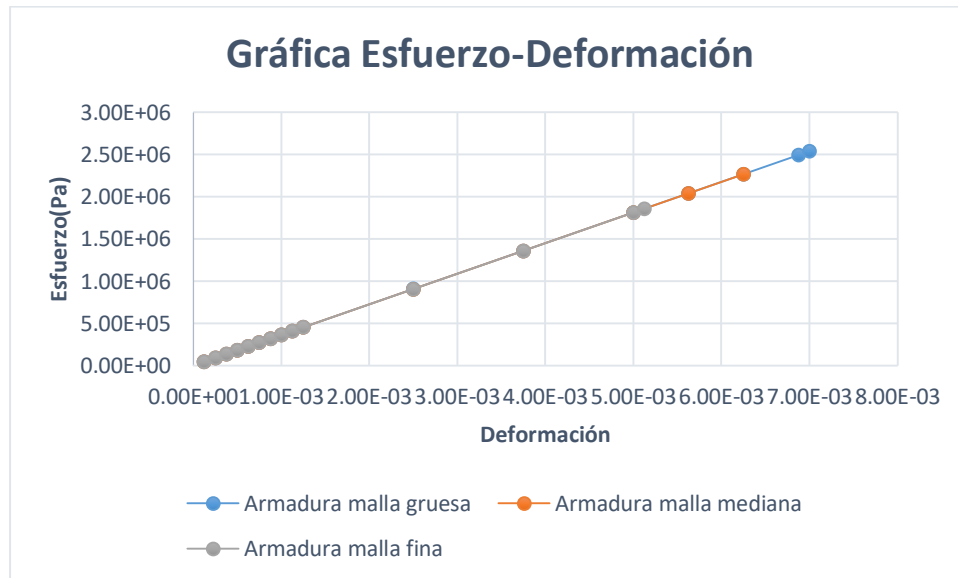


Figura 33. Gráfica Esfuerzo-Deformación, mostrando los tres tipos de mallado en la armadura utilizando la celda unitaria octaédrica con altura $H=4\text{mm}$.

En la gráfica se puede apreciar que en los tres casos la armadura presenta el mismo módulo de Young igual a $4e8$ Mpa, la diferencia entre cada mallado es el esfuerzo máximo que alcanza cada estructura ante el límite elástico del ABS.

Tabla 13. Esfuerzo máximo y desplazamiento de cada armadura con el tipo de mallado.

Tipo de malla	Esfuerzo máximo	Esfuerzo de von-mises	Desplazamiento
Gruesa	$2.54e^6$ Pa	$3.24e^7$ Pa	$5.60e^{-5}$
Mediana	$2.26e^6$ Pa	$3.28 e^7$ Pa	$5.00 e^{-5}$
Fina	$1.86e^6$ Pa	$3.23 e^7$ Pa	$4.10 e^{-5}$

4.3.2 Estructura H2mm, $\phi=0.5\text{mm}$, $\theta=60^\circ$

La estructura cuenta con una altura H total a 8mm, está conformada por cuatro celdas unitarias octaédricas de 2mm de altura cada una, la estructura fue simulada con tres tipos de malla, el tamaño de los elementos que conforman el mallado son descritos en la Tabla 11.

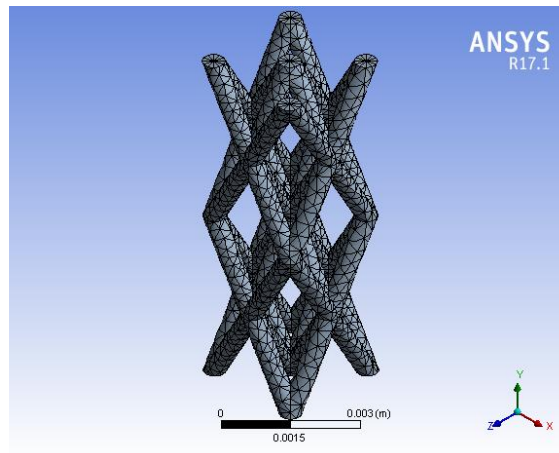


Figura 34. Vista isométrica de la malla fina de 0.15mm.

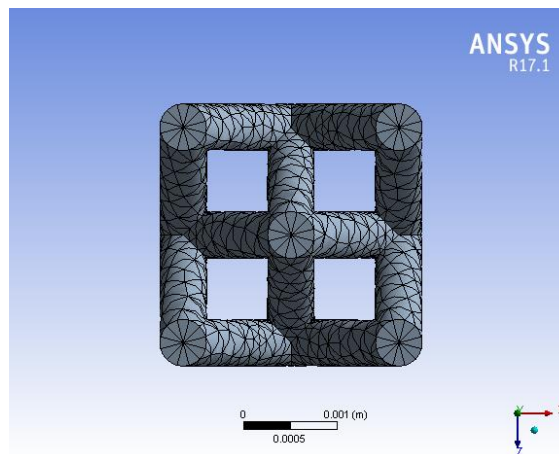


Figura 35. Vista inferior y superior de la malla 0.15mm.

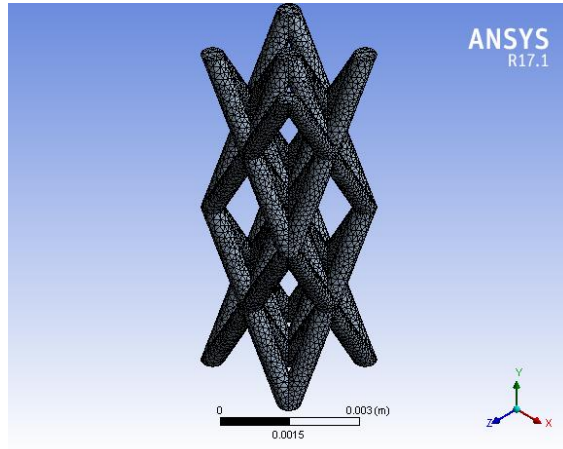


Figura 36. Vista isométrica de la malla 0.075mm

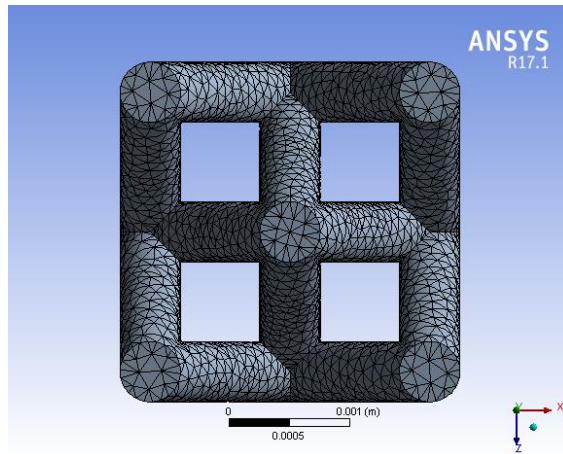


Figura 37. Vista inferior y superior de la malla 0.075mm.

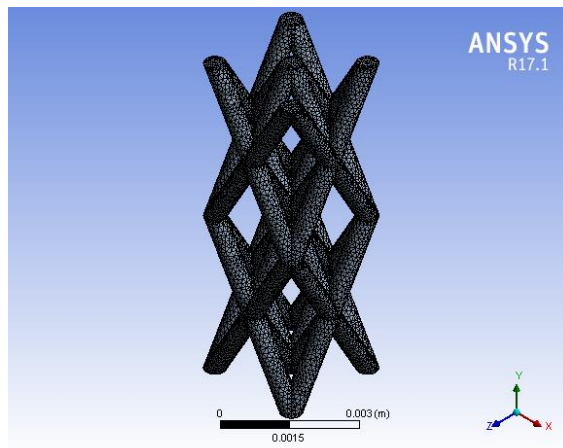


Figura 38. Vista isométrica de la malla 0.05mm.

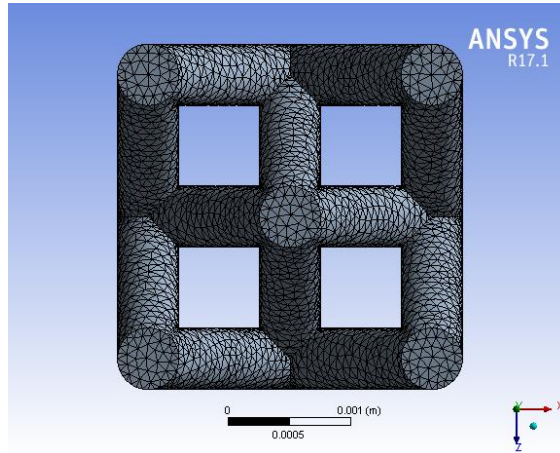


Figura 39. Vista inferior y superior de la malla 0.05mm.

Las Figura 35Figura 37Figura 39 muestran una vista superior e inferior, en la cual podemos observar el número de elementos en el perímetro de la sección transversal de las barras, debido a que la estructura es simétrica se puede manejar los dos tipos de vistas de la estructura en una sola imagen. Las figuras antes mencionadas son el resultado de la sección 3.2.1 Mallado descrita anteriormente.

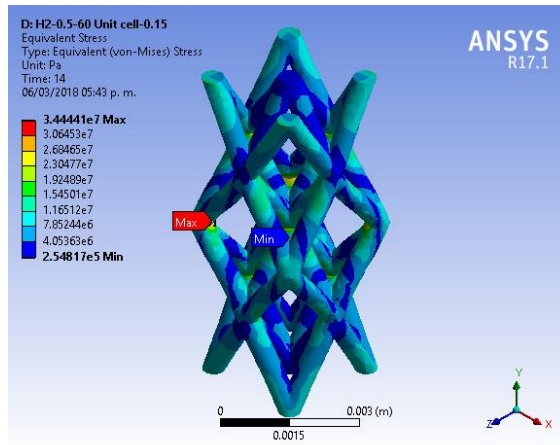


Figura 40. Esfuerzo equivalente de von-mises en celda unitaria octaédrica con un elemento de malla de 0.15mm.

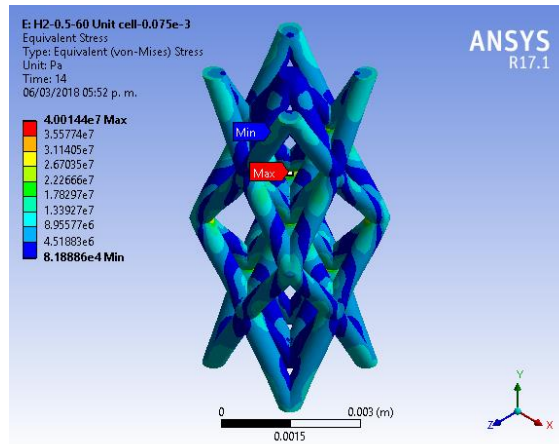


Figura 41. Esfuerzo equivalente de von-mises en celda unitaria octaédrica con un elemento de malla de 0.075mm.

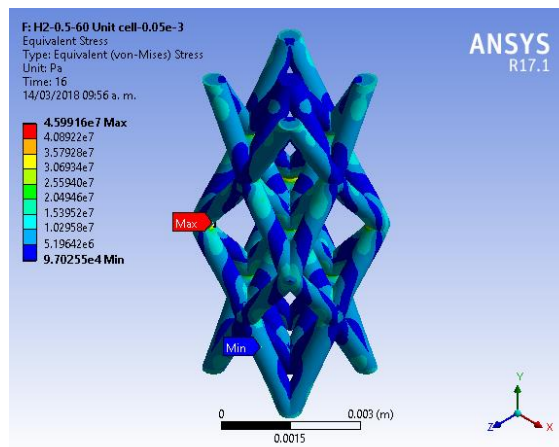


Figura 42. Esfuerzo equivalente de von-mises en celda unitaria octaédrica con un elemento de malla de 0.05mm.

El esfuerzo máximo y mínimo equivalente de von-mises se puede observar en las Figura 40Figura 41Figura 42. La mayor concentración de esfuerzos se presenta en la parte media de la armadura, donde se unen dos celdas unitarias de altura $H=2\text{mm}$, dando una altura de 4mm a la mitad de la estructura al igual que la estructura analizada en el apartado anterior.

La gráfica esfuerzo-deformación, se realizó con base a los resultados obtenidos de nuestra simulación, se procede a calcular el esfuerzo y deformación tomando en consideración las Ecuación 4Ecuación 5, mencionadas en la sección anterior.

Donde σ (sigma) es el esfuerzo máximo que la estructura resistirá antes de alcanzar el límite elástico (expresado en Pa), F es la fuerza adquirida de ANSYS(N) multiplicada por 5 que son las caras donde se aplicó la concentración de desplazamiento y A el área(m^2), se considera $l \times l$, debido a que la superficie es un cuadrado (donde $l = 0.00281m$) tomando en cuenta las dimensiones de la celda unitaria, como se muestra en la Figura 43, ϵ (épsilon) es la deformación unitaria, δ (delta) es la deformación total y L es la altura inicial de la estructura, que es igual a 8mm.

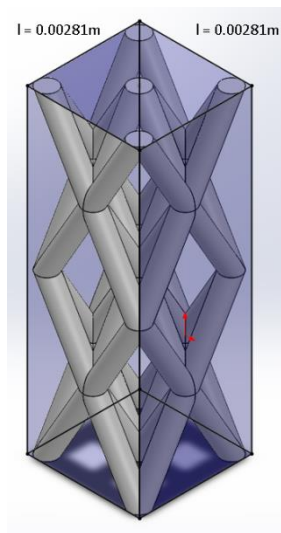


Figura 43. Parámetros para el cálculo del área.

En la Figura 44, se aprecia la gráfica esfuerzo-deformación, elaborada con los datos obtenidos de la simulación e implementando las ecuaciones descritas anteriormente.

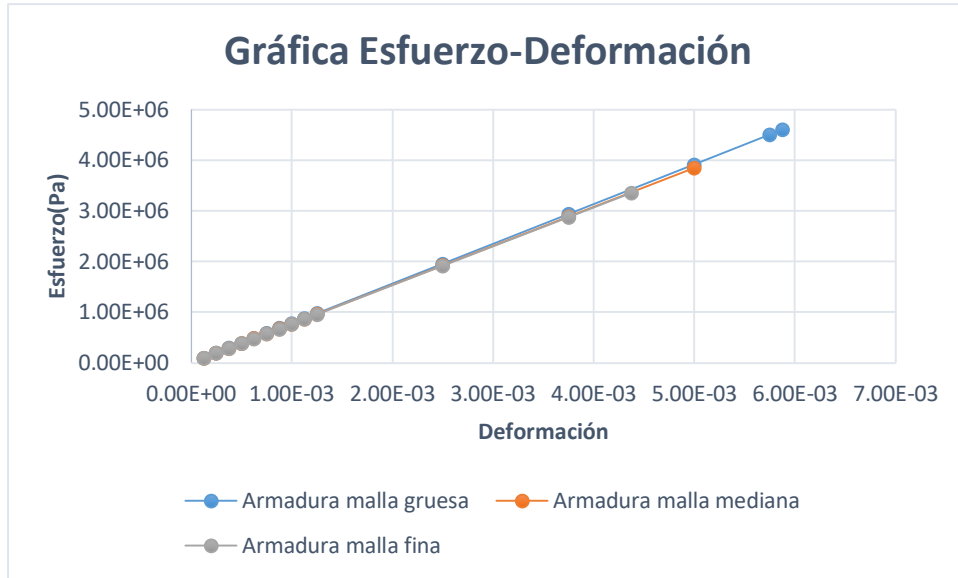


Figura 44. Gráfica Esfuerzo-Deformación, mostrando los tres tipos de mallado en la armadura utilizando la celda unitaria octaédrica con altura $H=2\text{mm}$.

En la gráfica se puede apreciar que la armadura presenta el mismo módulo de Young el cual es igual a $8e8$ Mpa para los tres tipos de mallado, la diferencia entre cada mallado es el esfuerzo máximo que alcanza cada estructura ante el límite elástico del ABS.

Tabla 14. . Esfuerzo máximo y desplazamiento de cada armadura con el tipo de mallado.

Tipo de malla	Esfuerzo máximo	Esfuerzo de von-mises	Desplazamiento
Gruesa	$4.60e^6$ Pa	$3.24e^7$ Pa	$4.70e^{-5}$
Mediana	$3.85e^6$ Pa	$3.20 e^7$ Pa	$4.00 e^{-5}$
Fina	$3.35e^6$ Pa	$3.22 e^7$ Pa	$3.50 e^{-5}$

CONCLUSIONES.

El ángulo y el diámetro de las barras influyen en el comportamiento de la armadura, el diámetro de 0.5mm presento un mejor comportamiento en comparación el diámetro de 0.25mm, al ser combinado con un ángulo entre barras de 60° en comparación a 40°.

El comportamiento de la estructura al aplicarle una carga se ve dominado por flexión.

El tamaño del elemento del mallado no influye en la rigidez de la estructura, si lo hace en el esfuerzo máximo que resiste la estructura.

La armadura realizada con 4 celdas octaédricas de altura 4mm cada una presento un mejor comportamiento mecánico, mayor resistencia bajo tensión y una mejor rigidez.

REFERENCIAS.

- Adrián, E., & Urquiza, F. (2017). Posgrado interinstitucional de ciencia y tecnología caracterización mecánica de materiales compuestos manufacturados fuera de autoclave.
- Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 364(1838), 15–30. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1678>
- Bernal Ostos, J., Rinaldi, R. G., Hammetter, C. M., Stucky, G. D., Zok, F. W., & Jacobsen, A. J. (2012). Deformation stabilization of lattice structures via foam addition. *Acta Materialia*, 60(19), 6476–6485. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.07.053>
- De Poliéster, R., Quesada-Solís, K., Alvarado-Aguilar, P., Sibaja-Ballesteros, R., & Vega-Baudrit, J. (n.d.). Revista Iberoamericana de Polímeros. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Jose_Vega-Baudrit/publication/28087816_Utilizacion_de_las_fibras_del_rastrojo_de_pina_Ananas_comusum_variedad_champaka_como_material_de_refuerzo_en_resinas_de_poliester/links/54eb3e3a0cf2a03051937e0b/Utilizacion-de-las
- Description of Composite Structures. (n.d.). Retrieved from https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_Ch07.pdf
- Deshpande, V. S., Ashby, M. F., & Fleck, N. A. (2001). Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*, 49(6), 1035–1040. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00379-7)
- Deshpande, V. S., & Fleck, N. A. (2001). Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending. *International Journal of Solids and Structures*, 38(36–37), 6275–6305. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(01\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00103-2)
- Deshpande, V. S., Fleck, N. A., & Ashby, M. F. (2001). Effective properties of the octet-truss lattice material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(8), 1747–1769. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(01\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(01)00010-2)
- Fleck, N. A., Deshpande, V. S., & Ashby, M. F. (2010). Micro-architected materials: past, present and future. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2121), 2495–2516. <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0215>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. . (1997). *Cellular Solids, structure and properties*. Cambridge university press. <https://doi.org/10.1557/mrs2003.79>
- Gurunathan, T., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2015). A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives.

Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 77, 1–25.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007>

- Hammetter, C. I., Rinaldi, R. G., & Zok, F. W. (2013). DESIGNING PYRAMIDAL LATTICE STRUCTURES FOR ENERGY ABSORPTION.
- Hundley, J. M., Clough, E. C., & Jacobsen, A. J. (2015). The low velocity impact response of sandwich panels with lattice core reinforcement. *International Journal of Impact Engineering*, 84, 64–77.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.05.009>
- Juan Maria Malavia Otero, D. A. C. G. (n.d.). Caracterización de paneles sandwich hibridos frp con alma de nido de abeja de aluminio.
- Lim, J. H., & Kang, K. J. (2006). Mechanical behavior of sandwich panels with tetrahedral and Kagome truss cores fabricated from wires. *International Journal of Solids and Structures*, 43(17), 5228–5246. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.07.011>
- Materiales Compuestos. (n.d.). Retrieved from
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/viladoms_w_jj/capitulo1.pdf
- Rathbun, H. J., Wei, Z., He, M. Y., Zok, F. W., Evans, A. G., Sypeck, D. J., & Wadley, H. N. G. (2004). Measurement and Simulation of the Performance of a Lightweight Metallic Sandwich Structure With a Tetrahedral Truss Core. *Journal of Applied Mechanics*, 71(3), 368. <https://doi.org/10.1115/1.1757487>
- Schaedler, T. A., Jacobsen, A. J., Torrents, A., Sorensen, A. E., Lian, J., Greer, J. R., ... Carter, W. B. (2011). Ultralight Metallic Microlattices. *Science*, 334(6058), 962–965. <https://doi.org/10.1126/science.1211649>
- Sypeck, D. J., & Wadley, H. N. G. (2002). Cellular metal truss core sandwich structures. *Advanced Engineering Materials*, 4(10), 759–764. [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(20021014\)4:10<759::AID-ADEM759>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/1527-2648(20021014)4:10<759::AID-ADEM759>3.0.CO;2-A)
- Tecnología de infusión de resina | Shing Sheng Fa Boat Building Co., Ltd. (n.d.). Retrieved September 25, 2017, from <https://www.ssf.com.tw/es/page/advantage-resin.html>
- Wallach, J. C., & Gibson, L. J. (2001). Mechanical behavior of a three-dimensional truss material. *International Journal of Solids and Structures*, 38(40–41), 7181–7196. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00400-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00400-5)
- Wicks, N., & Hutchinson, J. W. (n.d.). Optimal truss plates. Retrieved from https://www.seas.harvard.edu/hutchinson/papers/wicks_optimal.pdf