

**DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN EN MANUFACTURA ADITIVA DE UN  
MOSQUETÓN DE SEGURIDAD TIPO HMS REFORZADO CON FIBRA DE  
CARBONO EMPLEANDO ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.**

**FERNANDO ALFREDO ACUÑA JAIMES  
LAURA MILENA HERNÁNDEZ SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2021**

**DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN EN MANUFACTURA ADITIVA DE UN  
MOSQUETÓN DE SEGURIDAD TIPO HMS REFORZADO CON FIBRA DE  
CARBONO EMPLEANDO ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.**

**FERNANDO ALFREDO ACUÑA JAIMES  
LAURA MILENA HERNÁNDEZ SUÁREZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**DIRECTOR  
WILLIAM PINTO HERNÁNDEZ  
PhD Ingeniera Mecánica**

**CODIRECTOR  
OCTAVIO ANDRES GONZÁLEZ ESTRADA  
PhD Ingeniería Mecánica y Materiales**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2021**

A los que estan cerca  
A los que estan lejos,  
Pero sobre todo a los  
Que ya no estan.  
Shirley karamis

## **DEDICATORIA**

A Dios porque siempre me mostraba el camino a seguir y sin él este proceso no hubiese sido posible.

A mi abuela Ivis zabaleta por su amor incondicional y enseñarme que quien no vive para servir no sirve para vivir, que tan noble era tu corazón. siempre te llevaré en mis pensamientos.

A mi madre, a mi tía Martha Cecilia Jaimes y su esposo Sandro Movil, a mi abuelo Elvio Jaimes, por siempre ofrecerme su apoyo incondicional.

A mi tía Martha Eugenia Jaimes y mi tío Jose Bernal, siempre me brindaron los consejos necesarios para mi formación personal y nunca desistieron en apoyarme en todas mis decisiones.

A mi tía Eja quién me demostró que sin importar las adversidades de la vida, es uno el que decide labrar su propio destino.

A mi amigo y compañero de estudio Juan Villamizar con el cual comencé mis estudios y me enseñó que la vida es sonreír sin importar los malos días, sé que te da felicidad desde el cielo saber que terminé lo que un día iniciamos.

**Fernando Alfredo Acuña Jaimes**

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme realizar y culminar mis estudios como profesional y mantenerme en el camino de la perseverancia y la fé.

A mi madre Alba por brindarme su apoyo incondicional y ser mi ejemplo a seguir.

A mi padre Pompilio por su colaboración.

**Laura hernández**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al estudiante y profesor Sebastian León por aconsejarnos, guiarnos y acompañarnos a lo largo del camino del conocimiento.

Al director de trabajo de grado William Pinto Hernández por su colaboración y gestión.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica por el préstamo de la impresora Mark Two 3D y la máquina MTS para realizar ensayos.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	17
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	17
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	18
1.3 OBJETIVOS .....	20
1.3.1 Objetivo General. ....	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	20
2. MARCO TEÓRICO .....	21
2.1 ANTECEDENTES.....	21
2.2 TIPOS DE MOSQUETONES .....	24
2.2.1 Norma EN 12275 del año 2013.....	25
2.2.1.1 Mosquetón tipo B. ....	25
2.2.1.2 Mosquetón Tipo H (HMS). ....	27
2.2.1.3 Mosquetón tipo K para vía ferrata(Klettersteig).....	28
2.2.1.4 Mosquetón tipo T direccional o de terminación.....	29
2.2.1.5 Mosquetón tipo X oval o simétrico. ....	30
2.2.1.6 Mosquetón tipo Q con cierre de rosca Quick link.....	30
2.2.1.7 Mosquetón tipo A para anclaje específico.....	31
2.3 MATERIALES .....	32
2.3.1 Materiales compuestos. ....	32
2.3.1.1 La matriz. ....	33
2.3.1.2 El refuerzo.....	35
2.3.2 Nylon.....	36
2.3.3 Fibra de carbono.....	37
2.4 MANUFACTURA ADITIVA.....	38
2.4.1 Blinder Jetting (Inyección de aglutinante). ....	39

2.4.2 Directed energy deposition (Deposición de energía directa).....	40
2.4.3 Material extrusión (Extrusión de material).....	41
2.4.4 Material Jetting (Inyección de material).....	41
2.4.5 Powder bed fusión (Fusión por leche de polvo).....	42
2.4.6 Sheet Lamination (Laminación de hojas).....	43
2.4.7 VAT photopolymerization (Beta de foto polimerización).....	43
2.5 IMPRESORA FDM MARKTWO 3D .....	44
2.6 ELEMENTOS FINITOS.....	45
2.6.1 Aplicación del método.....	47
2.7 INTRODUCCIÓN AL ANSYS WORKBENCH.....	48
3. INTRODUCCION AL PREDISEÑO Y DISEÑO DEL MOSQUETON HMS. ....	54
3.1 PREDISEÑO.....	55
3.1.1 Geometría.....	55
3.1.2 Materiales.....	56
3.1.3 Simulación ANSYS.....	56
3.1.4 Malla.....	56
3.1.5 Carga Longitudinal.....	58
3.1.5.1 Condición de contorno.....	58
3.1.5.2 Resultados.....	58
3.1.6 Carga Transversal.....	62
3.1.6.1 Condición de contorno.....	62
3.1.6.2 Resultados.....	63
3.2 DISEÑO.....	67
3.2.1 Materiales y método.....	67
3.2.2 Configuración del laminado.....	68
3.2.3 Simulación.....	70
3.2.4 Geometría.....	70
3.2.5 Malla.....	71
3.2.6 Resultados.....	73
3.2.6.1 Condiciones de contorno.....	73

3.2.6.2 Modelado ACP.....	73
3.2.6.3 Carga longitudinal. ....	75
3.2.6.4 Left.....	77
3.2.6.5 UP.....	80
3.2.6.6 Down.....	84
3.2.6.7 RIGHT.....	87
3.2.6.8 Deformación direccional.....	90
3.2.6.9 Factor de seguridad.....	93
4. FABRICACIÓN DEL DISEÑO.....	94
4.1 MANUFACTURA ADITIVA - IMPRESIÓN FMD (MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA).....	94
4.2 IMPRESORA MARK TWO 3D.....	95
4.2.1 Características de la impresora Mark Two 3D.....	96
4.2.1.1 Dimensiones físicas de la impresora Mark Two 3D.....	96
4.2.1.2 Volumen de impresión.....	96
4.2.1.3 Resolución de la capa Z.....	97
4.3 EVIDENCIA FOTOGRÁFICA.....	97
5. ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DISEÑO.....	99
5.1 MÁQUINA MTS BIONIX.....	99
5.2 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	100
5.3 GRÁFICA FUERZA VS DESPLAZAMIENTO.....	101
7. CONCLUSIONES.....	102
BIBLIOGRAFÍA.....	105

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. “Carabiner” primer mosquetón por Otto Herzog. ....	22
Figura 2. Tipos de mosquetón y requisitos de seguridad según UIAA (International Climbing and Mountaineering Federation – 1932). ....	24
Figura 3. Mosquetón tipo B con cierre de seguridad.....	26
Figura 4. Mosquetón tipo B sin cierre de seguridad.....	27
Figura 5. Mosquetón tipo HMS. ....	28
Figura 6. Mosquetón tipo H, recomendaciones genéricas en la utilización.....	28
Figura 7. Mosquetón tipo K.....	29
Figura 8. Mosquetón tipo T, diseñado para mantener la carga en una dirección determinada.....	29
Figura 9. Mosquetón oval o simétrico. ....	30
Figura 10. Mosquetón Quick link, cierre de rosca para conexiones rápidas de seguridad adicional.....	31
Figura 11. Mosquetón para anclaje específico. Modelo Frog inventado en 1998 por la empresa fabricante Konkg. ....	31
Figura 12. Clasificación de materiales compuestos según el refuerzo. ....	32
Figura 13. Tipos de materiales compuestos según el refuerzo.....	35
Figura 14. Refuerzos de tipo continuo para materiales compuestos. ....	36
Figura 15. Inyección por solidificación de polvo.....	40
Figura 16. Máquina de impresión por deposición de energía directa.....	40
Figura 17. Impresora 3D por extrusión de material.....	41
Figura 18. Impresora 3D de inyección de material.....	42
Figura 19. Impresora 3D de fusión por lecho de polvo. ....	42
Figura 20. Pieza realizada en impresora 3D de laminación de hojas. ....	43
Figura 21. Impresora 3D de foto polimerización. ....	44

Figura 22. Impresora MarkTwo.....	45
Figura 23. Nodos y elementos. ....	46
Figura 24. Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamientos de los nodos. ....	48
Figura 25. Interfaz ANSYS WORKBENCH. ....	49
Figura 26. Static structural. ....	49
Figura 27. Engineering data.....	50
Figura 28. Modelo del mosquetón.....	51
Figura 29 Malla. ....	51
Figura 30. Análisis de condiciones.....	52
Figura 31. Solución del análisis .....	52
Figura 32. Geometría del mosquetón .....	55
Figura 33. Geometría simplificada .....	55
Figura 34. Mallado tetraedro.....	57
Figura 35. Condición de contorno longitudinal.....	58
Figura 36. Esfuerzo equivalente longitudinal. ....	59
Figura 37. Desplazamiento máximo.....	59
Figura 38. Factor de seguridad.....	60
Figura 39. Fuerza de reacción carga longitudinal .....	60
Figura 40. Detalles de la fuerza de reacción- carga longitudinal.....	61
Figura 41. Dirección de los esfuerzos principales.....	61
Figura 42. Dirección de esfuerzos principales .....	62
Figura 43. Condición de contorno - transversal .....	62
Figura 44. Esfuerzo equivalente-transversal.....	63
Figura 45. Desplazamiento máximo-transversal.....	64
Figura 46. Factor de seguridad-transversal .....	64
Figura 47. Fuerza de reacción-carga transversal.....	65
Figura 48. Detalles fuerza de reacción-carga transversal.....	65
Figura 49 Dirección de los esfuerzos principales-carga transversal .....	66
Figura 50. Dirección de los esfuerzos principales-carga transversal .....	66
Figura 51. Características del mosquetón-Software Eiger.....	69

Figura 52. Anillos concentricos .....	70
Figura 53. Geometría del diseño.....	71
Figura 54. Malla del diseño.....	72
Figura 55. Laminado-zonas laterales.....	74
Figura 56. Laminado- Zona de radio mayor y radio menor .....	74
Figura 57. Orientación de las fibras .....	75
Figura 58. Capa 1 left- longitudinal .....	77
Figura 59. Capa 10 left- longitudinal .....	77
Figura 60. Capa 25 left .- longitudinal .....	78
Figura 61. Capa 1 left- transversal.....	78
Figura 62. Capa 10 left- transversal.....	79
Figura 63. Capa 25 left- transversal.....	79
Figura 64. Capa 1 up -longitudinal .....	80
Figura 65. Capa 10 up-longitudinal .....	81
Figura 66. Capa 25 up-longitudinal .....	81
Figura 67. Capa 1 up transversal.....	82
Figura 68. Capa 10 up transversal.....	82
Figura 69. Capa 25 up transversal.....	83
Figura 70. Capa 1 Down longitudinal .....	84
Figura 71. Capa 10 down longitudinal.....	84
Figura 72. Capa 25 down Longitudinal .....	85
Figura 73. Capa 1 down transversal .....	85
Figura 74. Capa 10 down transversal .....	86
Figura 75. Capa 25 down transversal. ....	86
Figura 76. Capa 1 right longitudinal .....	87
Figura 77. Capa 10 right longitudinal .....	88
Figura 78. Capa 24 longitudinal rght.....	88
Figura 79. Capa 1 rght transversal.....	89
Figura 80. Capa 10 right transversal.....	89
Figura 81. Capa 24 rght transversal.....	90

Figura 82. Deformación direccional en el eje x .....	91
Figura 83. Deformación direccional en el eje x .....	92
Figura 84. Deformación direccional en el eje z .....	92
Figura 85. Impresora Mark Two 3D. ....	95
Figura 86. Manufactura del mosquetón de seguridad tipo HMS. ....	97
Figura 87. Mosquetón de seguridad tipo HMS manufacturado con matriz de nylon y con refuerzo de fibra de carbono. ....	98
Figura 88. Máquina MTS Bionix 370.02.....	99
Figura 89. Ensayo de tracción para mosquetón tipo HMS fabricado con nylon y refuerzo con fibra de carbono. ....	100
Figura 90. Gráfica fuerza Vs desplazamiento del mosquetón de seguridad tipo HMS.....	101

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades del aluminio.....	56
Tabla 2. Propiedades del nylon white. ....	67
Tabla 3. Propiedades de fibra de carbono en todas sus direcciones.....	68
Tabla 4. Criterio de falla de tensión máxima – factor de seguridad .....	93
Tabla 5. Dimensiones físicas de la impresora Mark Two 3D. ....	96
Tabla 6. Volumen de impresión de la impresora Mark Two 3D. ....	96
Tabla 7. Resolución de la capa Z de la impresora Mark Two 3D.....	97

## RESUMEN

**TITULO:** DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN EN MANUFACTURA ADITIVA DE UN MOSQUETÓN DE SEGURIDAD TIPO HMS REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO EMPLEANDO ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS\*

**AUTORES:** FERNANDO ALFREDO ACUÑA JAIMES\*\*  
LAURA MILENA HERNÁNDEZ SUAREZ

**PALABRAS CLAVE:** Mosquetón, Materiales compuestos, análisis estructural, manufactura aditiva, impresión FMD.

### DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo se realiza con el fin de investigar sobre el comportamiento del material compuesto matriz de nylon y refuerzo con fibra de carbono, en un mosquetón de seguridad tipo HMS, realizando una comparación con un mosquetón convencional que se encuentra en el mercado actualmente. Para cumplir con el propósito de esta investigación, se importó una geometría ya creada desde el software CAD SOLIDWORKS, al programa ANSYS el cual permite hacer estudios ingenieriles por el método de los elementos finitos, luego se agregaron propiedades del material encontradas en el programa para un aluminio aleado y posteriormente se realizó un análisis estructural donde se aplicaron ciertas condiciones de contorno que cumplirán con las dimensiones de la geometría propuesta, y a su vez equivalentes a la norma EN 12275:2013: "Equipo de alpinismo y escalada. Mosquetones. Requisito de seguridad y método de ensayo". Posteriormente con la misma geometría se realiza un análisis similar capa por capa del material compuesto descrito en el presente proyecto, con las mismas condiciones de contorno y se obtienen resultados. Para obtener las propiedades del material se acudió al datasheet del software EIGER de Markforged. Esto fue posible realizarlo ya que no solo se piensa en hacer un diseño y una simulación, sino que a su vez se llevara a cabo su manufactura aditiva por el método de modelado por deposición fundida o FMD. Para lograr manufacturarlo se utilizó el software para la generación del código G Eiger, que trata de un slicer con capacidades para manejo de materiales compuestos, en este se aplicaron unos parámetros de impresión. Luego se imprime la pieza en la impresora MARK TWO 3D. Finalmente se realiza un ensayo de tracción y un análisis de la simulación con el mosquetón fabricado. Se obtienen conclusiones y se hacen recomendaciones para investigaciones posteriores.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director. William Pinto H. Coodirector. Octavio Andres Gonzáles.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN, SIMULATION AND ADDITIVE MANUFACTURING OF A SAFTY CARABINE TYPE HMS REINFORCE WITH CARBON FIBRE USING THE FINITE ELEMENT METHOD\*

**AUTHORS:** FERNANDO ALFREDO ACUÑA JAIMES\*\*  
LAURA MILENA HERNÁNDEZ SUAREZ

**KEY WORDS:** safety carabiner, composite materials, structural analysis, additive manufacture, FMD printing.

### **DESCRIPTION:**

The purpose of the study is to compare a safety carabiner type HMS made from nylon matrix and carbon-reinforced fiber to a standard carabiner currently on the market. In order to achieve this, we use a geometry sequence from the software "SOLIDWORKS CAD" that is imported to the program "ANSYS". This program allows us to, among other things, use a method to study the finite elements and add material properties identified in the software "EIGER". Hereafter, a structural analysis is made conditioned with certain boundaries that comply with the above-mentioned geometry sequence and the "EN 12275:2014 standard: Mountaineering equipment. Carabiners. Safety requirements. Test method". Following the same sequence, another analysis is made layer by layer of the composite material mentioned in the current project, with the same contour conditions and results. To obtain the material properties we use the EIGER software database by Markforger. The aim is not merely to create the design and simulation but also to participate in additive manufacturing with the FMD method. The EIGER software generated a "G code" in order to reach the desired result. The G code is about a slicer with capabilities skills of composite materials, here print criteria were applied. Afterward, the printer MARK TWO 3D produces a solid product. Furthermore, a traction test and simulation analysis is made with the carabiners. Lastly, conclusions and recommendations for future resourcing are presented.

---

\* Bachelor Tesis

\*\* Physicomechanical Faculty of Engineering. School of Mechanical Engineering. Director. William Pinto H. Co-Director. Octavio Andres Gonzáles.

# INTRODUCCIÓN

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El programa de Ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander cuenta con un laboratorio de materiales y laboratorio de metalografía donde se encuentra la impresora Mark Two de Markforged. En él se valoran características técnicas como lo son propiedades físicas, mecánicas y químicas, con el objetivo de comprobar validez a los planteamientos teóricos y además brindar un espacio para el desarrollo de la investigación en esta área.

Actualmente los materiales compuestos en manufactura aditiva están generando un gran impacto en las industrias, según la IDC se espera que crezca una media de 19,1% para el año 2022<sup>1</sup>. En Colombia existen pocos estudios de esta tecnología, con lo cual estaríamos ignorando el reducir gastos, gases tóxicos y aún más importante el mejoramiento de propiedades técnicas.

Los mosquetones de seguridad en material compuesto tienen ventaja sobre los mosquetones tradicionales debido a sus propiedades mecánicas, además, estos requieren menos personal y equipos para su creación. No utilizan soldadura y no presenta corrosión. Para su aplicación en deportes de alto desempeño como lo es la escalada, al tener el EPI (equipo de protección individual) este incluye varios mosquetones tradicionales los cuales sumados tienen un peso considerable, Por las razones anteriormente descritas, es necesario desarrollar un diseño de mosquetón de seguridad que implique el dimensionamiento de un sistema tipo HMS

---

<sup>1</sup> IDC. La fabricación aditiva impulsa el mercado de impresión 3D. [En línea]. Madrid. p. 1. 2019. Disponible en: <https://impresiondigital.ituser.es/reportajes/2019/02/la-fabricacion-aditiva-impulsa-el-mercado-de-impresion-3d>

(\*) IDC, de acuerdo con su traducción al español, quiere decir analistas a nivel global de Investigación para la transformación digital de datos.

reforzado con fibra de carbono y así, mejorar las condiciones de operación, en aspectos de resistencia/peso y durabilidad.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Se ha extendido en la actualidad el uso de materiales compuestos mediante manufactura aditiva, debido principalmente a la generación de propiedades específicas y su compleja geometría con respecto a la manufactura tradicional. Además de la atractiva relación de resistencia/peso con respecto a los elementos metálicos convencionales, en el sector de la industria deportiva, el mosquetón de seguridad hace que su demanda sea creciente cada año.

Los materiales de fabricación representarán más de dos tercios del total del gasto mundial, generando 5.300 y 4.200 millones de dólares, respectivamente. Mientras tanto, el gasto en servicios relacionados con manufactura aditiva rebajará su crecimiento hasta los 3.800 millones, Estados Unidos tendrá el mayor gasto total en 2019 (5.000 millones de dólares), seguido de Europa Occidental (3.600 millones de dólares) y China (2.000 millones de dólares).<sup>1</sup> Las regiones que registran el mayor crecimiento del gasto en el quinquenio previsto son América Latina (25,3%) y China (21,6%). Se prevé que cinco de las nueve regiones geográficas registren tasas de crecimiento anual compuesto superiores al 20% durante el período de previsión.<sup>2</sup> En Colombia hace 7 años empresas del sector de producción de materiales compuestos vienen introduciendo este nuevo método de manufactura aditiva. Como la manufactura aditiva es considerada una tecnología reciente, productores como Fabrilad e IVSS (ingeniería vertical en seguridad y salud), interesados por obtener estudios de la creación de sus elementos, lo que enfoca este proyecto en el rediseño y optimización del Mosquetón de seguridad el cual contiene estudios de materiales

---

<sup>1</sup> Ibíd. p. 1

<sup>2</sup> Ibíd. p. 1

compuesto, esfuerzos, deformaciones, temperaturas y rango de vida útil, todo esto se hará por el método de elementos finitos. Es difícil encontrar soluciones por métodos analíticos de este objeto, debido a que se trata de un elemento cubierto de varias capas de un material compuesto generando una alta complejidad del problema.

El resultado del rediseño y optimización del mosquetón de seguridad, podrá ser usado como apoyo para difundir el uso de materiales compuestos con manufactura aditiva a otros sectores de la industria como la química, civil y deportiva, donde sera de gran impacto.

### **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo General.** Diseñar un mosquetón de seguridad tipo HMS para manufactura aditiva, reforzado con fibra de carbono, mediante el método de elementos finitos, evaluando las propiedades mecánicas del material, y la reducción en el peso.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Analizar el prediseño de un mosquetón de seguridad tipo HSM mediante técnicas numéricas con el fin de optimizar la forma y la resistencia.
- Determinar la orientación y fracción volumétrica de las fibras, escogiendo la configuración de las capas que mejore las propiedades mecánicas del material.
- Fabricar el mosquetón mediante manufactura aditiva, empleando una matriz termoplástica de Nylon y con refuerzo de fibra de carbono en la impresora de FDM MarkTwo.
- Determinar experimentalmente la resistencia del mosquetón, mediante ensayos de tracción para evaluar la exactitud del modelo numérico.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ANTECEDENTES

Para el presente proyecto se desea desarrollar el diseño y fabricación de un mosquetón de seguridad tipo HMS usado para deportes de escalada y de alto impacto. Desde que el ser humano comenzó a trepar por lo árboles y subir montañas para conseguir alimento, se practica la escalada; así las primeras referencias de escalada como disciplina datan en Europa en el año 1911<sup>1</sup>, donde se distingue la escalda libre y artificial.

En los años 60 del siglo XIX, apareció el arnés de escalada que significó un gran paso referente a la seguridad y con este aparece un pequeño objeto metálico llamado mosquetón<sup>2</sup>. Este objeto consistía en un anillo metálico en formato longitudinal, con forma de pera ovalada, simétrico, el cual se abre mediante un gatillo. Otto Herzog describe este objeto con el término de “carabiner”.

---

<sup>1</sup> BAENA, Antonio. Revista técnica del deporte de competición. *La Escalada como Deporte de Aventura*. [En línea].Granada (España).2007.[ Consultado 16 de julio 2020]. ISSN 1. DOI: <https://www.sporttraining.es/?s=LA+ESCALADA+COMO+DEPORTE+DE+AVENTURA>  
<sup>2</sup>BRIGHT, Casandra Marie. [en línea]. Tesis universitaria. University of Arkansas,Fayetteville. 2014. [Consultado 16 julio 2020]. Disponible en <https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://scholar.google.es/&httpsredir=1&article=1040&context=meeguht>

**Figura 1. “Carabiner” primer mosquetón por Otto Herzog.**



Fuente: El rincón de la pipa, [en línea], 2012

En la figura 1 se muestra el primer mosquetón creado por Otto Herzog el cual describe la forma de pera mencionada.

La evolución del equipo de escalada denota la mejora del mosquetón de seguridad a través del tiempo.

En 1941 se fabrican en su mayoría mosquetones en acero<sup>1</sup>, pero en la segunda guerra mundial escasea el material por lo que Bill House, un escalador de EE. UU, colabora para la producción de los primeros mosquetones en aleación de aluminio (conocida como aleación S-T 24); los cuales resultaron ser tres veces más ligeros que los de acero y con una resistencia similar (en hierro más de 300 gr, en aluminio 150 gr promedio).

En 1958 Pierre Allain, escalador francés; desarrolló el modelo en Zical (también llamada aleación de aluminio 7075-T6), con una composición de cerca del 88% aluminio, 6% zinc, 2,5% magnesio, 2% cobre, algo de cromo, silicio, hierro, manganeso y titanio. Esta aleación se considera como una de las más resistentes a la tracción.

---

<sup>1</sup> ANDINAUTAS. [Sitio web]. Argentina: Historia, evolución y fabricación del mosquetón de escalada. [Consulta: 16 de julio 2020]. Disponible en: <http://www.andinautas.com.ar/NotasTecnicas/Mosquetones.htm>

El primer mosquetón de cierre automático se denota en el año de 1975<sup>1</sup>, así mismo se empiezan a observar innovaciones en la forma de estas piezas. Jean P. Frechin (Austria) desarrolla el primer mosquetón con cierre curvo en el año 1984.

Después de 8 años de estudios, Sr. Griffin junto con el Laboratorio Nacional de Ingeniería de Glasgow presenta la primera norma para mosquetones<sup>2</sup>. Estos estudios determinaron una serie de factores que se deben tener en cuenta a la hora de fabricarlos. Dentro de estos factores se encuentra la resistencia tanto para cierre abierto como para cierre cerrado (11 KN Y 22 KN) respectivamente. Este requisito se plantea por la UIAA (International Climbing and Mountaineering Federation – 1932), la cual garantiza la seguridad de los escaladores. Estos valores de resistencia fueron modificados en 1979 con la intención de hacerlos más ligeros y pasando de 11 KN a 9 KN<sup>3</sup>.

En 1987 la comisión técnica de seguridad de la UIAA concede los requisitos de seguridad y métodos de ensayo para nuevos tipos de mosquetones. Consiste en marcar los mosquetones de seguridad en dos tipos: N (mosquetón de resistencia normal) y L (mosquetón de resistencia media). N para los que cumplieran los requisitos acordados en 1979 y L para los que presenten requisitos diferentes<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> CULTURA DE MONTANIA. [Sitio web]. Argentina: Evolución del equipamiento de escalda a través de la historia. [Consulta: 16 de julio 2020]. Disponible en: [http://www.culturademontania.org.ar/Historia/HIS\\_historia-escaladahielo.htm](http://www.culturademontania.org.ar/Historia/HIS_historia-escaladahielo.htm).

<sup>2</sup> ASAC FORMACIÓN. [Sitio web]. Madrid: Historia de las normas en el mercado en los mosquetones de escalda. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <http://asacformacion.com/?p=1182>

<sup>3</sup> *Ibíd.*

<sup>4</sup> *Ibíd.*

**Figura 2. Tipos de mosquetón y requisitos de seguridad según UIAA (International Climbing and Mountaineering Federation – 1932).**

1987	TIPOS DE MOSQUETONES Y REQUISITOS DE SEGURIDAD.			UIAA
<small>Esta ficha técnica, recoge los diferentes tipos de mosquetones, que estableció la Comisión Técnica de seguridad en la ciudad de Leeds, en Inglaterra en abril de 1987. © Copy-Left Escuela Andaluza de Alta Montaña, Curo Martínez.</small>				
TIPO	MARCADO	EJE MAYOR CERRIE CERRADO	EJE MENOR	EJE MAYOR CERRIE ABIERTO
MOSQUETÓN DE RESISTENCIA NORMAL U.I.A.A. (N)	Ⓝ	22KN	6KN	9KN
MOSQUETÓN DE RESISTENCIA MEDIA U.I.A.A. (L)	Ⓛ	20KN	4KN	6KN

Fuente: Asac Formación, (en línea). 2013

En la actualidad se han presentado accidentes debido al desconocimiento de la norma y el marcado de los mosquetones ya que existe un número significativo de materiales con propiedades mecánicas diferentes con los cuales se pueden fabricar estos objetos. Es cierto que tener en cuenta la norma y la ficha técnica de los mosquetones de seguridad es muy importante, ya que evita de manera considerable la presencia de algún tipo de accidente.

## 2.2 TIPOS DE MOSQUETONES

Para los tipos de mosquetones se menciona en la normativa internacional que establece la UIAA (International Climbing and Mountaineering Federation – 1932) que rigen su clasificación; EN 12275 del año 2013: Equipo de alpinismo y escalada. Mosquetones. Requisito de seguridad y método de ensayo.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ASAC FORMACIÓN. [Sitio web]. Madrid: Tipos de mosquetones en escalda: según la normativa actual. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <http://asacformacion.com/?p=342>

**2.2.1 Norma EN 12275 del año 2013.** EN 12275 del año 2013: Equipo de alpinismo y escalada. Mosquetones. Requisito de seguridad y método de ensayo

Esta norma es la reguladora sobre los equipos de escalada y alpinismo, mosquetones, requisitos de seguridad y métodos de ensayo, sustituye a la norma de 1998.

Según esta norma los mosquetones se dividen en siete tipos diferentes, los cuales están etiquetados con una letra diferente.

Tipos de mosquetones según la norma EN 12275:2013

Mosquetón tipo B

Mosquetón Tipo H

Mosquetón Tipo K

Mosquetón Tipo T

Mosquetón Tipo X

Mosquetón Tipo Q

Mosquetón Tipo A

**2.2.1.1 Mosquetón tipo B.** Se encuentran dos tipos de subfamilias: una compuesta por mosquetones con cierre de seguridad y una secundaria compuesta por mosquetones que no poseen ese elemento de seguridad.

a. Mosquetón Tipo B con cierre de seguridad

Su forma regularmente es asimétrica, fabricados en materialidad de aluminio ligero o acero y son de alta carga, poseen seguro de rosca y muchos de ellos cuentan con sistema Keylock.

La forma de D transfiere la mayor carga al eje principal del mosquetón, que es el que cuenta con mayor resistencia, por otra parte, su forma asimétrica es ideal para sistemas de retención. Los diferentes sistemas de seguridad como roscas, automáticos simples, automáticos con Bayoneta, Keylock los hacen adecuados para ámbitos de trabajo profesional.

**Figura 3. Mosquetón tipo B con cierre de seguridad.**



Fuente: Asac Formación, (en línea). 2014

#### b. Mosquetón Tipo B sin cierre de seguridad

Se usan en el caso de que su apertura no ponga en riesgo al usuario y el tiempo de uso sea relativamente corto; dentro de los mosquetones sin cierre de seguridad se encuentra los que poseen cinta exprés, son cómodos y fáciles de usar, su diseño busca minimizar el tiempo de fijación optimizando el tiempo de manipulación. Los valores de resistencia en su eje mayor deben de ser entorno a los 10 kN con el cierre abierto (resistencia superior a la norma).

**Figura 4. Mosquetón tipo B sin cierre de seguridad.**



Fuente: Asac Formación, (en línea). 2014

**2.2.1.2 Mosquetón Tipo H (HMS).** Este mosquetón cuenta con cierre automático, usualmente su forma es en pera, es un mosquetón destinado en primera instancia a uso con nudo dinámico.

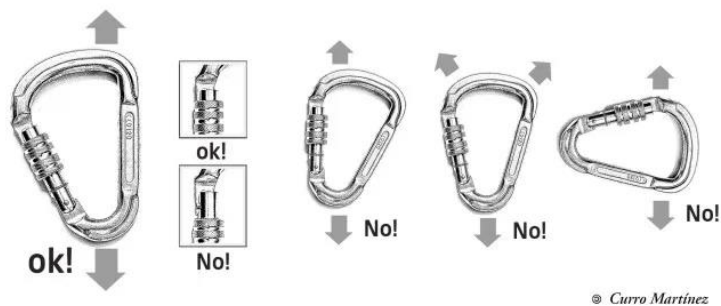
La norma le exige los mismos valores de resistencia que al mosquetón tipo B, se debe delimitar su uso a situaciones en las que pueda sufrir un factor de caída importante y se presente un efecto polea con elementos de la cadena de seguridad, ya que su forma puede tener cierta tendencia a situar la carga alejada del eje principal del mosquetón, así como en su eje menor o eje transversal y por lo tanto disminuir la resistencia del mosquetón.

**Figura 5. Mosquetón tipo HMS.**



Fuente: Asac Formación, (en línea). 2014

**Figura 6. Mosquetón tipo H, recomendaciones genéricas en la utilización.**



Fuente: Asac Formación, (en línea). 2014

**2.2.1.3 Mosquetón tipo K para vía ferrata (Klettersteig).** Este mosquetón está destinado a enganchar a un escalador con un sistema de anclaje de vía ferrata. En la norma se exige que su apertura de cierre sea mayor al resto de mosquetones (21mm), también la resistencia de su eje principal es mayor (25 kN), es recomendable utilizarlos siempre con un dispositivo de seguro automático, ya que posibilita una ascensión más rápida y brinda mayor seguridad por las vías ferrata en las que se de uso.

**Figura 7. Mosquetón tipo K.**



Fuente: Asac Formación, (en línea). 2014

**2.2.1.4 Mosquetón tipo T direccional o de terminación.** Mosquetón con cierre automático o combinación de uno o más mosquetones junto con cintas exprés o eslingas, está diseñado para asegurar una carga en alguna dirección determinada. Este tipo de mosquetones delimita la posibilidad accidental de que la carga quede posicionada en el eje transversal, delimitando así su resistencia.

**Figura 8. Mosquetón tipo T, diseñado para mantener la carga en una dirección determinada.**



Fuente: Asac Formación, (en línea). 2014

**2.2.1.5 Mosquetón tipo X oval o simétrico.** Los mosquetones de cierre automático, brindan limitaciones de resistencia. La norma define estos mosquetones para uso con precaución ya que no están diseñados para dar una protección total en caso de caída, su forma oval permite un uso útil como en poleas de placas laterales fijas.

**Figura 9. Mosquetón oval o simétrico.**



Fuente: Asac Formación, (en línea). 2014

**2.2.1.6 Mosquetón tipo Q con cierre de rosca Quick link.** Mosquetón que se cierra mediante sistema tipo rosca, el cual es el elemento que soporta la carga cuando se cierra totalmente, la norma exige cuatro giros completos de cierre, estas características los hacen mucho más resistentes, ligeros y económicos que los mosquetones de cierre automático.

**Figura 10. Mosquetón Quick link, cierre de rosca para conexiones rápidas de seguridad adicional.**



Fuente: Asac Formación, (en línea). 2014

**2.2.1.7 Mosquetón tipo A para anclaje específico.** Mosquetón de cierre automático diseñado exclusivamente para ser conectado a un tipo de anclaje específico, solo el fabricante Konkg tiene en el mercado dos mosquetones para su uso deportivo.

**Figura 11. Mosquetón para anclaje específico. Modelo Frog inventado en 1998 por la empresa fabricante Konkg.**



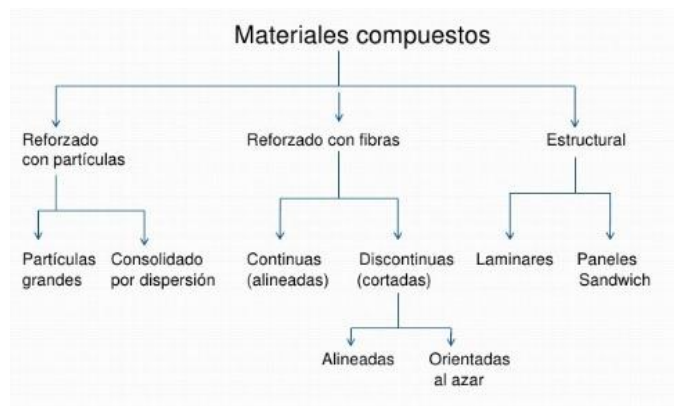
Fuente: Asac Formación, (en línea). 2014

## 2.3 MATERIALES

**2.3.1 Materiales compuestos.** Para aplicaciones en ingeniería que surgen de la necesidad de obtener nuevos materiales, los cuales reciben el nombre de materiales compuestos, que combinan las propiedades de materiales cerámicos, plásticos y metales entre otros. Estos elementos se pueden clasificar en dos principales, la matriz y el refuerzo. De forma habitual se habla de ellos en la industria debido a que mejora las propiedades mecánicas del material, las cuales son diferentes sus componentes por separado. La necesidad de crear estos materiales compuestos surge de mejorar principalmente la ligereza del material, la resistencia y coste entre otras propiedades.

Los materiales compuestos pueden clasificarse según el refuerzo que presente el compuesto de la siguiente manera<sup>1</sup>:

**Figura 12. Clasificación de materiales compuestos según el refuerzo.**



Fuente: BORRACHERO, Bernardo A. Caracterización de materiales compuestos de fibras de carbono y naturales aplicados para la fabricación de componentes de automoción. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. Campus de Alcoi. Departamento de Ingeniería, 2016. p. 7

<sup>1</sup> BORRACHERO, Bernardo A. Caracterización de materiales compuestos de fibras de carbono y naturales aplicados para la fabricación de componentes de automoción. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. Campus de Alcoi. Departamento de Ingeniería, 2016. p. 7

Se observa en la figura 12 que se clasifican en tres tipos de refuerzos, reforzado con partículas, reforzado con fibras y estructural; Hacemos énfasis en los materiales compuestos reforzados con fibras para el presente proyecto. Las propiedades de este tipo de materiales dependen de la dirección en que se miden.

En los materiales compuestos se pueden identificar dos fases principales, el refuerzo es una fase discontinua y la matriz que se presenta como una fase continúa siendo así la menos rígida.

**2.3.1.1 La matriz.** La matriz es la fase continua del material compuesto, así mismo la menos rígida. Este componente brinda al material compuesto estabilidad, transfiriendo cargas al refuerzo; actúa como adherente y mantiene fijas las fibras del refuerzo<sup>1</sup>. Protege el refuerzo evitando que éste se desgaste, el cual está expuesto al ambiente exterior y con ello evita la propagación de las grietas. Existen diferentes tipos de matriz:

a. Matriz polimérica

Este tipo de matriz se caracteriza por su baja densidad, alta tenacidad, alta resistencia a la corrosión, baja resistencia mecánica, bajo costo y es sencilla de conformar. Las condiciones ambientales influyen a la hora de trabajar con este tipo de matriz sobre los polímeros, esto se debe a la humedad y temperatura entre otras. Las matrices poliméricas se dividen en dos tipos:

---

<sup>1</sup> INGENIERÍA MECÁNICA. [Sitio web]. Arahál, España: Estudio de los Materiales Compuestos. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>

#### b. Matriz polimérica termoplástica

Estas matrices están formadas por moléculas unidas débilmente, lo cual las hace más blandas y deformable debido al calor, se endurece al enfriar siendo así un proceso reversible. Un ejemplo de este tipo de matriz es el polipropileno y el polietileno.

#### c. Matriz polimérica termoestable

Este tipo de matriz se caracteriza por estar formada por cadenas reticuladas que hace que la matriz sea permanente y así mismo que la conformación sea irreversible. Se necesita de un proceso de curado para alcanzar su estructura reticulada. Algunos ejemplos serian el poliéster y la resina epoxi.

#### d. Matriz cerámica

La matriz cerámica ofrece una alta resistencia mecánica a alta temperaturas, pero su tenacidad es baja al igual que sus conductividades térmicas y eléctricas. Son resistentes a la compresión y no a la tracción, por lo que el refuerzo en este tipo de matrices suele ser con fibras de alta resistencia a la tracción y alto módulo de elasticidad para así, transferir una buena cantidad de carga al refuerzo. Alúmina y carburo de silicio son algunos ejemplos para este tipo de matriz.

#### e. Matriz metálica

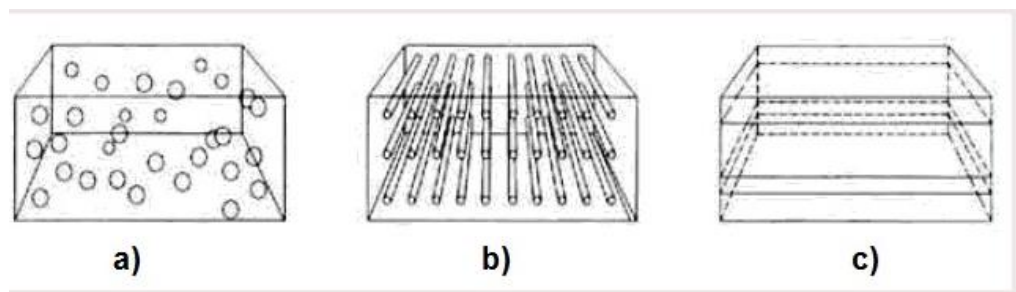
Este tipo de matriz se caracteriza por ofrecer mayor resistencia al material compuesto, buena rigidez y tenacidad a la fractura. La matriz metálica presenta una anisotropía poco visible y tiene un buen comportamiento a altas temperaturas. Se caracterizan por su alta densidad obstaculizando el procesado y mecanizado. Aleaciones de aluminio, de titanio y cobre son los tipos de matriz metálicas.

**2.3.1.2 El refuerzo.** El refuerzo en los materiales compuestos juega el papel de absorber tensiones e incrementa la rigidez y la resistencia del compuesto<sup>1</sup>. Este se divide en dos tipos de elementos:

a. Refuerzos discontinuos

Los refuerzos discontinuos se presentan en forma de partícula y de plaqueta. Estos refuerzos se caracterizan por presentarse en fibras cortas los cuales tienen una longitud mayor que su sección transversal, esto influye en las propiedades del material. Este tipo de refuerzo se utiliza en aplicaciones donde halla poca responsabilidad estructural.

**Figura 13. Tipos de materiales compuestos según el refuerzo.**



Fuente: Ingeniería mecánica, [En línea], 2020.

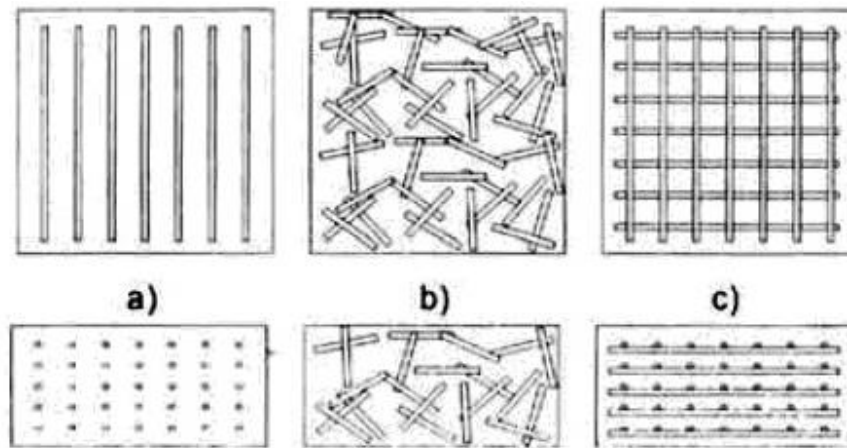
En la figura 13 se observa el compuesto en partículas (a), el cual describe un comportamiento de partículas con configuración desordenada. El compuesto fibroso (b), tiene una configuración ordenada en filas. El compuesto laminado (c), tiene una configuración en hileras debido a su forma.

<sup>1</sup> INGENIERÍA MECÁNICA. [Sitio web]. Arahál, España: Estudio de los Materiales Compuestos. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>

## b. Refuerzos continuos

Este tipo de refuerzos se caracteriza por presentarse en fibras largas, que son hilos en los que la relación longitud entre diámetro debe ser mayor a 100 ( $L/D > 100$ )<sup>1</sup>. El hecho que se presente en fibras largas hace que no interfiera mucho su presentación en las propiedades del material. Este tipo de refuerzo puede presentarse de distintas maneras:

**Figura 14. Refuerzos de tipo continuo para materiales compuestos.**



Fuente: Fuente: Ingeniería mecánica, [En línea], 2020.

En la figura 14 podemos observar el refuerzo continuo en fibras largas(a), el cual tiene una configuración organizada y en hileras. El refuerzo continuo laminado (b), el cual se compone de un número finito de láminas con diferentes orientaciones. El refuerzo continuo tejido (c), el cual es rígido y resistencia a la flexión con alta capacidad de aislamiento, presenta una configuración ordenada y entrelazada.

**2.3.2 Nylon.** Hoy en día la innovación en manufactura aditiva debido a los materiales compuestos ha creado la necesidad de buscar materiales que ofrezcan

<sup>1</sup> INGENIERÍA MECÁNICA. [Sitio web]. Arahál, España: Estudio de los Materiales Compuestos. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>

buenas propiedades y que su campo de aplicación sea más amplio. Es así como el nylon aparece en la historia para ser utilizado en materiales compuestos. El nylon es un material termoplástico con excelentes propiedades como dureza, resistencia a la abrasión, baja densidad y fricción<sup>1</sup>. Cuando se emplean matrices de nylon en un material compuesto se tiene en cuenta que cuenta con una baja rigidez y resistencia, por lo cual se utilizan refuerzos tales como fibra de vidrio o de carbono para poder mejorar estas debilidades.

**2.3.3 Fibra de carbono.** En la industria la fibra de carbono llama la atención debido a su ligereza en comparación al acero, sosteniendo la misma resistencia <sup>2</sup>. La fibra de carbono consiste en láminas de átomos de carbono arreglados en una configuración hexagonal<sup>3</sup>.

La fibra de carbono es fabricado a partir de un polímero llamado poliacrilonitrilo (PAN), el cual cuenta con una alta resistencia mecánica y más flexible que otras aleaciones en acero. Es empleado en situaciones donde se somete a altas cargas cíclicas y presenta propiedades muy elevadas. Una de las propiedades más importante que permite comparar la fibra de carbono con otros materiales, es el módulo elástico, el cual debe ser más rígido que la matriz, esto se debe a que la matriz transmite esfuerzos a las fibras de refuerzo proporcionando tenacidad y ductilidad al compuesto, soportando así mayor fuerza y tensión<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> GUERRERO, Diego Tobías. Cálculo de la Estructura del Monocasco en Fibra de Carbono Prepreg de Vehículo Shell Eco – Maratón, Máster Universitario en Diseño y Fabricación integrada Asistidos por Computador. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2019. p. 9-10

<sup>2</sup> ORTEGA, Pedro Santiago. Análisis de Autopartes de Fibra de Carbono de Geometría Simple Mediante Software. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingeniería Mecánica Automotriz. 2018. P. 10-12

<sup>3</sup> STUPENENGO, Franco. Materiales y Materias Primas. Barcelona: República Argentina, 2011. p.10. ISBN 987-55-0125-1

<sup>4</sup> BORRACHERO, Bernardo A. Op. Cit.

## 2.4 MANUFACTURA ADITIVA

La manufactura aditiva es el término general para todas las tecnologías que se basan en una representación geométrica que crea objetos físicos por la adición de capa por capa de material<sup>1</sup>.

Esta tecnología surgió desde la primera impresora 3D en 1984 por la empresa 3D Systems Corporation en estados unidos, su uso se ha propagado considerablemente en distintas aplicaciones como la medicina, ingeniería, arquitectura, escultura, juguetes, entretenimiento entre otras disciplinas. Se estableció la normativa de estándar internacional ISO/ASTM 52900-2015, la cual conceptualiza la manufactura aditiva<sup>2</sup>.

La impresora tarda un tiempo estipulado dependiendo de la complejidad del dibujo, se fabrica en cualquier tipo de software CAD-

La manufactura aditiva representa un camino en cuanto a eficiencia energética, costos de producción y ahorro de tiempo al producir objetos debido a las siguientes razones:

- ✓ Se fabrica directamente evitando múltiples pasos de fabricación de moldes, yesos, y/o formando herramientas para conseguir el mismo producto final, se reducen tiempos y costos de producción
- ✓ Al fabricar objetos en una sola pieza, incluyendo aquellos de estructuras complejas y con resolución de detalle de 0.1mm, se reduce el número de partes para producir un objeto. Una ventaja clave para algunos sectores industriales ofreciendo una reducción significativa de costos

---

<sup>1</sup>CHRISTOPH, Rainer. MUÑOZ, Romero. HERNÁNDEZ, Ángel. Manufactura Aditiva. *Revista Realidad y Reflexion*.2016, p. 2. ISSN 1992-6510.

<sup>2</sup> VELÁSQUEZ COSTA, José Antonio. Procesos de Manufactura con Tecnología 3D. *Revista de Investigación Publicitaria CTSCAFE*. [en línea]. 2019. [Consultado 19 de julio 2020]. ISSN 2521 - 8093. DOI: <http://ojs.ctscafe.pe/ojs-3.1.0-1/index.php/ctscafe/article/view/167>

- ✓ Se usa solo el volumen de material que conforma el objeto, a diferencia de las técnicas de producción mecanizado. Se evita el sobre costo y material de desperdicio, energía empleada y por lo tanto el impacto ecológico de su producción.

La manufactura aditiva, en la industria, es la responsable de producir objetos con un gran grado de complejidad, menor tiempo y energía empleados, además ofrece un mayor valor agregado cuando se desea la personalización de un objeto y donde extensos inventarios no son prácticos.

Tipos de procesos de Manufactura Aditiva según la norma ISO/ASTM 529000-2015<sup>1</sup>.

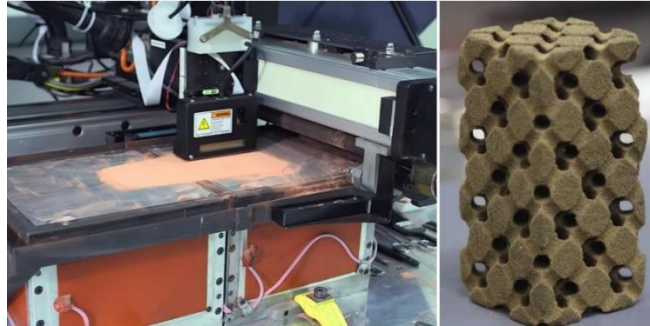
**2.4.1 Blinder Jetting (Inyección de aglutinante).** La inyección de aglutinante consiste en el proceso por el cual un agente líquido de pegado es depositado selectivamente para unir materiales en polvo. El aglutinante debe de tener viscosidad, tensión superficial, densidad de tinta y propiedades adecuadas para evitar el taponado de las boquillas de la impresora 3D.

Cada capa se imprime de una forma similar a como lo hacen las impresoras de papel tradicionales de chorro de tinta, en las que la tinta se aplica en la parte superior hasta finalizar el proceso. La tecnología de inyección de aglutinante trabaja de una forma muy similar, pero usando resinas plásticas y una capa de polvo, en lugar de una hoja de papel. Este proceso se va repitiendo capa tras capa hasta imprimir completamente el objeto.

---

<sup>1</sup> VELÁSQUEZ COSTA, José Antonio. Procesos de Manufactura con Tecnología 3D. Revista de Investigación Publicitaria CTSCAFE. [en línea]. 2019. [Consultado 19 de julio 2020]. ISSN 2521 - 8093. DOI: <http://ojs.ctscafe.pe/ojs-3.1.0-1/index.php/ctscafe/article/view/167>

**Figura 15. Inyección por solidificación de polvo.**



Fuente: Ctscafe.pe, [En línea], 2019

**2.4.2 Directed energy deposition (Deposición de energía directa).** Proceso de manufactura aditiva en el cual una fuente enfocada de energía térmica (laser, rayo de electrones o arco de plasma) se usa para fusionar materiales derriéndolo mientras está siendo depositado.

Este proceso combina alambre metálico o polvo con una fuente de energía para dejarlos sobre una bandeja de construcción o directamente sobre alguna pieza metálica, es un proceso similar a la soldadura, debido a esto se usa comúnmente para reparar y mantener las piezas existentes.

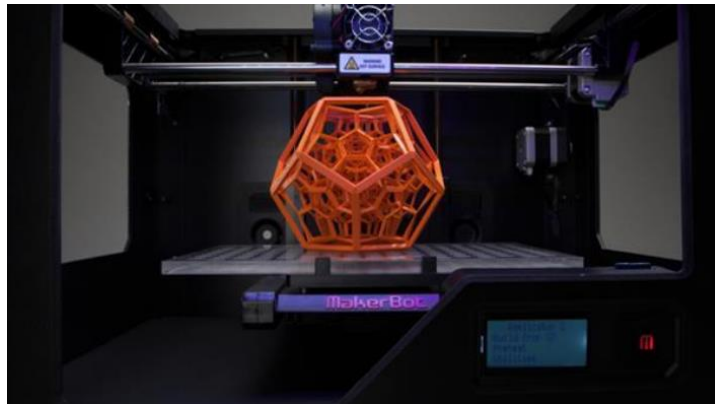
**Figura 16. Máquina de impresión por deposición de energía directa.**



Fuente: Ctscafe.pe, [En línea], 2019

**2.4.3 Material extrusión (Extrusión de material).** Es el método más común usado hoy en día debido a la adopción generalizada en impresoras 3D de escritorio. El principio básico detrás de la extrusión de material es la deposición de un material a través de una boquilla en ubicaciones discretas en un volumen de construcción. Para que este proceso sea exitoso la maquina requiere tres ejes de movimiento, un material que puede fluir a través de una boquilla y controlar el flujo de material. Le extrusión de material típicamente requiere cuatro actuadores para una configuración de extrusora única para lograr tres ejes de movimiento más un eje de extrusión.

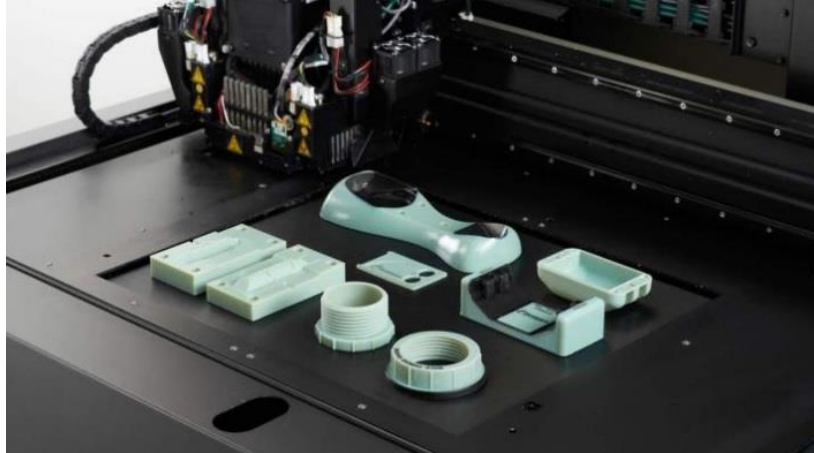
**Figura 17. Impresora 3D por extrusión de material.**



Fuente: Ctscafe.pe, [En línea], 2019

**2.4.4 Material Jetting (Inyección de material).** Proceso de manufactura aditiva el cual construye los elementos 3D mediante material por gotas y son depositadas selectivamente. Este proceso de manufactura utiliza múltiples cabezales para aumentar la construcción y para imprimir diferentes materiales, un material se utiliza para crear estructuras de soporte, mientras que un segundo se utiliza para construir el modelo.

**Figura 18. Impresora 3D de inyección de material.**



Fuente: Ctscafe.pe, [En línea], 2019

**2.4.5 Powder bed fusión (Fusión por leche de polvo).** Proceso en el cual una energía termal selectiva fusiona regiones de una cama de polvo.

Las propiedades de las piezas fabricadas mediante la fabricación de aditivos de fusión en polvo dependen de la estrategia del proceso, así como las características del lecho en polvo. Este proceso permite la fabricación de estructuras complejas cercanas a la forma de red en un solo paso de producción.

**Figura 19. Impresora 3D de fusión por lecho de polvo.**



Fuente: Ctscafe.pe, [En línea], 2019

**2.4.6 Sheet Lamination (Laminación de hojas).** Proceso de manufactura aditiva en el cual láminas de un material son pegadas para formar un todo. Las capas de papel revestido con adhesivo, plástico o laminado metálicos se pegan sucesivamente y se cortan para darles forma con un cuchillo o cortador laser.

**Figura 20. Pieza realizada en impresora 3D de laminación de hojas.**

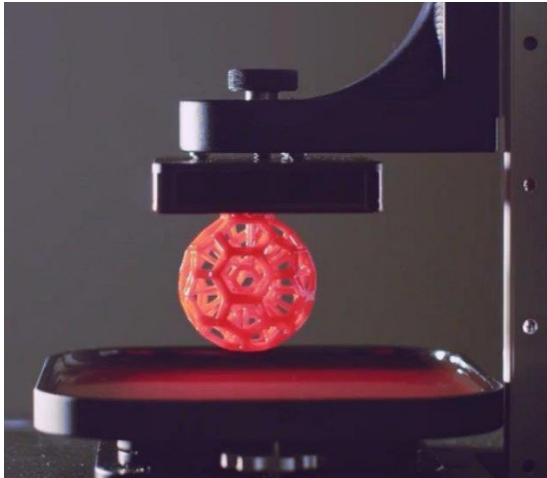


Fuente: Ctscafe.pe, [En línea], 2019

**2.4.7 VAT photopolymerization (Beta de foto polimerización).** Proceso de manufactura en el cual un líquido foto polímero dentro de una batea (VAT) se cura selectivamente mediante un proceso de fotopolimerización, una luz activadora (luz de laser UV)

El modelo se construye capa por capa, se utiliza una luz ultravioleta (UV) para curar o ir endureciendo la resina en el momento necesario, mientras una plataforma mueve el objeto que se está haciendo hacia abajo después de que se haya curado cada nueva capa.

**Figura 21. Impresora 3D de foto polimerización.**



Fuente: Ctscafe.pe, [En línea], 2019

## **2.5 IMPRESORA FDM MARKTWO 3D**

La impresora 3D MarkTwo, es una impresora dedicada al uso industrial, fabrica piezas que combinan fuerza y resistencia. Desarrollada por el fabricante Markforged, la impresora 3D tiene dos extrusores para combinar materiales de impresión: uno a base de plástico (Nylon u Ónix) y un material compuesto de refuerzo que incluye: filamento de fibra de carbono, filamento de fibra de vidrio, fibras de filamento de vidrio HSHT y filamento Kevlar<sup>1</sup>.

La impresora 3D Markforged se basa en un proceso de extrusión de filamentos y puede imprimir piezas común tamaño máximo de 320x132x154 mm con un espesor de capa mínimo de 100 micras y una velocidad máxima de 280 mm/ s<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> MARKFORGED. [Sitio web]. Boston: La Impresora 3D MarkTwo Desktop. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <https://markforged.com/mark-two/>

<sup>2</sup> Ibid.

**Figura 22. Impresora MarkTwo.**



Fuente: 3D Native, [En línea] 2020.

## **2.6 ELEMENTOS FINITOS**

El método de los elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuo, es una forma para simular condiciones de carga y restricciones en un diseño determinado<sup>1</sup>, para corroborar si este diseño cumple o no con las condiciones propuestas.

El MEF utiliza ciertos términos, que son indispensable conocerlos a la hora de introducirnos en este campo, los cuales son: nodo, condición de contorno, grado de libertad, dominio, elemento e incógnita.

- **DOMINIO:** Espacio geométrico del contorno al cual se va a estudiar. Puede ser cualquier figura geométrica un volumen, área o línea.
- **CONDICIÓN DE CONTORNO:** Limitantes de comportamiento en el contorno o sistema, que se rigen como constantes en el análisis.
- **ELEMENTO:** Esto se rige debido al tipo de dominio, si es un dominio lineal se crearía un elemento unidimensional o si este se trata de un área y volumen el elemento sería bidimensional, tridimensional respectivamente.

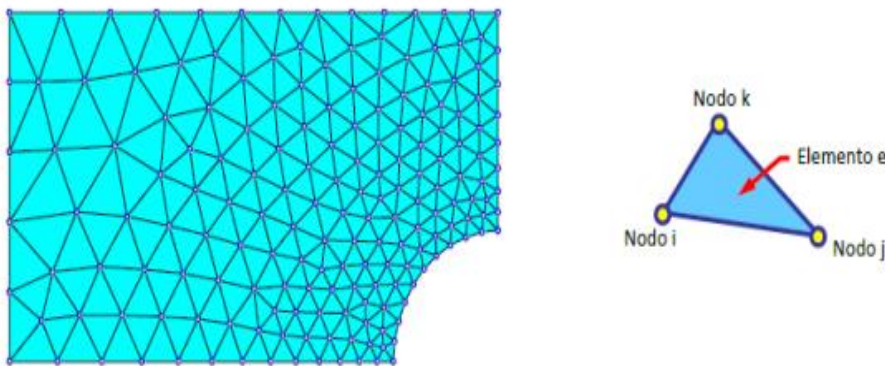
---

<sup>1</sup> VALERO, Eduardo. Aportaciones al Estudio de las Máquinas Eléctricas del Flujo Axial Mediante la Aplicación del Método de elementos Finitos, Tesis Doctoral. España: Universidad politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Eléctrica, UPC. 2004. p. 111-112

- NODO: Son puntos que coinciden en el elemento y pueden concernir al mismo tiempo a varios nodos. Estos generan las ecuaciones que permiten desarrollar el análisis de dicho elemento.
- MALLA: Ítems como elementos y nodos se le designa malla. Esta depende de la cantidad de elementos y nodos que existan en el dominio, depende del tamaño de la malla la calidad del análisis del elemento.
- GRADO DE LIBERTAD (GDL): En MEF se denomina GDL cuando el sistema utiliza el mínimo de condiciones o parámetros independientes en el elemento.

Se divide en un número finito de partes ‘elementos’, cuyo comportamiento se asocia a un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados ‘nodos’, estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes<sup>1</sup>.

**Figura 23. Nodos y elementos.**



Fuente: Guerrero (2019).

- ✓ La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> TORRES CASTILLO, Cristina Sofía. Síntesis de nanoestructura de Óxido de Grafeno Funcionalizadas para el Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas del Nylon 6.6. México: Instituto Tecnológico de Ciudad de México, División de Estudios de Posgrado e Inversión, 2017. p. 24-25

<sup>2</sup> Ibíd

- ✓ Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos<sup>1</sup>.
- ✓ El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma<sup>2</sup>.

Por lo tanto, el MEF se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se cataloga como discretización del modelo<sup>3</sup>. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este cuerpo, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Por tanto, es una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

**2.6.1 Aplicación del método.** La forma más genérica de entender el método, al tiempo que la más extendida, es el ejercicio de la aplicación a una placa sometida a tensión plana. El MEF se podría entender desde un punto de vista estructural como una generalización del cálculo matricial de estructuras al análisis de sistemas continuos<sup>4</sup>.

Un elemento finito “e”, viene definido por sus nodos (i, j, k) y por el contorno formado por las líneas que los define. Los desplazamientos “u” de cualquier punto del elemento se aproximan por un vector de columna U.

---

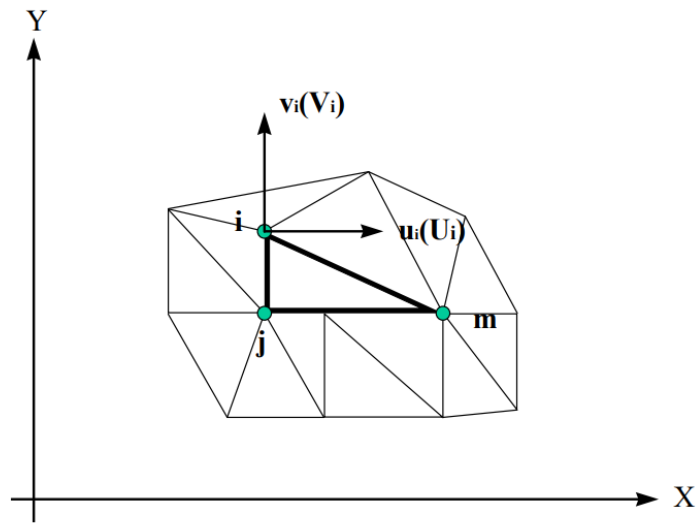
<sup>1</sup> Ibíd

<sup>2</sup> Ibíd

<sup>3</sup> Ibíd

<sup>4</sup> Ibíd

**Figura 24. Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamientos de los nodos.**

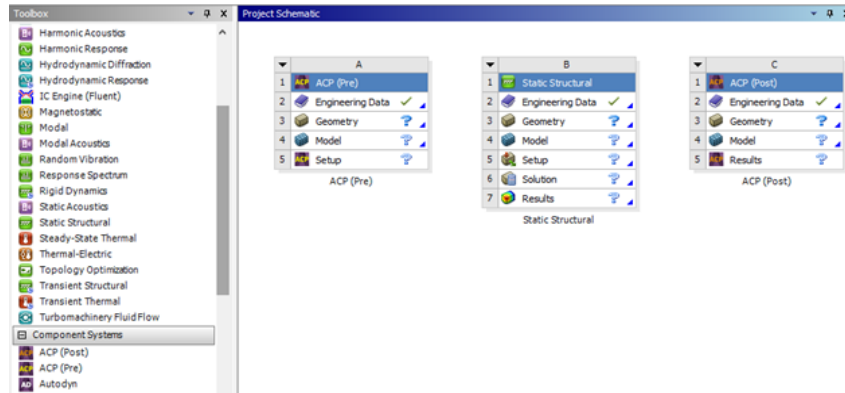


Fuente: Valero (2004).

## **2.7 INTRODUCCIÓN AL ANSYS WORKBENCH**

ANSYS Workbench permite ejecutar análisis desde simples hasta complejos utilizando MEF, su interfaz y las cantidades de herramientas de este software hace que sea uno de los programas más utilizados en el ámbito estudiantil e ingeniería, la interfaz principal donde se va a generar el trabajo de lo que se quiera analizar es la siguiente.

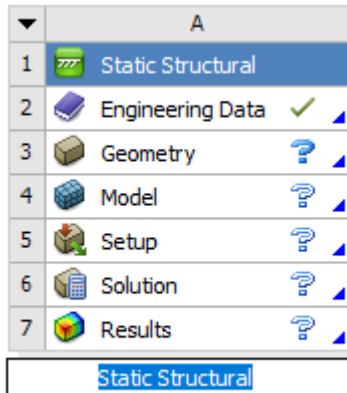
**Figura 25. Interfaz ANSYS WORKBENCH.**



Para crear una simulación básica en ANSYS Workbench se denominan los siguientes pasos:

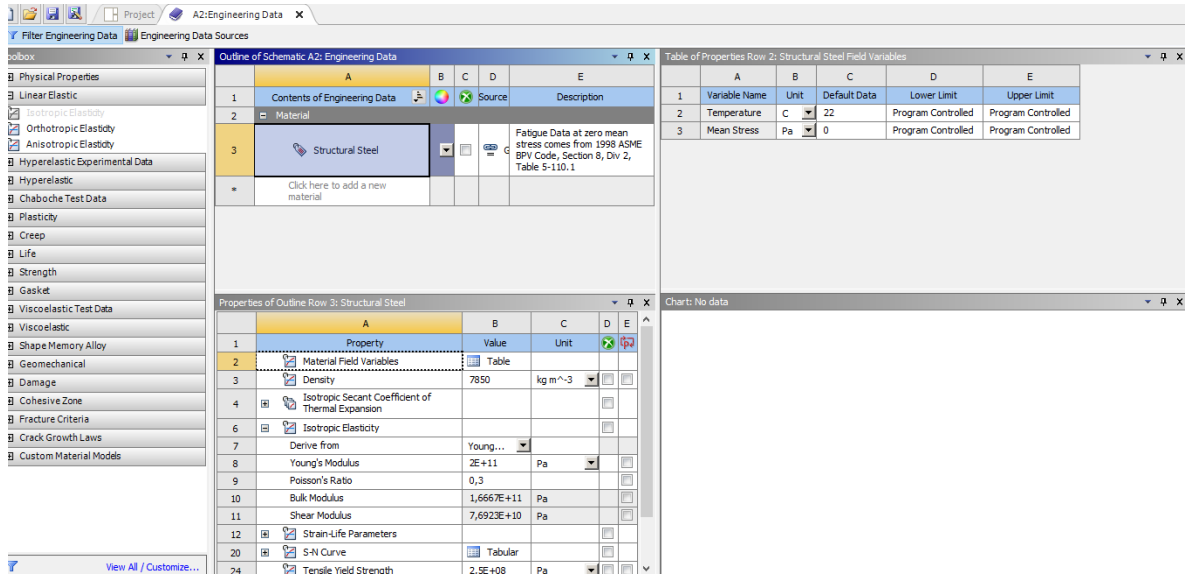
- Elegir el tipo de analysis systems que se quiere estudiar, por ejemplo, Static Structural.

**Figura 26. Static structural.**



- Elegir el material del elemento a estudiar.

**Figura 27. Engineering data.**

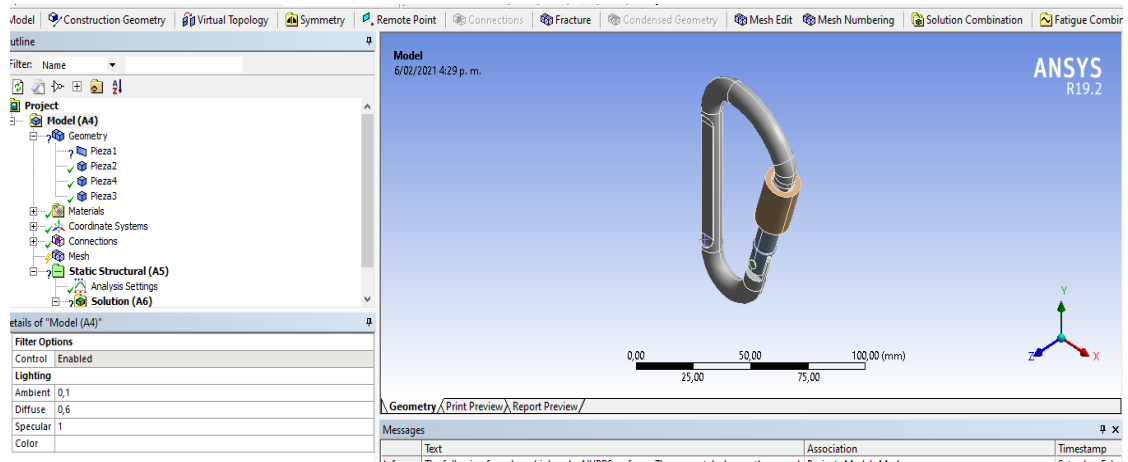


Podemos observar que hay variedades de materiales, y también podemos introducir un material que el software no tenga, claramente teniendo las propiedades de este.

- Creación o importación de la geometría

En esta sección, el ANSYS workbench nos ofrece la posibilidad de crear el elemento en geometry, spaceclaim o importarla.

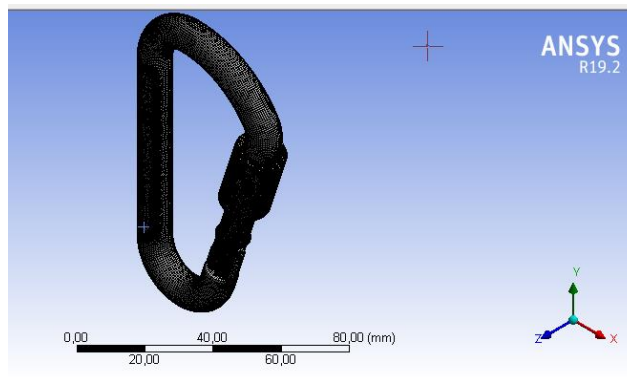
**Figura 28. Modelo del mosquetón.**



- La malla (mesh)

Se genera una malla en el elemento, la cual es la que va a regir cuantos elementos y nodos tiene la geometría creada.

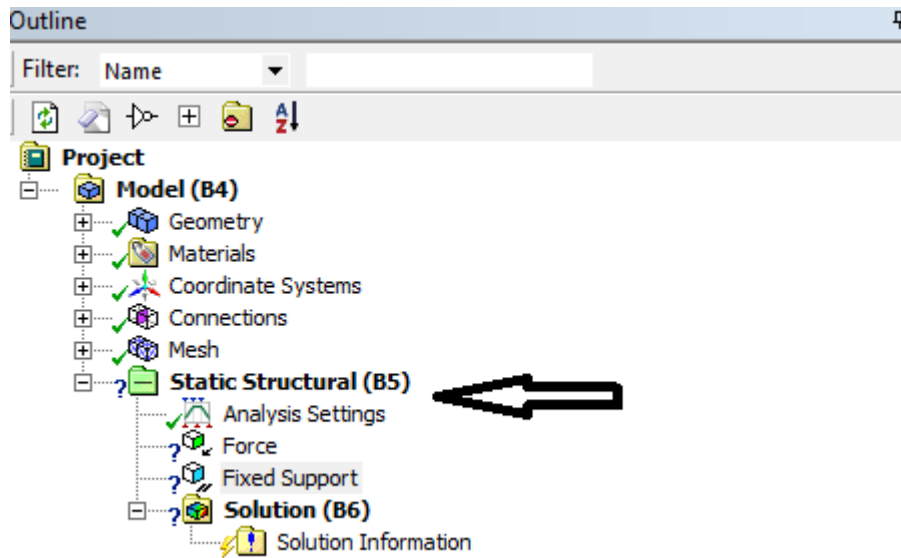
**Figura 29 Malla.**



- Static structural

Donde aplicamos las condiciones de nuestro elemento, sean cargas, soportes, etc.

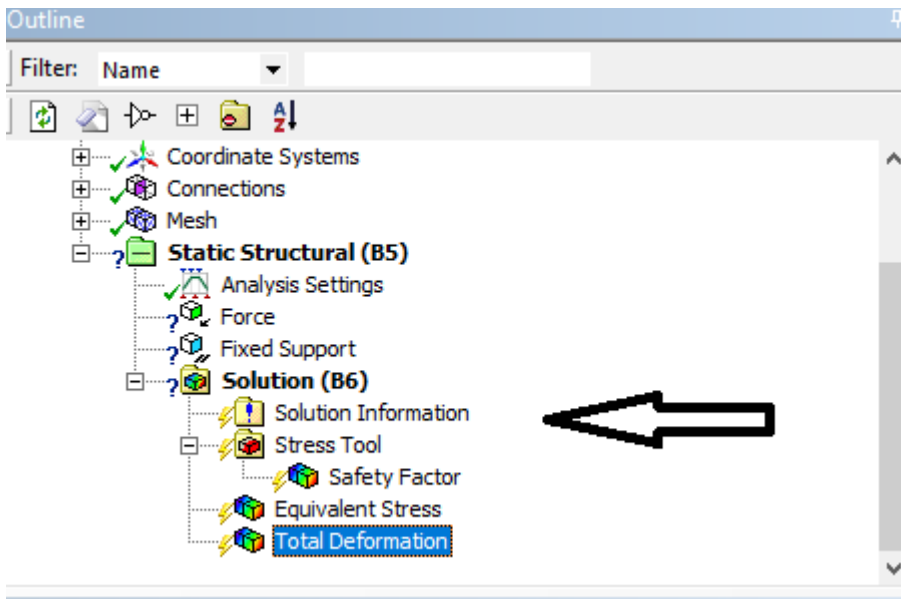
**Figura 30. Análisis de condiciones**



- Solution

Por último, generamos los análisis pertinentes a nuestros elementos, como, por ejemplo, equivalent stress(von-misses), factor de seguridad, deformación etc.

**Figura 31. Solución del análisis**



ANSYS Workbench muestra muchas posibilidades de estudio para nuestros elementos, depende de lo que se quiere simular, sería la complejidad del uso de este software.

### **3. INTRODUCCIÓN AL PREDISEÑO Y DISEÑO DEL MOSQUETON HMS.**

En este proyecto se diseña un prototipo inicial el cual es el prediseño, un mosquetón de seguridad tipo HMS convencional de aluminio, este será la base de comparación con el diseño final. Este prototipo se realizó en SOLIDWORKS en primera medida para ser importado a ANSYS y así realizar el estudio estructural con cargas tensionales, longitudinales y transversales.

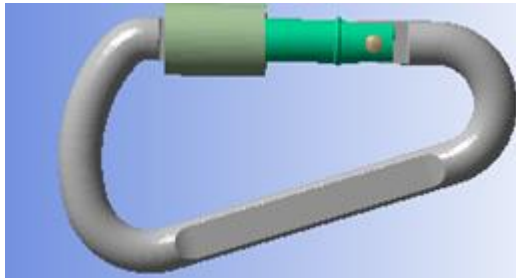
Según la normal EN12275:2013, exige que los mosquetones de seguridad deben tener una resistencia de 20kn en el eje longitudinal, en este caso el eje principal debido a que es un mosquetón HMS, y una resistencia de 7kn en el eje transversal, se aclara que para este proyecto vamos hacer una simulación del mosquetón HMS en una geometría menor al real, es decir a una geometría simplificada, debido a que el software ANSYS Student Workbench tiene un límite de recursos, el cual al hacer el estudio del mosquetón en dimensión real, no me genera el estudio de malla debido, a la causa anterior se eligio una geometría del mosquetón que me pudiese generar una malla precisa para dicha geometría, de todas maneras esto no se opone a las condiciones de contorno reales, las cuales son las que solicitaran en las simulaciones del prediseño y diseño.

Las condiciones de cargas elegidas fueron de 1000N, 700N longitudinal y transversalmente respectivamente, las cuales se adaptan a la geometría elegida para la simulación del prediseño y diseño.

### 3.1 PREDISEÑO

**3.1.1 Geometría.** El mosquetón consta de un conjunto de 4 piezas que son: el gancho, el perno, la barra de unión y la rosca. Para el análisis se decide emplear únicamente el gancho pues éste, es el que presenta la mayor información sobre el comportamiento mecánico del mosquetón. Los demás elementos se tomaron como un comportamiento de sólido rígido, visto en la figura 32.

**Figura 32. Geometría del mosquetón**



De hecho, para simplificar aún más se tomó como referencia la geometría que se muestra en la figura 33:

**Figura 33. Geometría simplificada**



**3.1.2 Materiales.** Para el prediseño se toma un material elástico lineal isotrópico, el cual es un aluminio aleado debido a que es bastante común en estos mosquetones HMS convencionales.

**Tabla 1. Propiedades del aluminio**

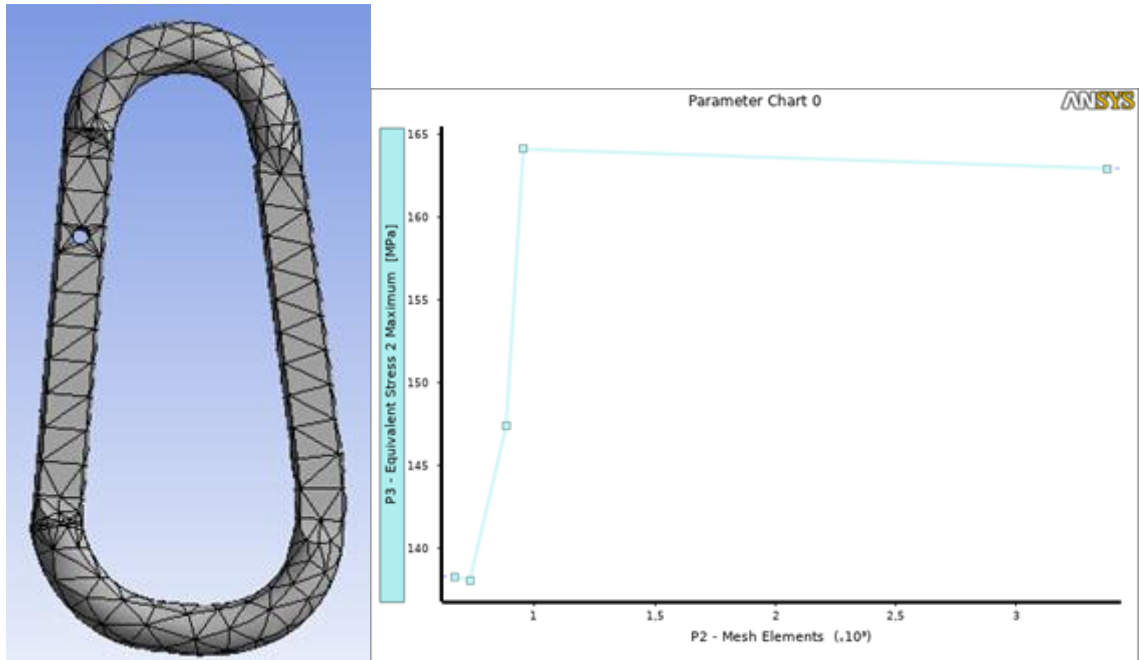
Propiedades del Aluminio			
Módulo de Tensión $E$ [Gpa]	Módulo de poisson $\gamma$	Límite elástico $S_y$ [Mpa]	Esfuerzo Ultimo a la tensión $S_{ut}$ [Mpa]
71,7	0,33	472	572

Estos valores fueron tomados del software ANSYS Workbench, en el módulo de Engineering Data.

**3.1.3 Simulación ANSYS.** En este proyecto se generó un sistema de análisis estructural para desarrollar la simulación del mosquetón de seguridad tipo HMS, que es nuestro prediseño. Dentro de este análisis se escoge el material deseado que para el prediseño es aluminio con sus respectivas propiedades descritas anteriormente. Luego se debe importar la geometría vista en la figura 32.

**3.1.4 Malla.** En el mallado se escogió un mallado de tetraedros dominantes, ya que presenta una mejor aproximación a la geometría real a expensas de una peor precisión numérica, sin embargo, este problema se puede solventar al aumentar el número de elementos. Se realiza un análisis de convergencia a la malla, permitiendo establecer el tamaño máximo adecuado. La figura 34 muestra el mallado escogido y la gráfica de convergencia.

**Figura 34. Mallado tetraedro.**

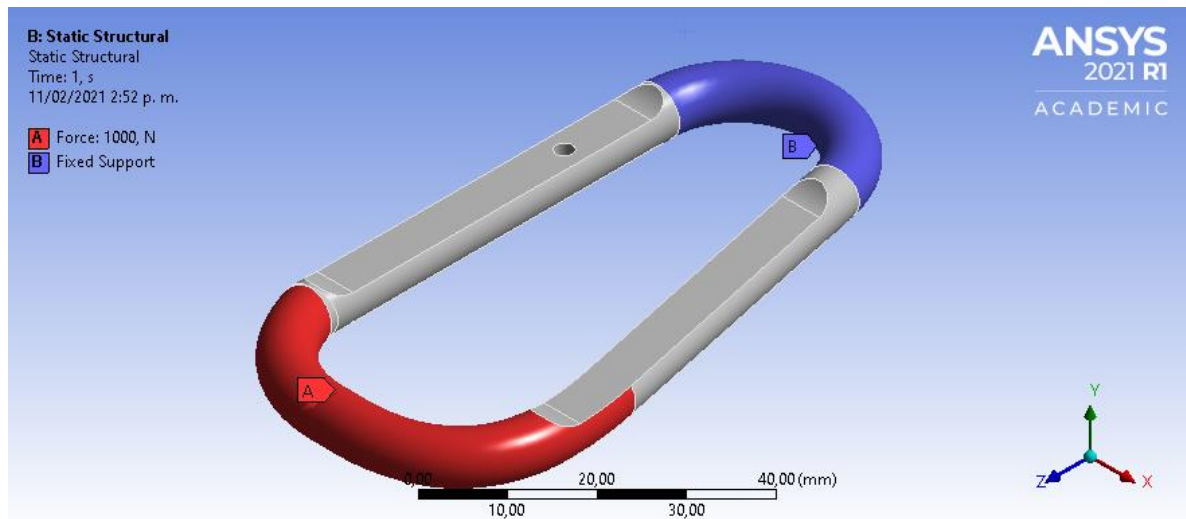


Se escoge la malla con cerca de 1000 elementos lo cual es un parámetro en nuestra simulación del prediseño, pues representa una solución muy precisa y a la vez rápida de calcular.

### 3.1.5 Carga Longitudinal

#### 3.1.5.1 Condición de contorno

**Figura 35. Condición de contorno longitudinal**



Podemos observar las condiciones de contorno del mosquetón HMS convencional, para una solicitud de carga longitudinal.

Un soporte fijo en la zona de menos radio, debido a que su solicitud en reuniones de escalada, es bastante similar a la condición de contorno que se genera en el software de ANSYS Workbench, y una carga de 1000 N en la zona de mayor radio del mosquetón HMS.

**3.1.5.2 Resultados.** Se desea conocer los esfuerzos equivalentes de Von Mises, el desplazamiento máximo, fuerza de reacción y el factor de seguridad.

Figura 36. Esfuerzo equivalente longitudinal.

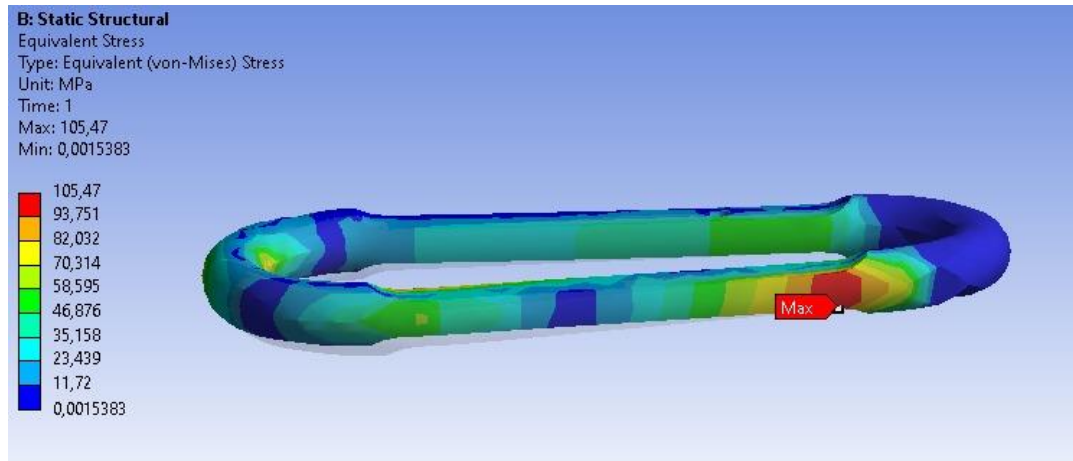
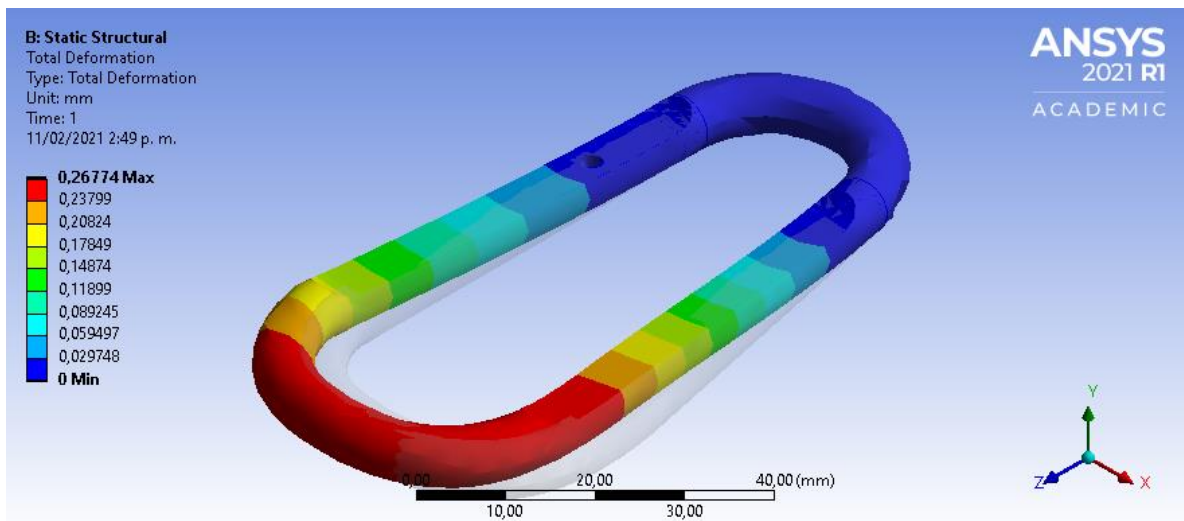
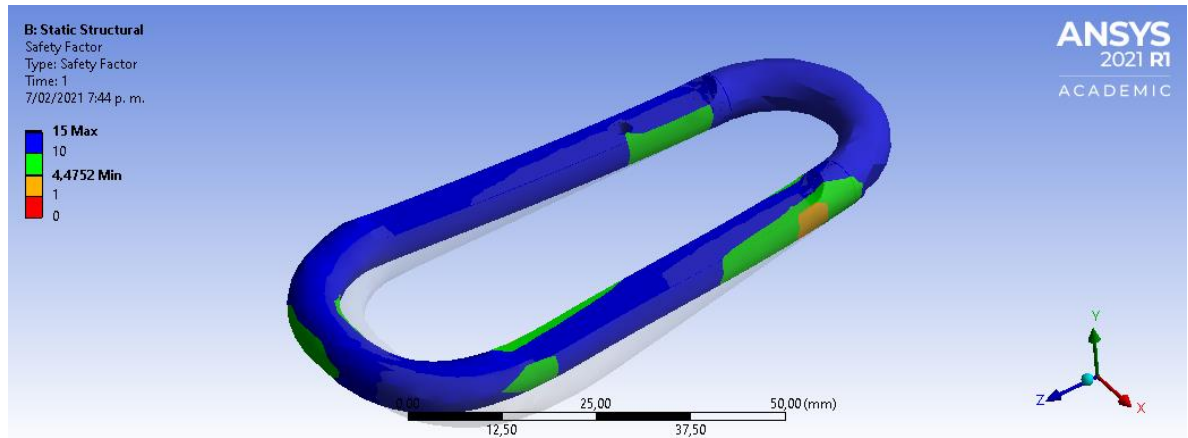


Figura 37. Desplazamiento máximo.

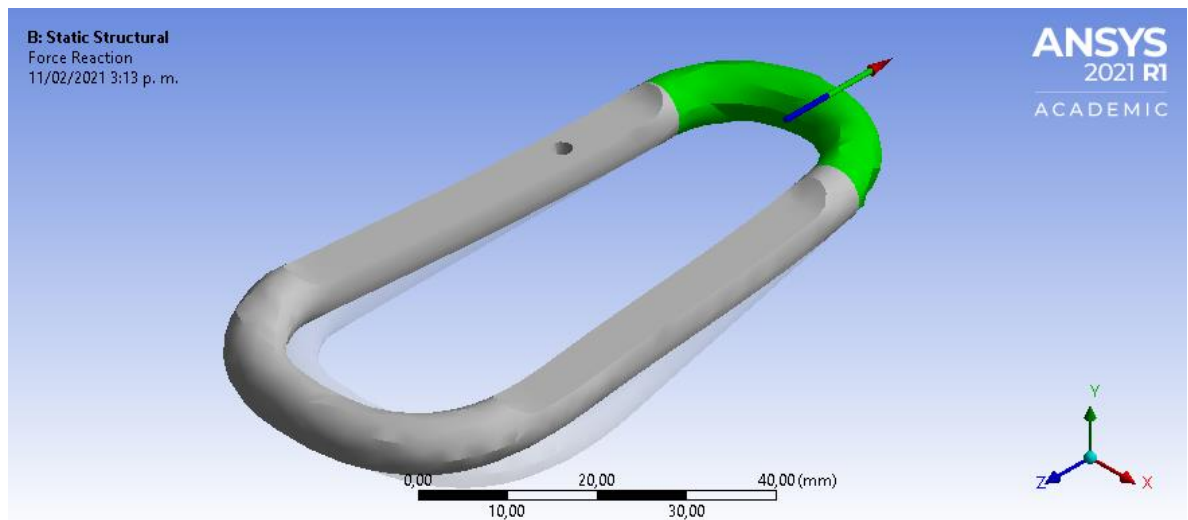


**Figura 38. Factor de seguridad**



Analizando los resultados de la simulación, con las condiciones de contorno, la tensión de von mises que se obtiene es de **105.47 MPa**, lo cual no supera el límite elástico del material, observamos que el esfuerzo máximo ocurre en el interior del mosquetón y que los cambios de curvatura también son zonas críticas. El desplazamiento máximo por su parte se mantuvo en niveles aceptables, con tan solo **0,26774 mm** y un factor de seguridad mínimo de **4,47**.

**Figura 39. Fuerza de reacción carga longitudinal**



**Figura 40. Detalles de la fuerza de reacción- carga longitudinal**

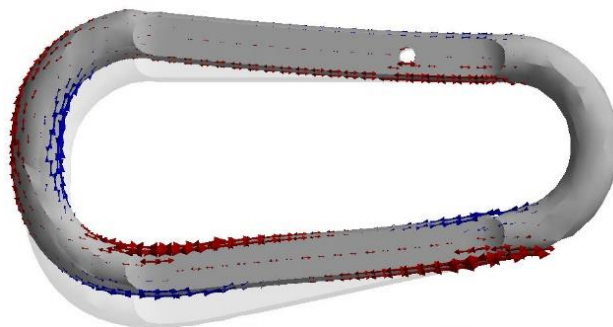
Details of "Force Reaction"	
Suppressed	No
<b>Options</b>	
Result Selection	All
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
<b>Results</b>	
<b>Maximum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	2,7644e-009 N
<input type="checkbox"/> Y Axis	1,2966e-008 N
<input type="checkbox"/> Z Axis	-999,63 N
<input type="checkbox"/> Total	999,63 N
<b>Minimum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	2,7644e-009 N
<input type="checkbox"/> Y Axis	1,2966e-008 N
<input type="checkbox"/> Z Axis	-999,63 N
<input type="checkbox"/> Total	999,63 N
<b>Information</b>	

Podemos observar que en la figura 40, me muestra el valor aproximadamente de los 1000N, esto se hace debido a que la carga, tanto como en la zona del radio mayor y menor del mosqueton HMS conveccional , debe soportar esa carga longitudinal respectivamente según la norma EN12275:2013.

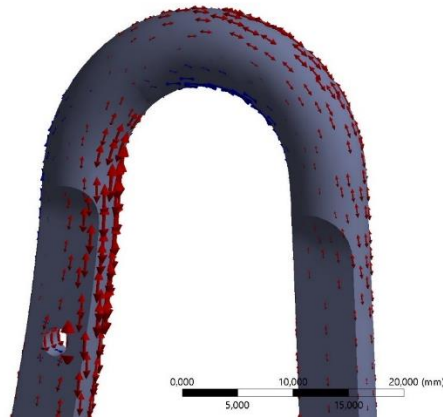
**Figura 41. Dirección de los esfuerzos principales**

B: Static Structural  
 Vector: Principal Stress  
 Type: Vector Principal Stress  
 Units: MPa  
 Time: 1

Maximum Principal  
 Middle Principal  
 Minimum Principal



**Figura 42. Dirección de esfuerzos principales**

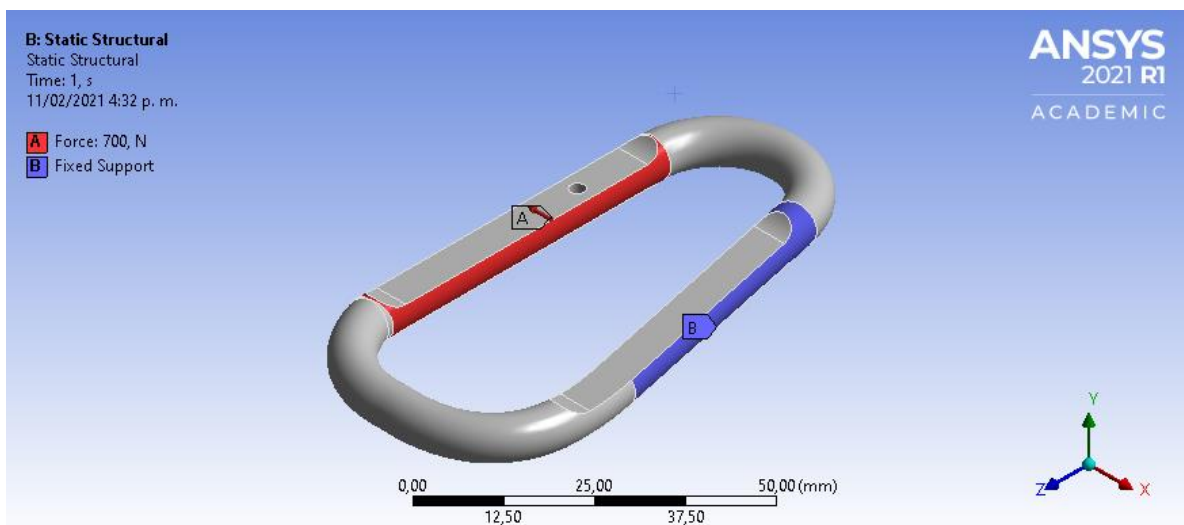


Luego de observar la distribución de esfuerzos, estos vectores principales siguen el contorno de la geometría

### 3.1.6 Carga Transversal

#### 3.1.6.1 Condicion de contorno

**Figura 43. Condicion de contorno - transversal**



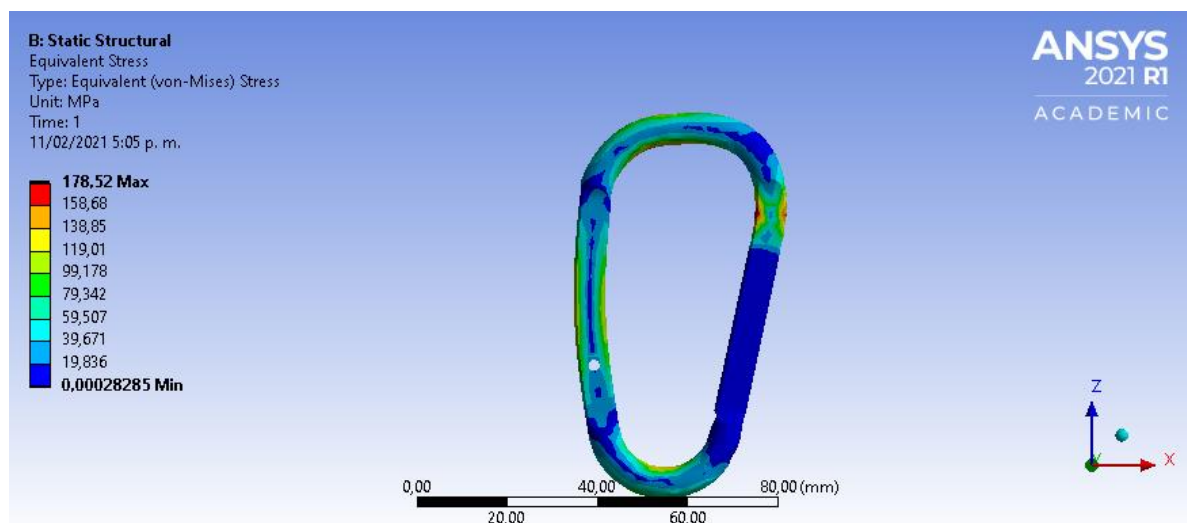
Podemos observar las condiciones de contorno del mosquetón HMS convencional, para una solicitud de carga transversal.

Esta carga transversal, es debido a la solicitud de la Norma EN12275:2013, de un mosquetón convencional tipo HMS. Un soporte fijo en la zona lateral del mosquetón HMS y una carga transversal en su contra parte. Infortunadamente es el eje más débil, ya que es contraproducente aplicar al mosquetón la condición mostrada en la figura 43 debido a que su aplicación no es recomendada para cargas transversales a su eje principal.

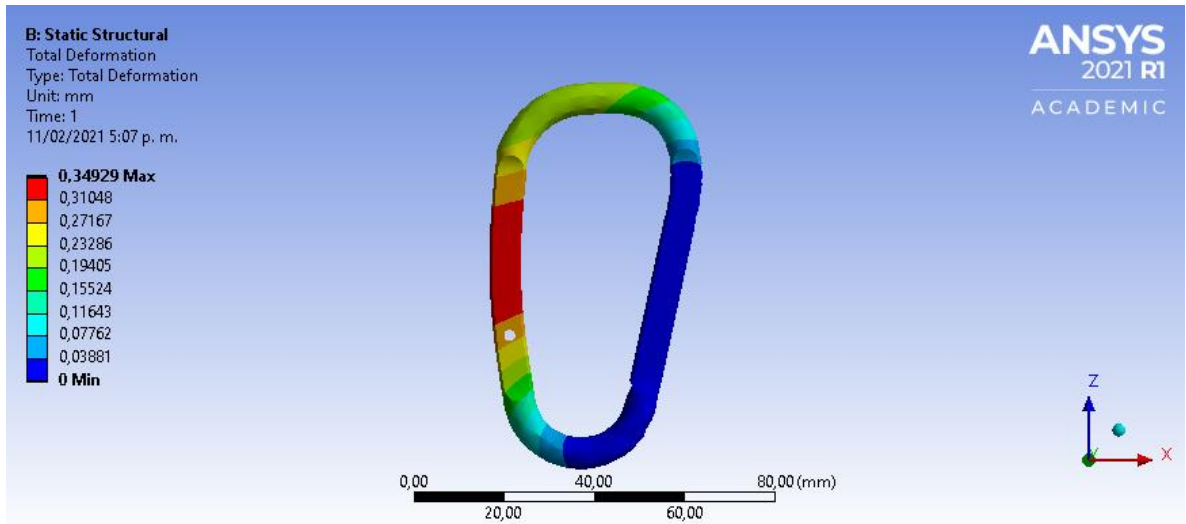
Se aplica una carga transversal de 700N, esta carga fue escogida, debido a que el eje transversal es el más débil, lo cual hace que su carga aplicada sea menor que la del eje longitudinal-principal del mosquetón HMS.

**3.1.6.2 Resultados.** Se desea conocer los esfuerzos equivalentes de Von Mises, el desplazamiento máximo, fuerza de reacción y el factor de seguridad.

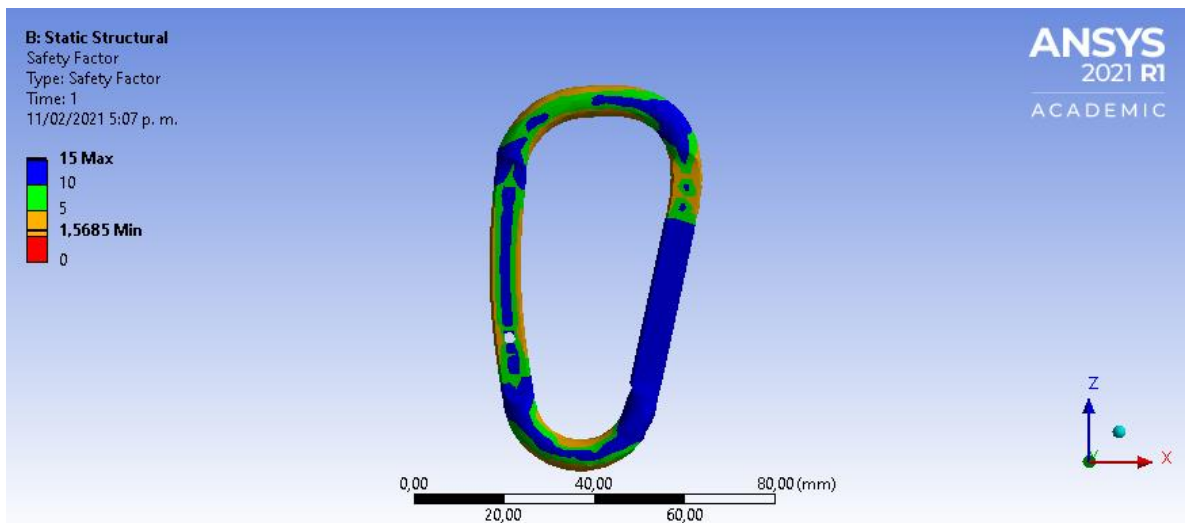
**Figura 44. Esfuerzo equivalente-transversal**



**Figura 45. Desplazamiento máximo-transversal**

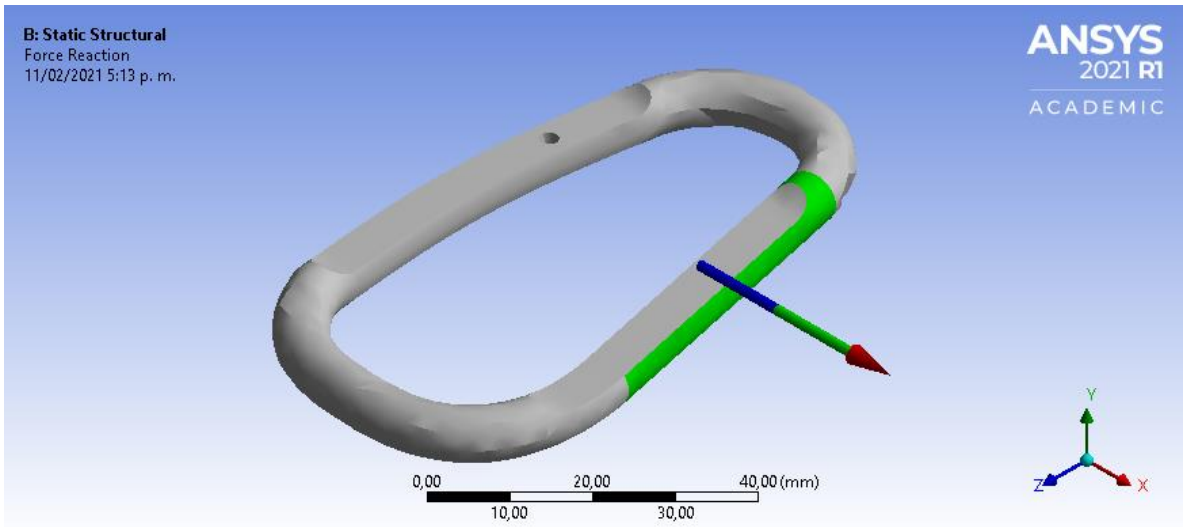


**Figura 46. Factor de seguridad-transversal**



Analizando los resultados de la simulación con las condiciones de contorno, la tensión de von mises que se obtiene es de **178.52 MPa**, lo cual no supera el límite elástico del material, observamos que el esfuerzo máximo, ocurre al interior del mosquetón y que en los cambios de curvatura también son zonas críticas. El desplazamiento máximo, por su parte se mantuvo en niveles aceptables, con tan solo **0,34929 mm** y un factor de seguridad mínimo de **1,568**.

**Figura 47. Fuerza de reacción-carga transversal**

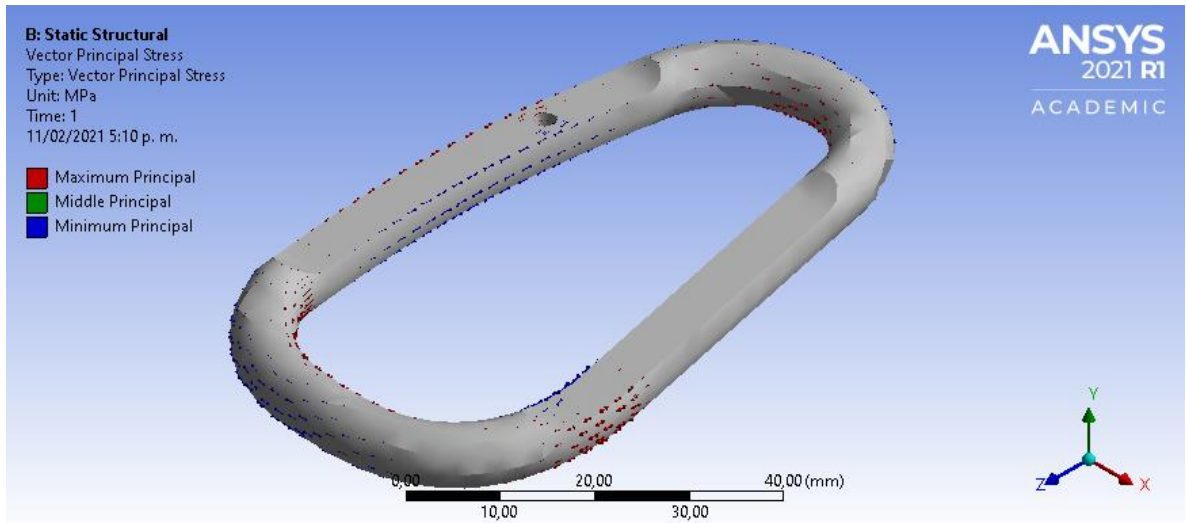


**Figura 48. Detalles fuerza de reacción-carga transversal**

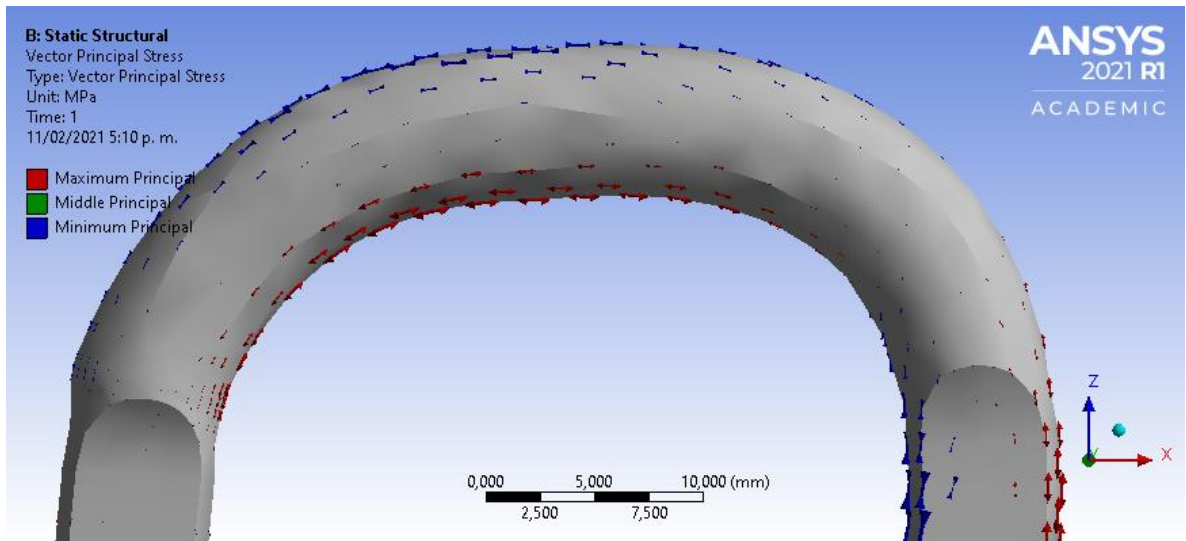
Details of "Force Reaction"	
<b>Options</b>	
Result Selection	All
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
<b>Results</b>	
<b>Maximum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	699,43 N
<input type="checkbox"/> Y Axis	3,2729e-008 N
<input type="checkbox"/> Z Axis	-3,8086e-008 N
<input type="checkbox"/> Total	699,43 N
<b>Minimum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	699,43 N
<input type="checkbox"/> Y Axis	3,2729e-008 N
<input type="checkbox"/> Z Axis	-3,8086e-008 N
<input type="checkbox"/> Total	699,43 N
<b>Information</b>	

Podemos observar que la figura 48 me muestra el valor aproximado de los 700N, esto se hace, debido a que la carga tanto la zona lateral como en su contra parte, el mosquetón tipo HMS conveccional , debe soportar esa carga transversal respectivamente según la EN 12275:2013

**Figura 49. Dirección de los esfuerzos principales-carga transversal**



**Figura 50. Dirección de los esfuerzos principales-carga transversal**



A pesar de que el estudio de la figura 41 se hizo en el eje longitudinal , podemos observar, que los vectores principales de máximo esfuerzo siguen el contorno del mosquetón igual que la figura 49.

## 3.2 DISEÑO

Luego de observar la distribución de esfuerzos, la gráfica vectorial de la dirección del esfuerzo máximo de la figura 41, se decide una configuración de fibras de forma concéntrica, de tal manera que las fibras de carbono sigan el contorno de la pieza.

**3.2.1 Materiales y metodo.** se estableció como material compuesto una matriz de Nylon white y un refuerzo de fibra de carbono. El Nylon White es un polímero termoplástico de la familia de las poliamidas con las siguientes propiedades mostradas en la tabla 2:

**Tabla 2. Propiedades del nylon white.**

Propiedades del Nylon White	
Módulo de tensión $E$ [Mpa]	Módulo de poisson $\gamma$
1700	0,39

El Nylon white comercialmente se conoce como PA12 (Poliamida o Nylon). Se eligió este tipo de matriz polimérica (PMC), debido a sus buenas propiedades mecánicas, térmicas y químicas como, la resistencia al impacto, rozamiento por deslizamiento y resistencia al desgaste. El PA12 tiene la capacidad de absorber la menor cantidad de humedad, lo que por ende hará que nuestro mosquetón HMS se matendrá en condiciones estables en ambientes donde se presente humedad, además de ser la mas ligera de todo el grupo de poliamidas, todas estas condiciones del material PA 12, lo hace el mas indicado para la fabricación en manufactura aditiva del mosquetón.

El refuerzo de fibra de carbono en el material compuesto, contiene las siguientes propiedades en la tabla 3:

**Tabla 3. Propiedades de fibra de carbono en todas sus direcciones.**

Propiedades de Fibra de Carbono									
Módulo de tensión $E$ [Mpa]		Módulo de poisson $\gamma$		Módulo de corte $G$ [Mpa]		Resistencia a la tracción [Mpa]		Resistencia de compresión [Mpa]	
$E_x$	70000	$xy$	0,403	$G_{xy}$	1639	$X_t$	758	$X_c$	312
$E_y$	2420	$yz$	0,321	$G_{yz}$	1908				
$E_z$	2420	$xz$	0,321	$G_{xz}$	1639				

Se trabajo con refuerzo de fibra de carbono continua alineada, debido a las siguientes prestaciones:

- Materiales compuestos con fibras cortas, se pueden llegar a considerar como fibras particualdas.
- Las fibras estan uniformemente distribuidas , en materiales compuestos esto genera una mejor repartición de los esfuerzos.
- Las fibras alineadas estan diseñadas para recibir cargas paralelas a su eje, lo cual es lo indicado debido a las condiciones utilizadas en nuestro diseño y fabricación del mosquetón HMS con material compuesto.

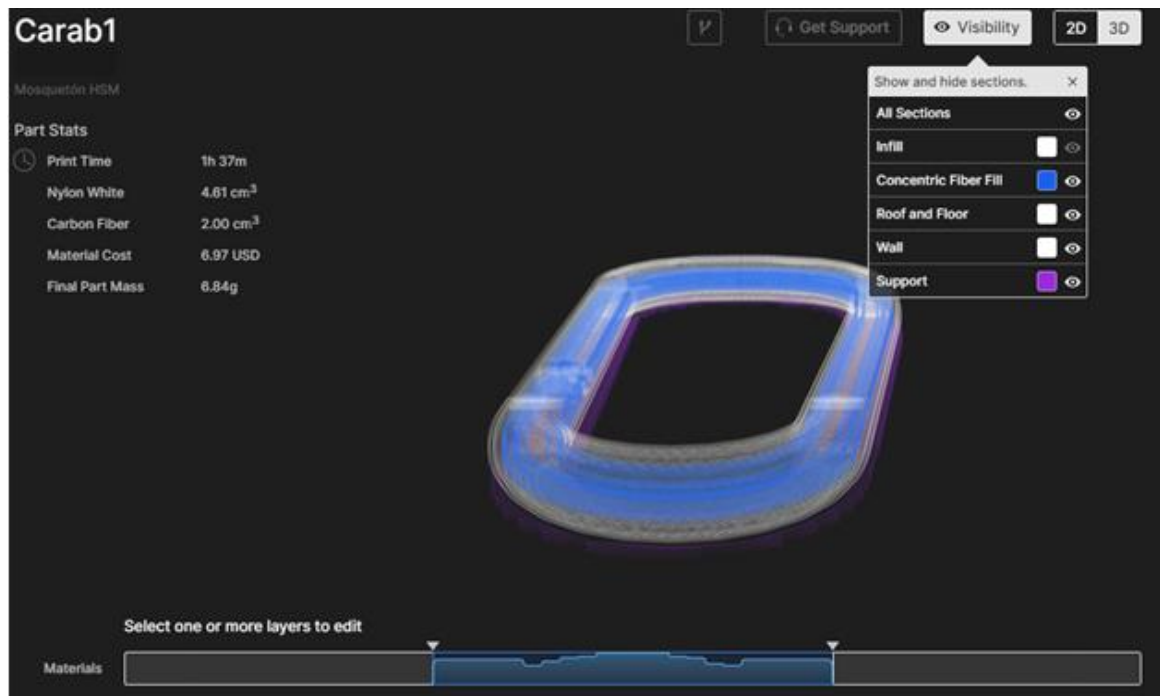
La impresora mark two 3d que se encuentra el el laboratorio 312 de ingeniería mecánica, solo tiene la prestación para fibras continuas.

**3.2.2 Configuración del laminado.** En el transcurso del desarrollo del proyecto al momento de analizar el compuesto, nos dimos cuenta que no era suficiente con el software ansys y acudimos al software Eiger que hace parte de markforged.

El software para la generación del código G es Eiger, se trata de un slicer con capacidades para manejo de materiales compuestos, particularmente se puede

contar con: configuración de la alineación de las fibras siendo posible que se encuentren alineadas en un ángulo establecido o concéntricas siguiendo el contorno de la pieza, variación del ángulo de las fibras, edición capa por capa, variación del tipo de relleno y demás. Como referente se usó la dirección del esfuerzo principal, para establecer las direcciones de las fibras, según lo señalado anteriormente.

**Figura 51. Características del mosquetón-Software Eiger**



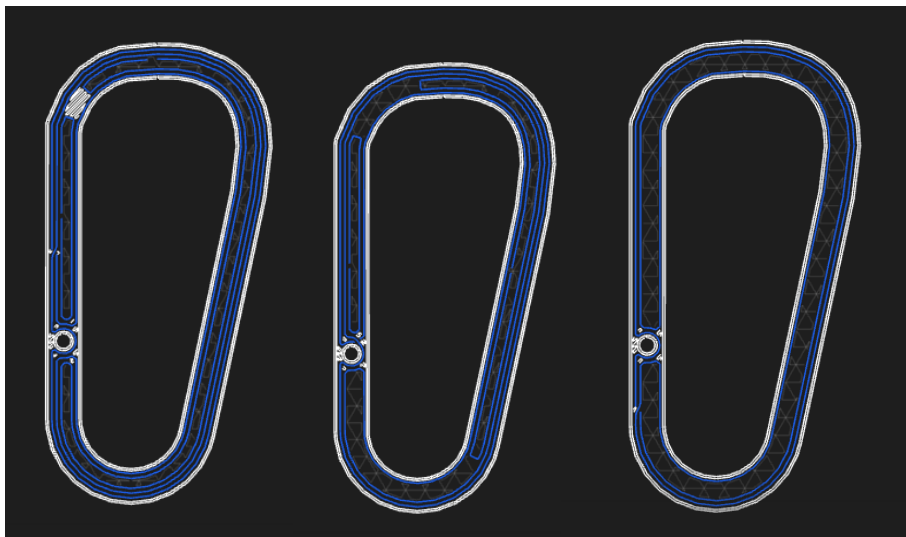
Al introducir nuestra geometría en el software Eiger, al generar el material compuesto de matriz de nylon y refuerzo de fibra de carbono. la figura 51 muestra datos relevantes como:

- Dimensión del mosquetón HMS 42.8 x 87 x 7 [mm] . ancho, altura, espesor respectivamente.
- Peso del mosqueton HMS en material compuesto 6.96 g
- Fracción Volumetrica de la matriz de nylon white 4.16 cm<sup>3</sup>
- Fracción volumetrica del refuerzo de fibra de carbono 2.12 cm<sup>3</sup>
- Tiempo de impresión 1 hora con 39 minutos

- Costo de la producción de la pieza 7.25 dolares, basado en lo estimado por el software eiger.

Se estableció como parámetro de impresión, que la parte debería tener 3 anillos concéntricos, sin embargo, no en toda la superficie fue posible obtenerlos. La figura 52 muestra la vista 2D de 3 capas diferentes, siendo la capa prevalente la del inicio.

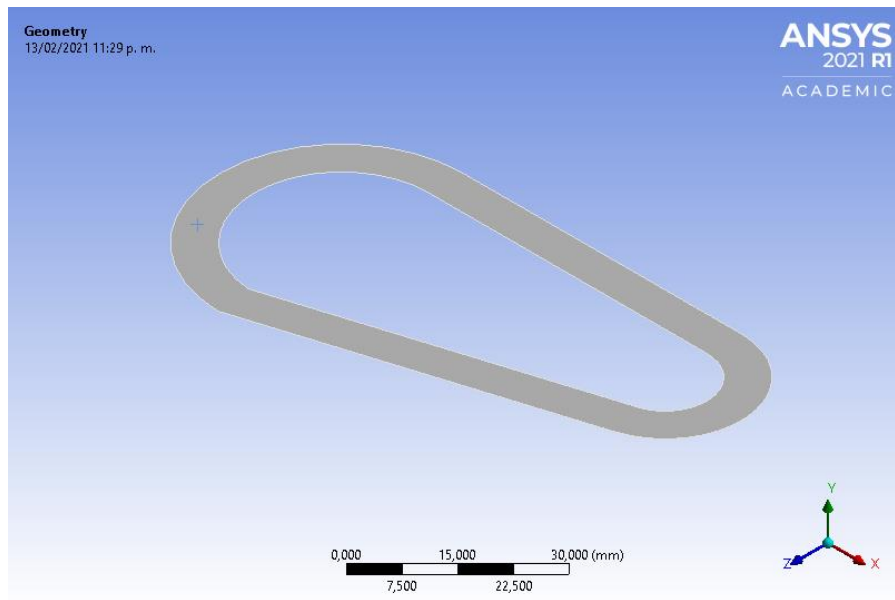
**Figura 52. Anillos concéntricos**



**3.2.3 Simulación.** Para el diseño del mosquetón HMS en material compuesto, se desarrollara un análisis estructural en la simulación de ansys workbench.

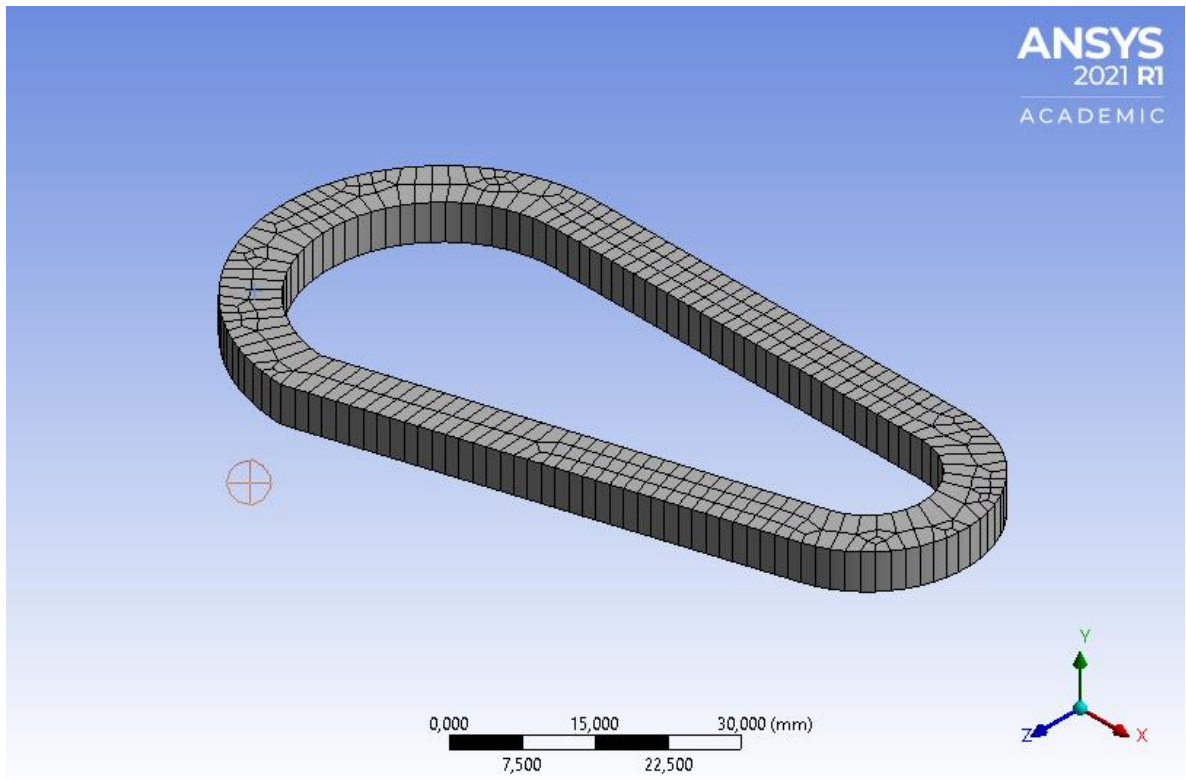
**3.2.4 Geometría.** Se hizo en superficie debido a el método de fabricación, el cual trabaja capa por capa.

**Figura 53. Geometría del diseño**



**3.2.5 Malla.** Las condiciones de malla fueron menores a la del prediseño, debido a que como es por laminado, este se trabajara capa por capa mostrando así en el software de ansys ACP como una superficie.

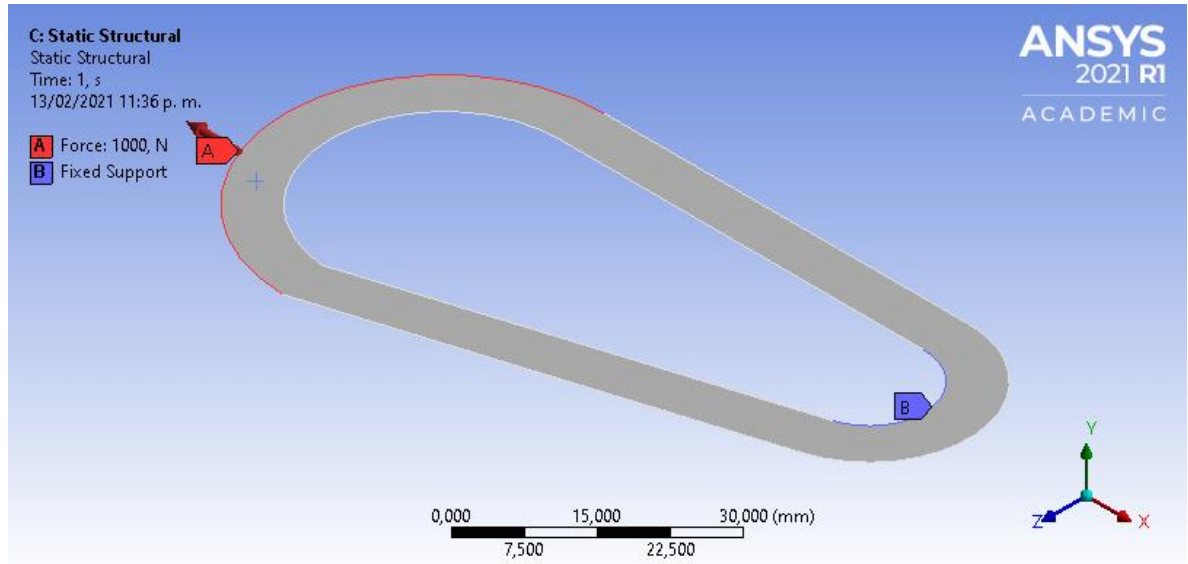
**Figura 54. Malla del diseño**



Se escoge la malla con cerca de 350 elementos, lo cual es un parámetro en nuestra simulación del diseño.

## 3.2.6 Resultados

### 3.2.6.1 Condiciones de contorno.

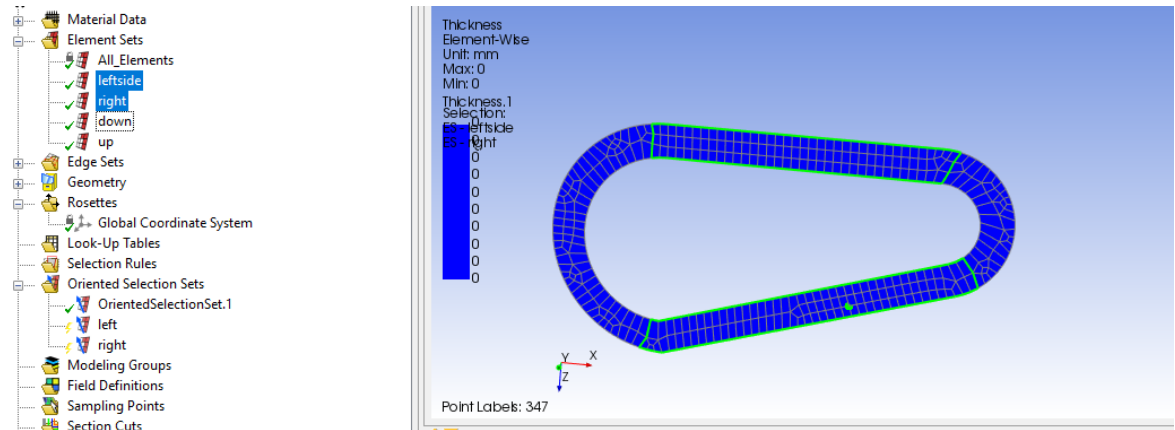


Se observa que las condiciones de contorno son las mismas que las del prediseño.

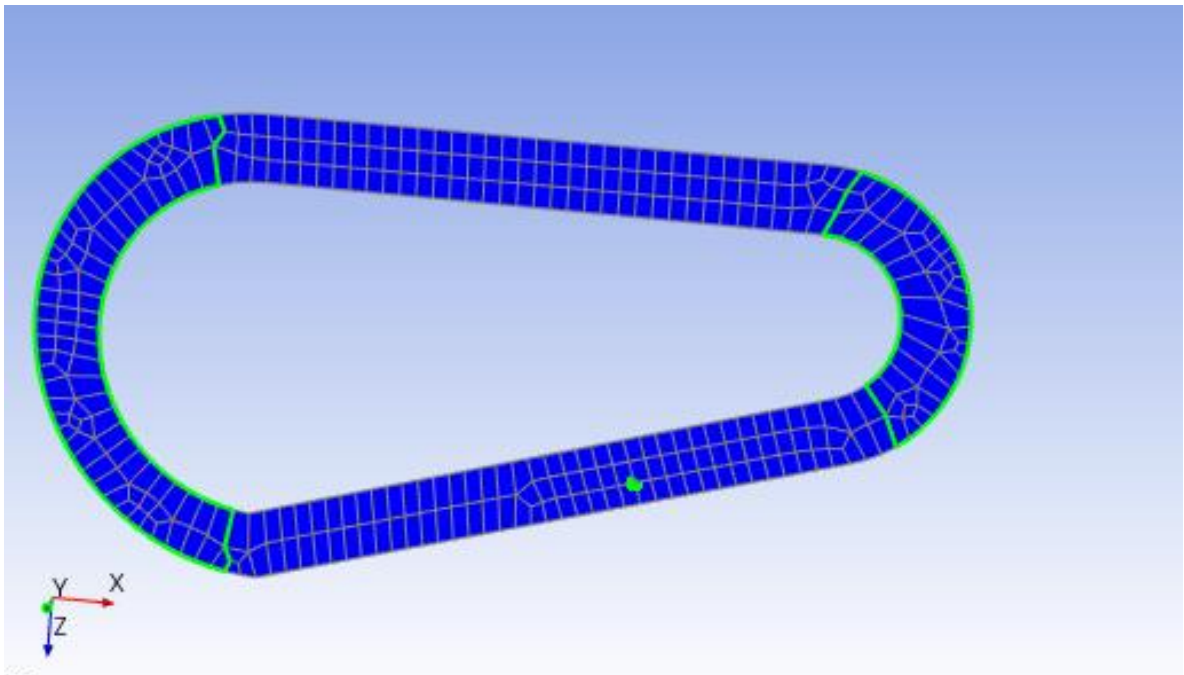
Cabe resaltar que el diseño al ser de material compuesto, el desarrollo para llegar a los análisis, se usó el modelo ACP para el adecuado estudio de las diferentes capas agregadas al mosquetón HMS .

**3.2.6.2 Modelado ACP.** Se trabaja en el módulo ACP, para la definición del laminado, como se tienen varias zonas, se establecen las divisiones correspondientes según muestra la figura:

**Figura 55. Laminado-zonas laterales**

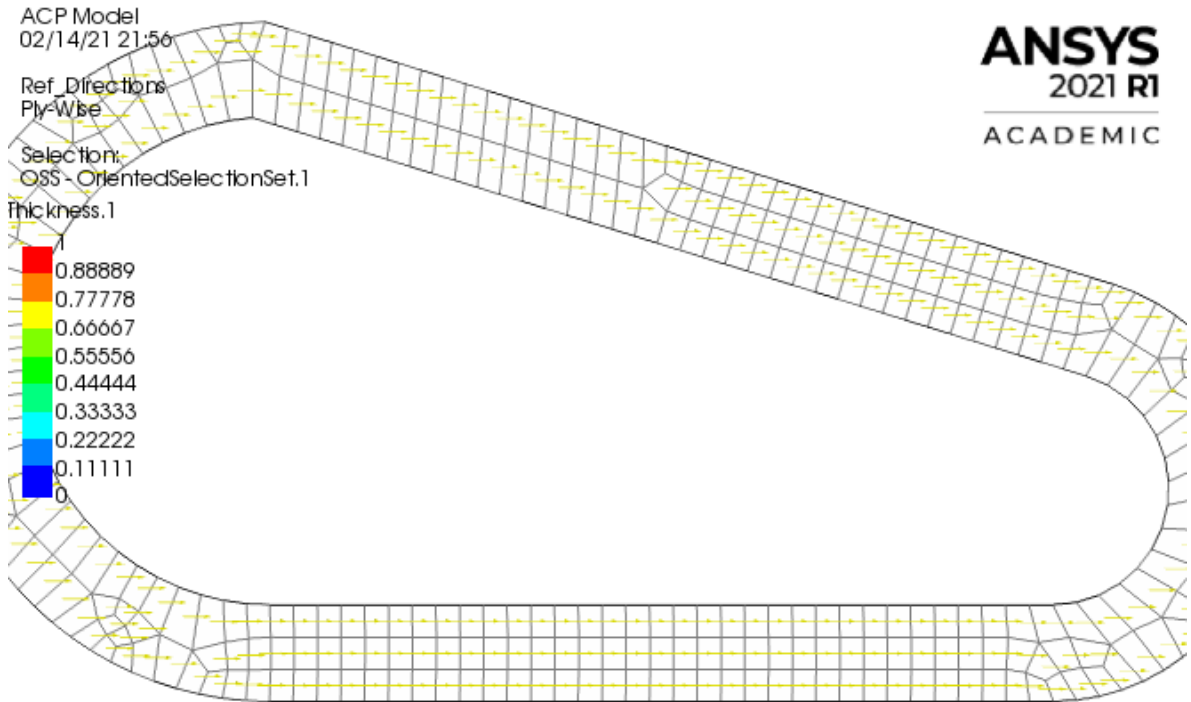


**Figura 56. Laminado- Zona de radio mayor y radio menor**



A partir de ahí, se puede crear el laminado con las direcciones correspondientes, será una aproximación, pues en la zona de la curvatura es más difícil lograr la alineación de todas las fibras.

**Figura 57. Orientación de las fibras**



Podemos observar, que la orientación de las fibras irán dirigidas al eje x, es decir al eje principal (Longitudinal) del mosquetón HMS de PMC .

**3.2.6.3 Carga longitudinal.** El diseño al ser un material ortotrópico tendrá esfuerzos diferentes en sus direcciones, además se estudiará el mosquetón HMS PMC en diferentes secciones, como lo son Left, Right, Down, up.

Con las condiciones de contorno mencionadas en la introducción del capítulo 3, en el solución del ANSYS Workbench, se hizo el estudio de varias capas en las mismas zona, tanto en el eje longitudinal (principal) como el transversal, cabe resaltar que la cantidad de capas fueron 25, debido a que es la sollicitud máxima que genera la impresora mark two en un espesor de 0.125 [mm], de cada una de las capas siendo así 7 [mm] su máximo espesor.

Se aplicó un criterio de falla, para el diseño del mosquetón HMS con PMC el cual es la teoría de tensión máxima. Los modos de fallas son independientes, lo que hará que la falla se produzca cuando exceda la tensión permisible en los diferentes ejes, debido a que el material compuesto, su comportamiento se asemeja a un material elástico lineal la falla ocurrirá si alcanza las siguientes condiciones<sup>1</sup>:

$$\begin{aligned} X_t &\leq \sigma_{11} & Y_t &\leq \sigma_{22} \\ X_c &\leq \sigma_{11} & Y_c &\leq \sigma_{22}^2 \end{aligned}$$

Eje longitudinal

*X<sub>t</sub>: Resistencia a la tracción*

*X<sub>c</sub>: Resistencia a la compresión*

Eje Transversal

*Y<sub>t</sub>: Resistencia a la tracción*

*Y<sub>c</sub>: Resistencia a la compresión*

Se estudiará las capas 1, 10, 25 del material compuesto, ya que estas generan un valor mínimo, medio y máximo en los esfuerzos tensionales del mosquetón HMS de PMC.

---

<sup>1</sup> BARBERO, Ever J. Finite element analysis of composite materials using ansys. Segunda edición. Boca Raton, FL, EE. UU. 2014. p. 103-104.

<sup>2</sup> SCIENCE DIRECT Criterio de estrés máximo [en línea] disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/maximum-stress-criterion#:~:text=2.1%20Maximum%20stress%20criterion,this%20criterion%20is%20less%20complicated.&text=Failure%20occurs%20once%20the%20stress,either%20in%20tension%20or%20compression.>

### 3.2.6.4 Left

a. Eje principal (Longitudinal)

Figura 58. Capa 1 left- longitudinal

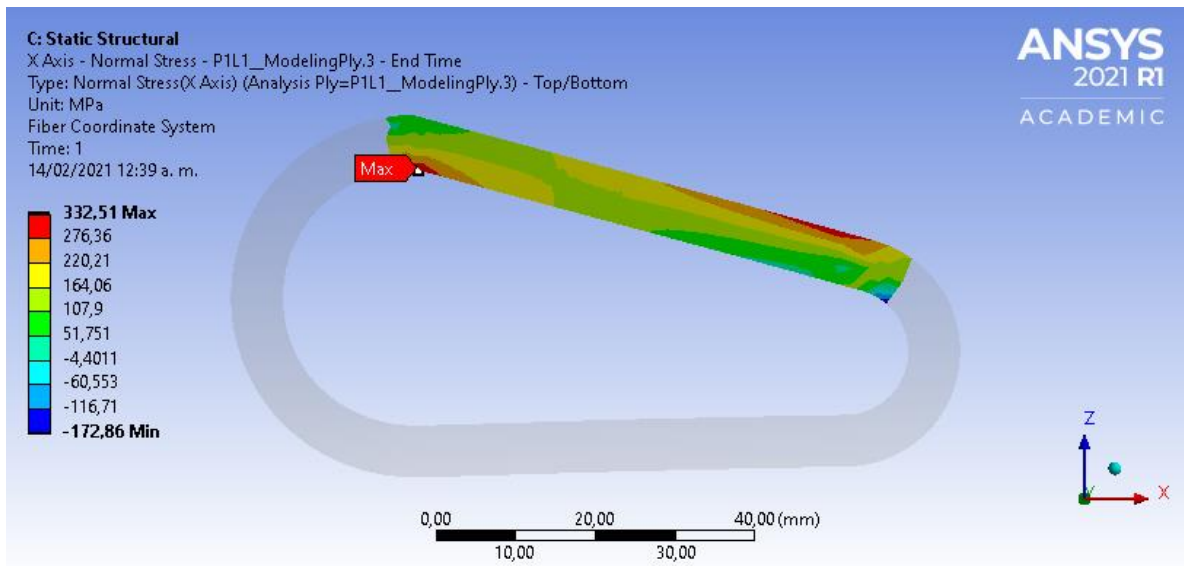


Figura 59. Capa 10 left- longitudinal

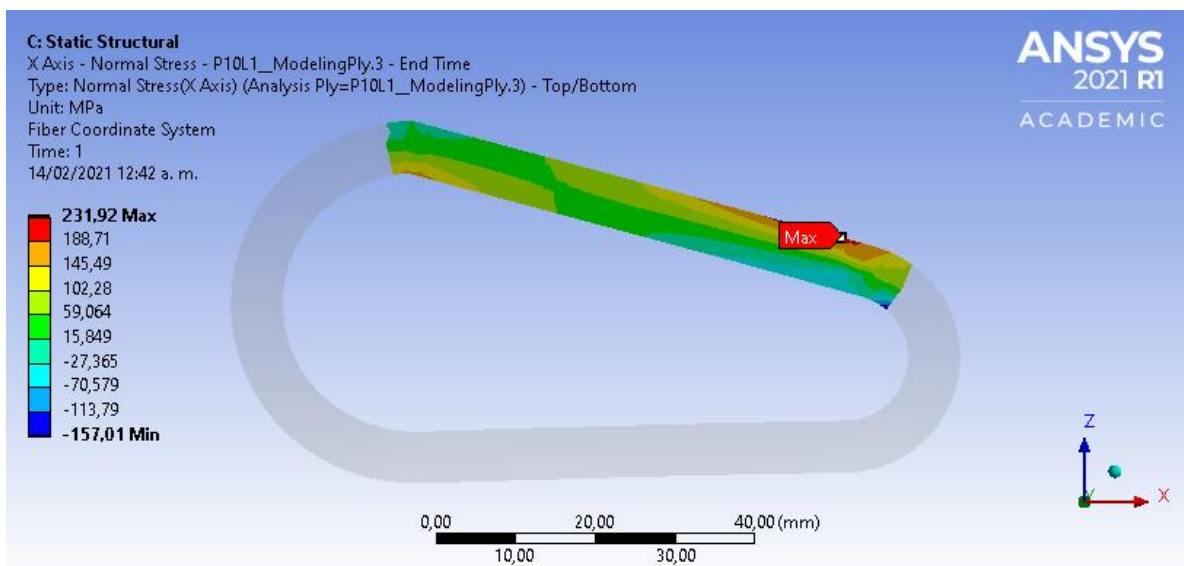
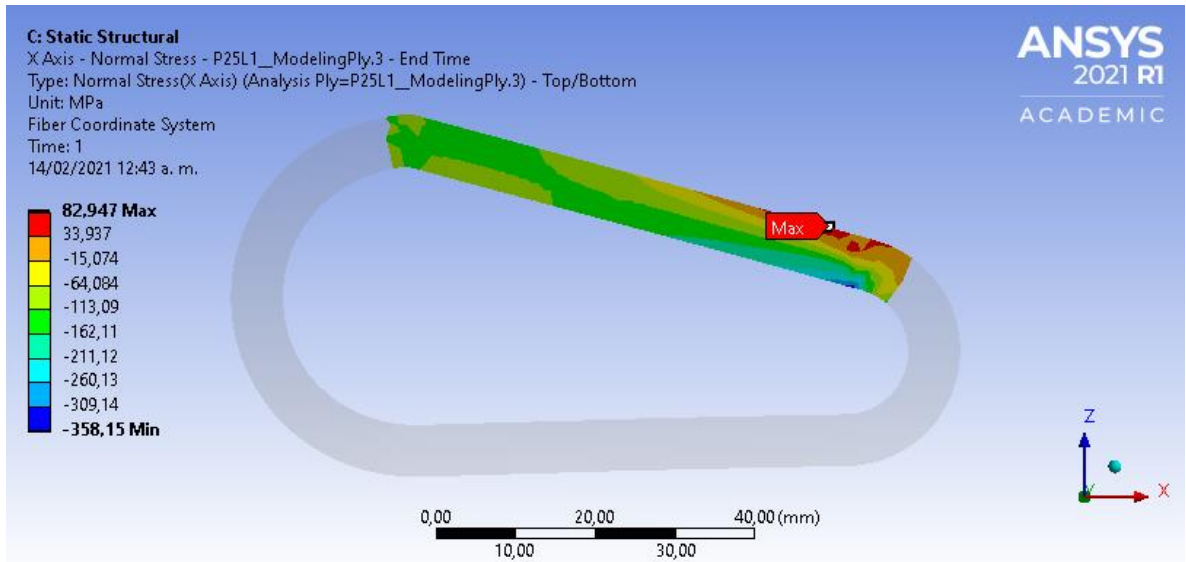
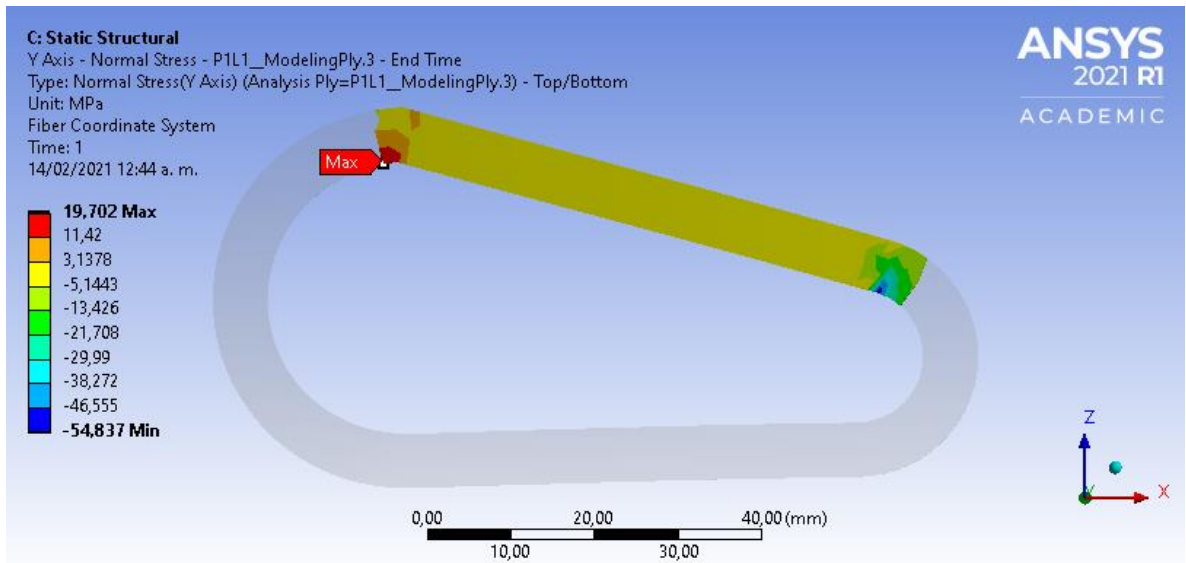


Figura 60. Capa 25 left.- longitudinal

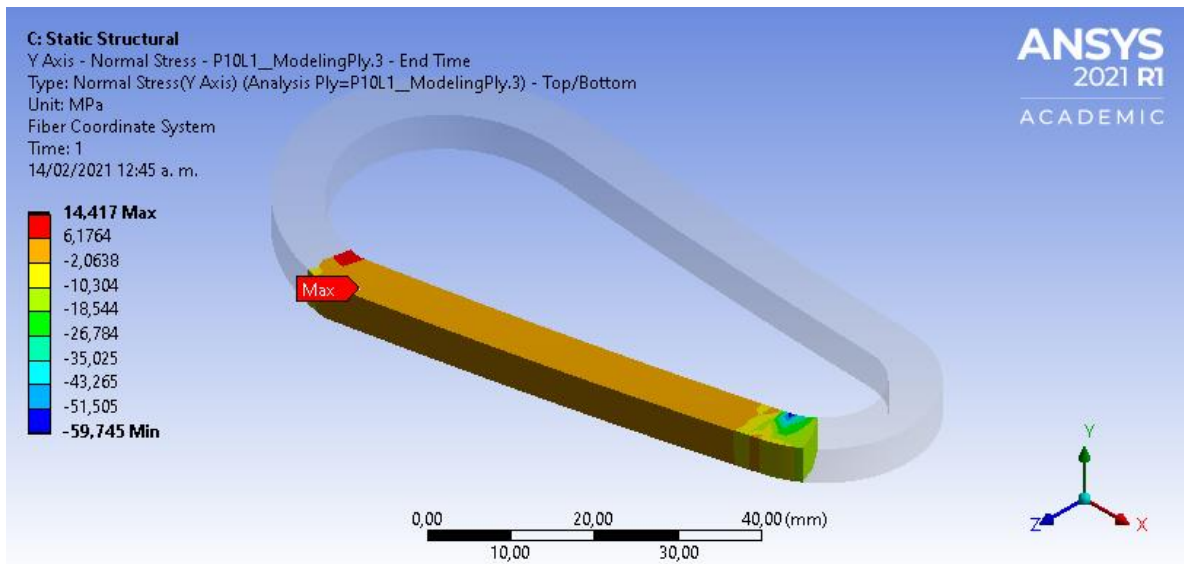


b. Eje transversal

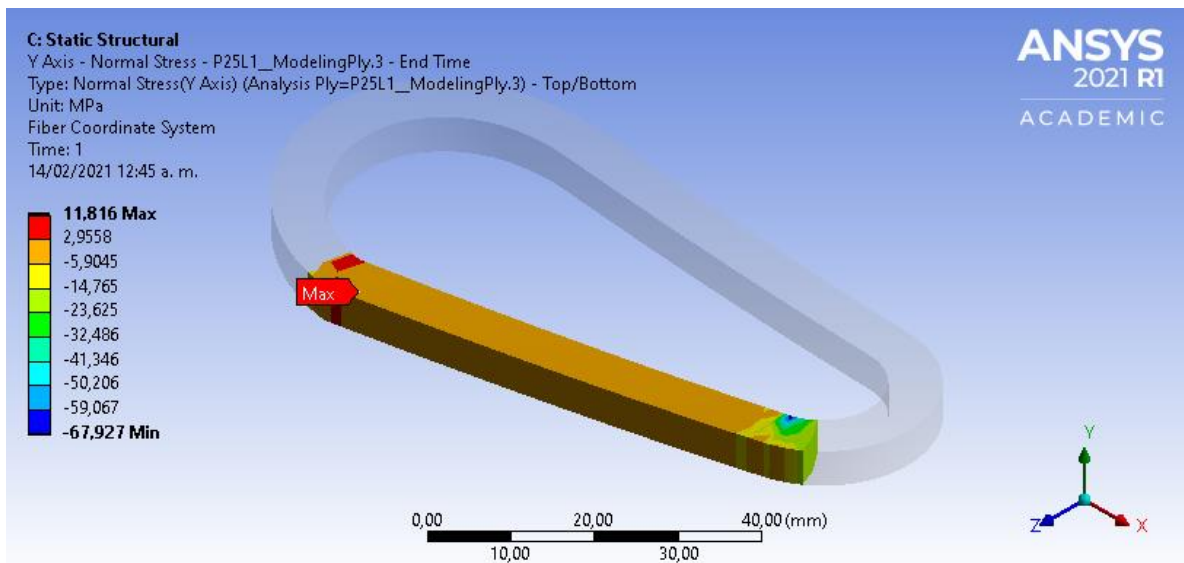
Figura 61. Capa 1 left- transversal



**Figura 62. Capa 10 left- transversal**



**Figura 63. Capa 25 left- transversal**



Se observa los siguientes valores en el eje principal, los cuales son: 332,51, 232,91 y 82,917 [Mpa], en la capa 1, 10 y 25 respectivamente.

En el eje transversal, los valores tensionales fueron 19,702, 14,417 y 11,816 [Mpa] en la capa 1, 10 y 25 respectivamente, al obtener estos datos se cumple con el criterio de falla de tensión máxima donde la tensiones permisibles no supera los valores de  $X_t$ ,  $Y_t$  y  $X_c$ ,  $Y_c$ .

### 3.2.6.5 UP

a. Eje principal.

**Figura 64. Capa 1 up -longitudinal**

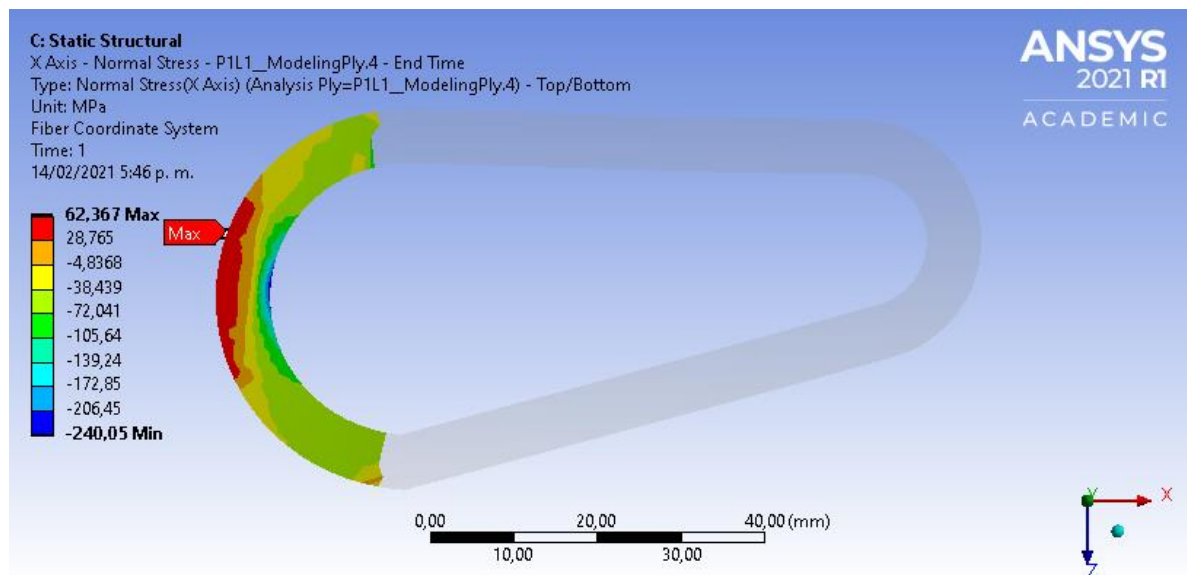


Figura 65. Capa 10 up-longitudinal

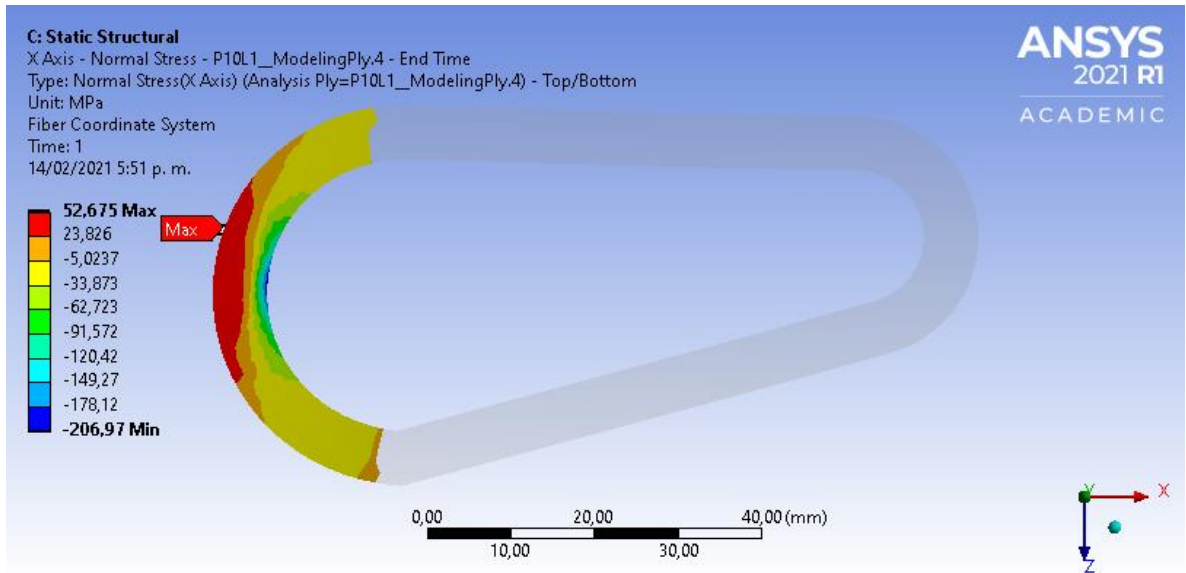
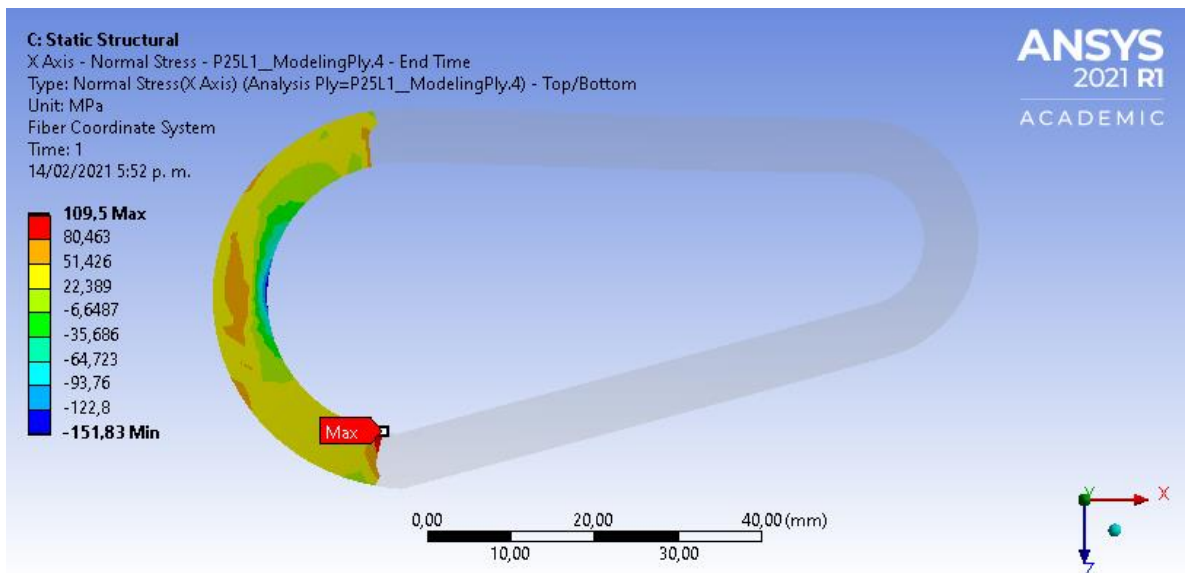


Figura 66. Capa 25 up-longitudinal



b. Eje transversal

Figura 67. Capa 1 up transversal

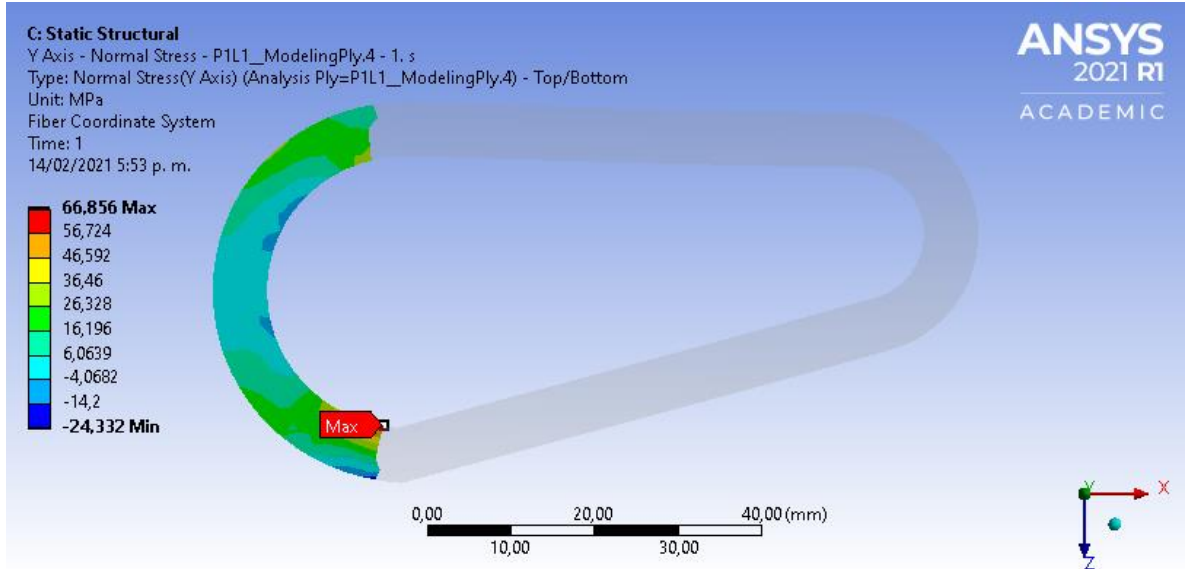
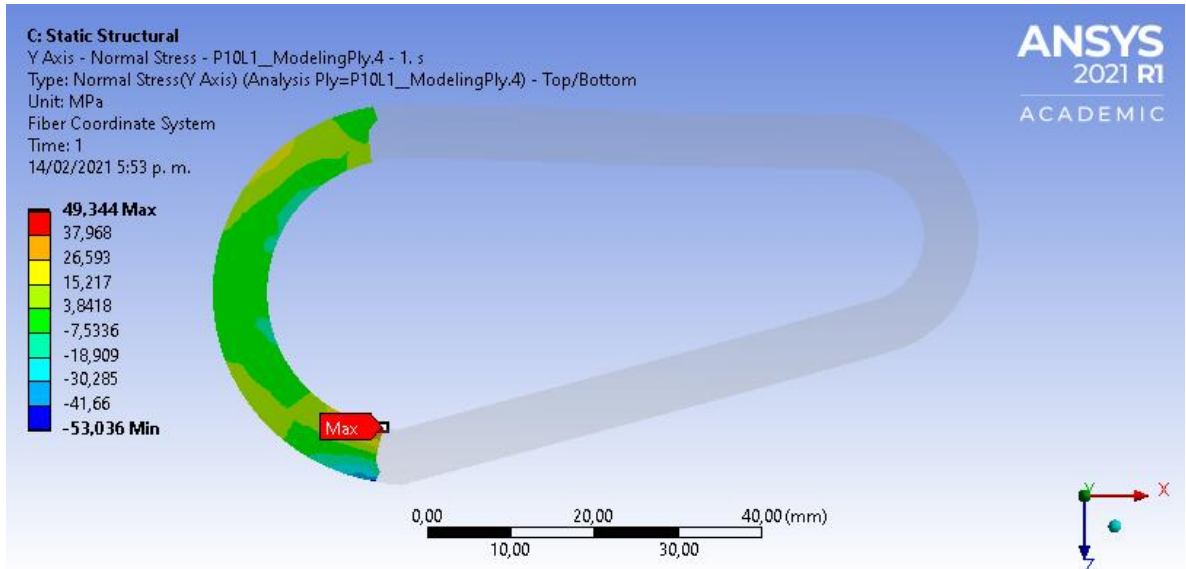
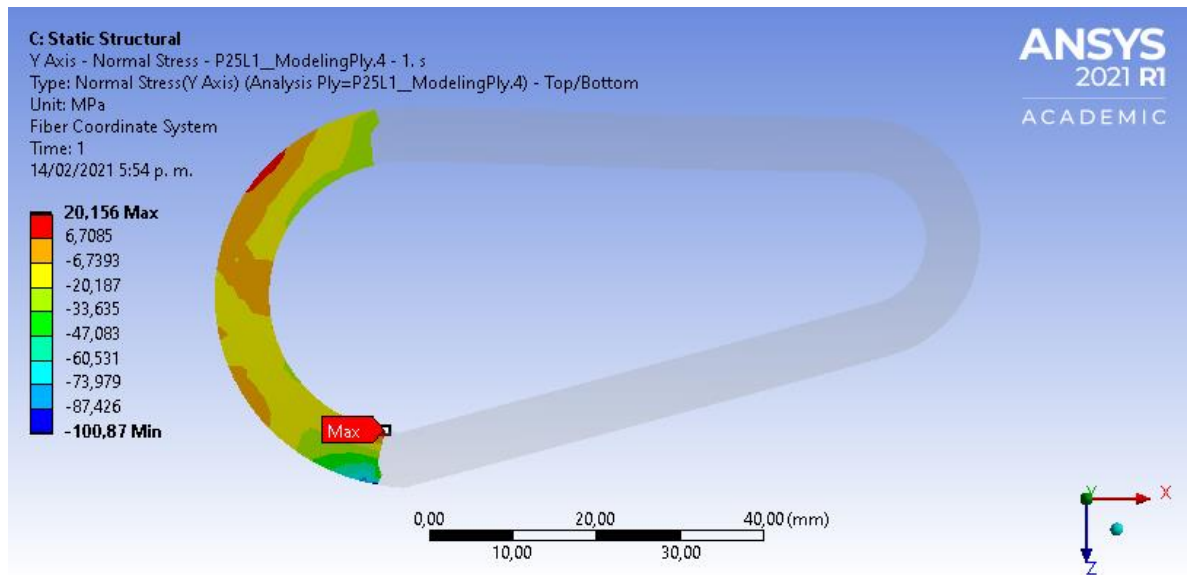


Figura 68. Capa 10 up transversal



**Figura 69. Capa 25 up transversal**



Se observa los siguientes valores en el eje principal los cuales son: 62,367 , 52,65 y 109,25 [Mpa], en la capa 1, 10 y 25 respectivamente.

En el eje transversal los valores tensionales fueron 66,865 , 49,344 y 20,156 [Mpa] en la capa 1, 10 y 25 respectivamente, al obtener estos datos se cumple con el criterio de falla de tensión máxima donde la tensiones permisibles no supera los valores de  $X_t$ ,  $Y_t$  y  $X_c$ ,  $Y_c$ .

### 3.2.6.6 Down

a. Eje principal(Longitudinal)

Figura 70. Capa 1 Down longitudinal

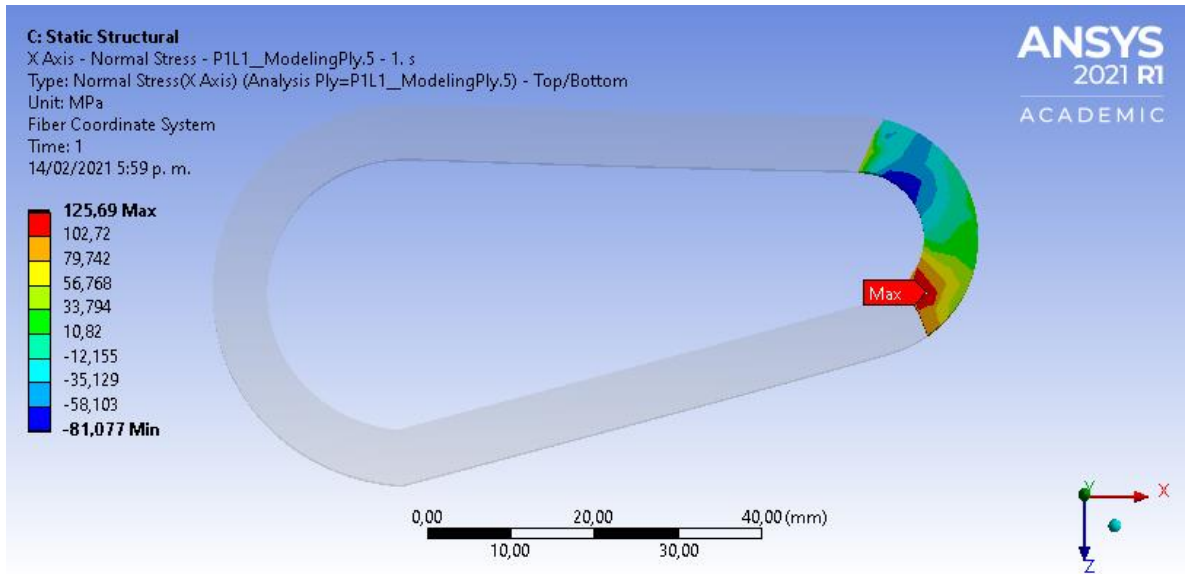


Figura 71. Capa 10 down longitudinal

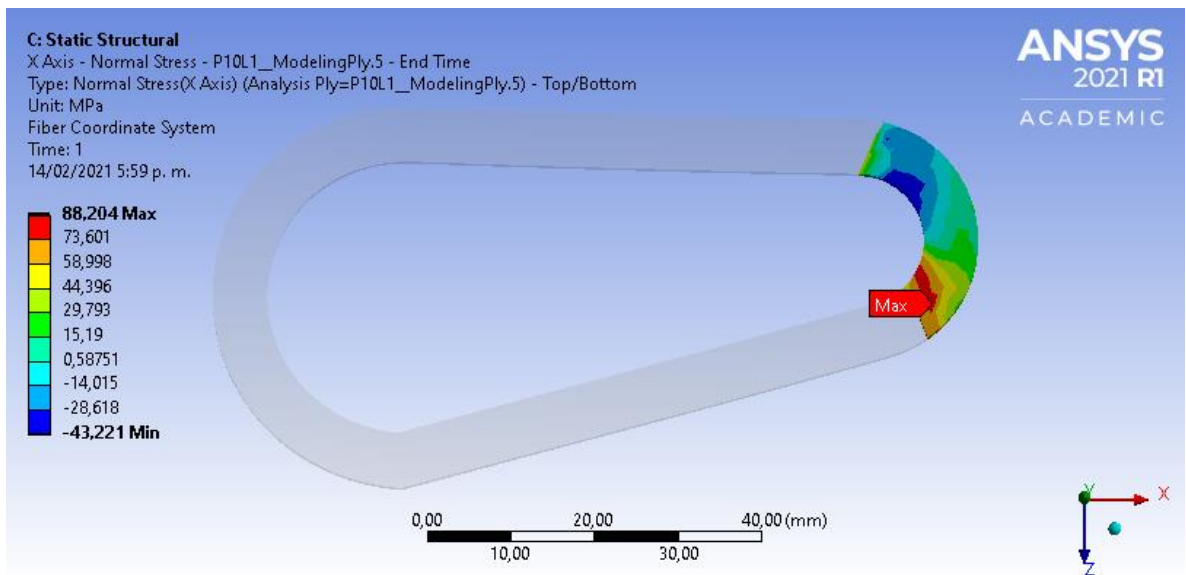
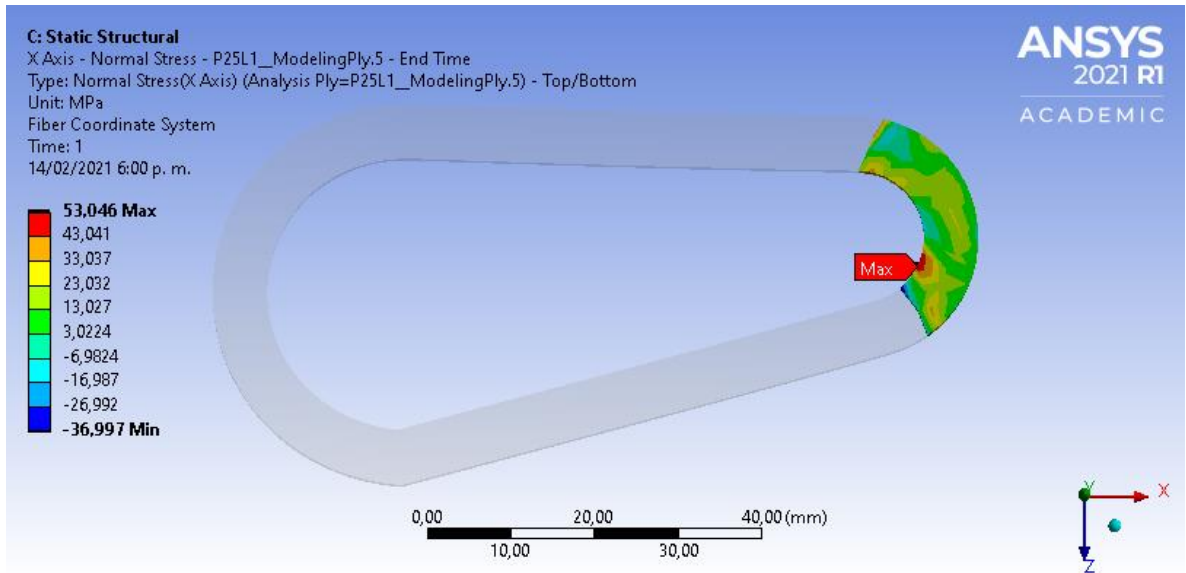
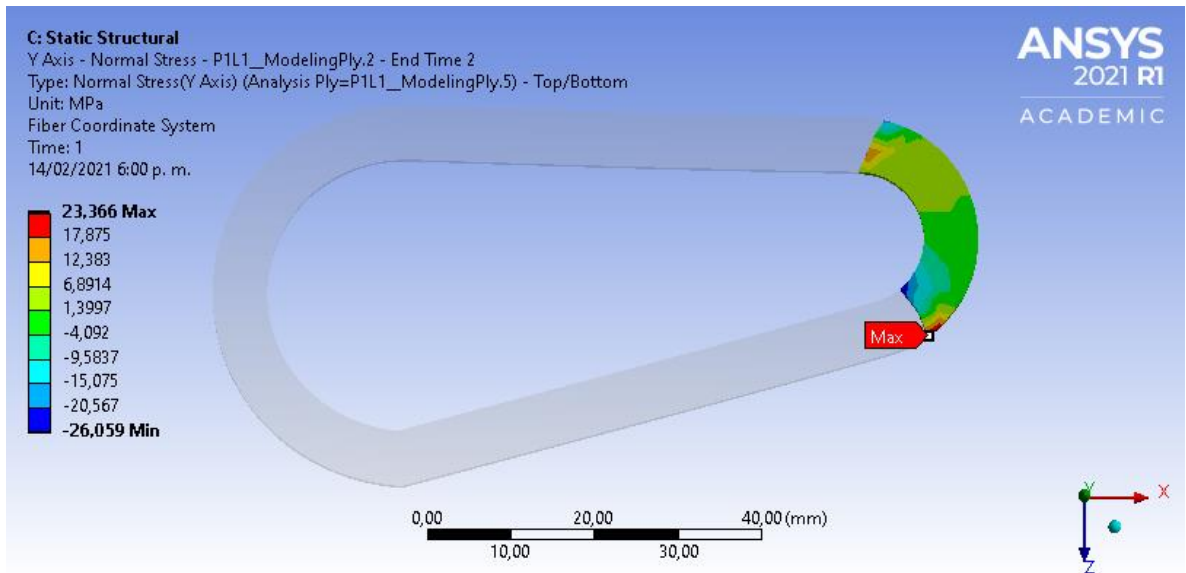


Figura 72. Capa 25 down Longitudinal

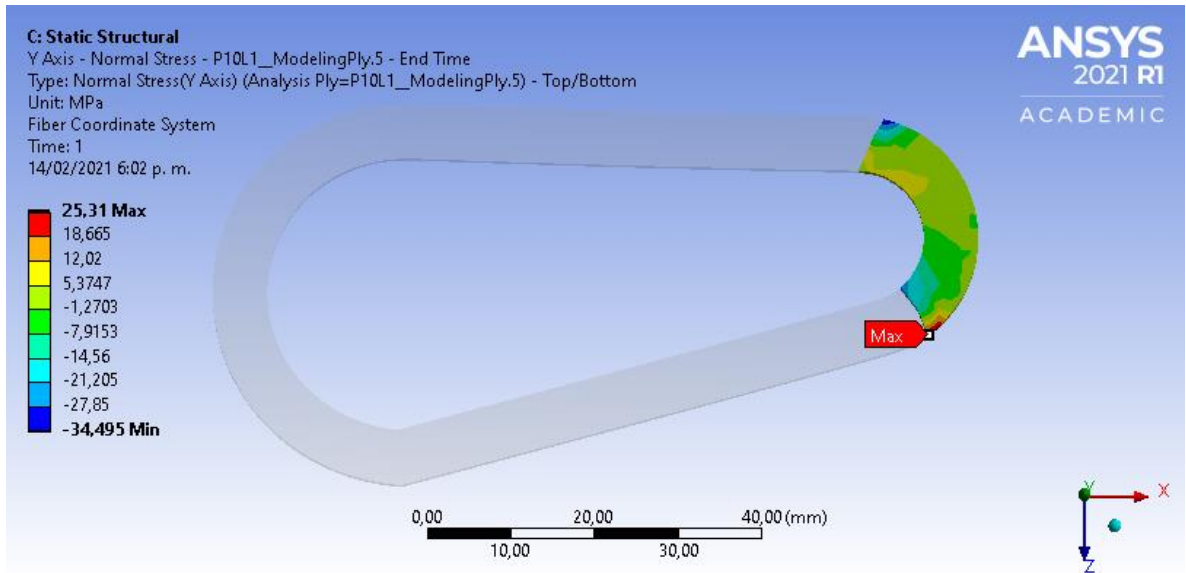


b. Eje Transversal

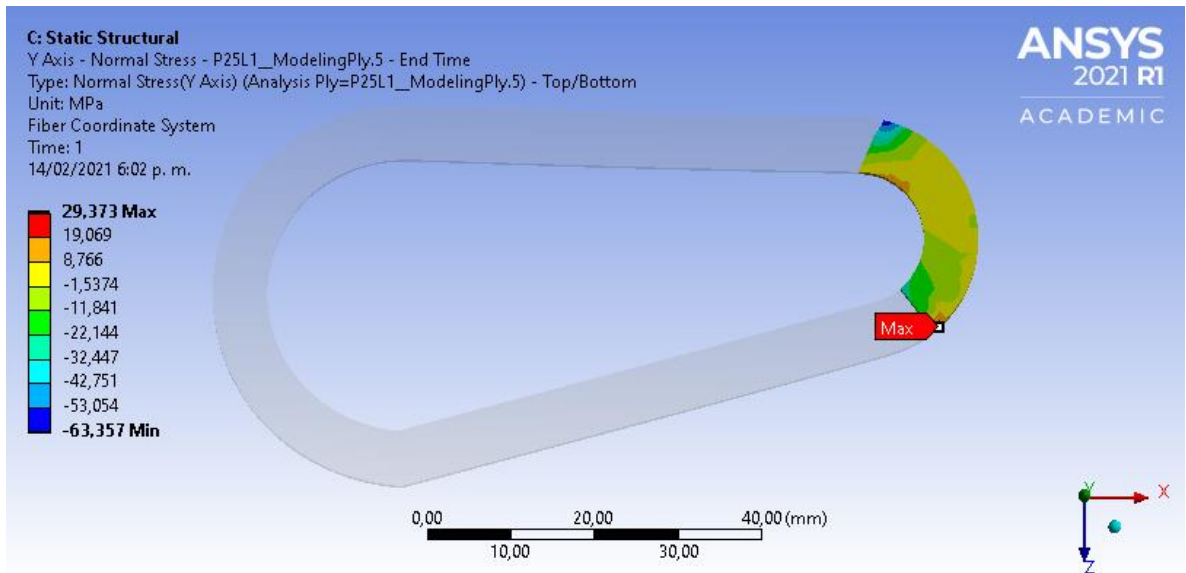
Figura 73. Capa 1 down transversal



**Figura 74. Capa 10 down transversal**



**Figura 75. Capa 25 down transversal.**



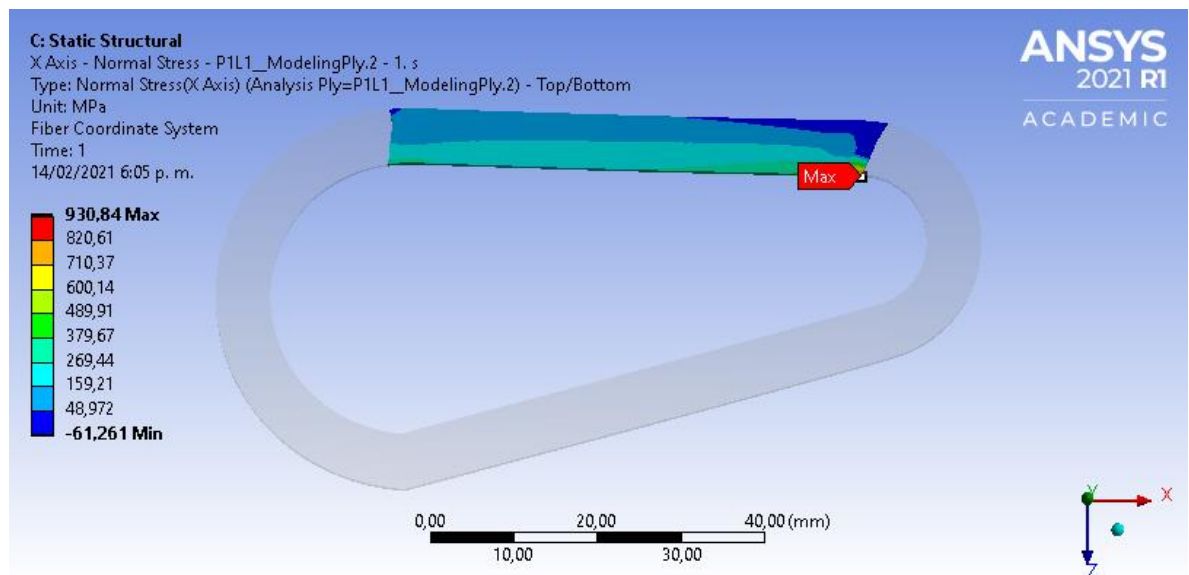
Se observa los siguientes valores en el eje principal, los cuales son: 125,69 , 88,204 y 53,046 [Mpa], en la capa 1, 10 y 25 respectivamente.

En el eje transversal, los valores tensionales fueron 23,366, 25,61 y 29,373 [Mpa] en la capa 1, 10 y 25 respectivamente, al obtener estos datos se cumple con el criterio de falla de tensión máxima donde la tensiones permisibles no supera los valores de  $X_t$ ,  $Y_t$  y  $X_c$ ,  $Y_c$ .

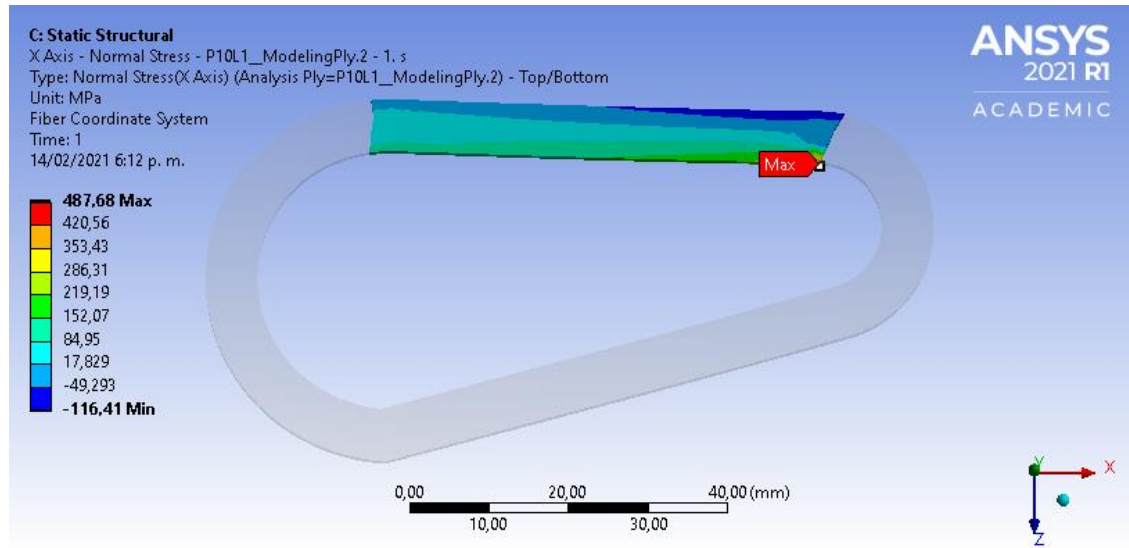
### 3.2.6.7 RIGHT

a. Eje principal

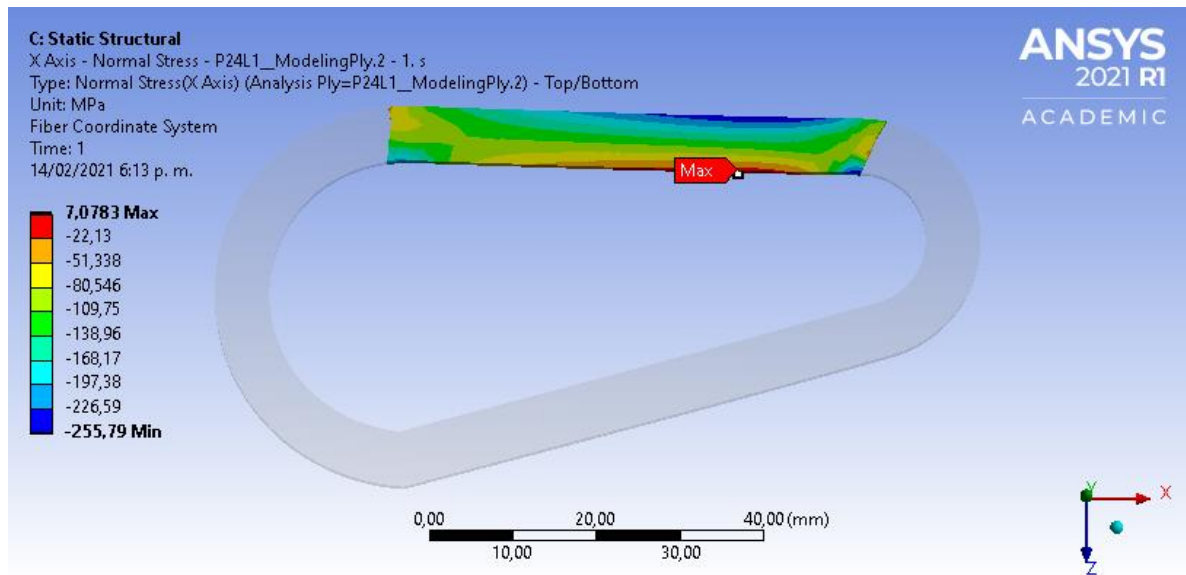
**Figura 76. Capa 1 right longitudinal**



**Figura 77. Capa 10 right longitudinal**



**Figura 78. Capa 24 longitudinal right**



b. Eje transversal

Figura 79. Capa 1 rght transversal

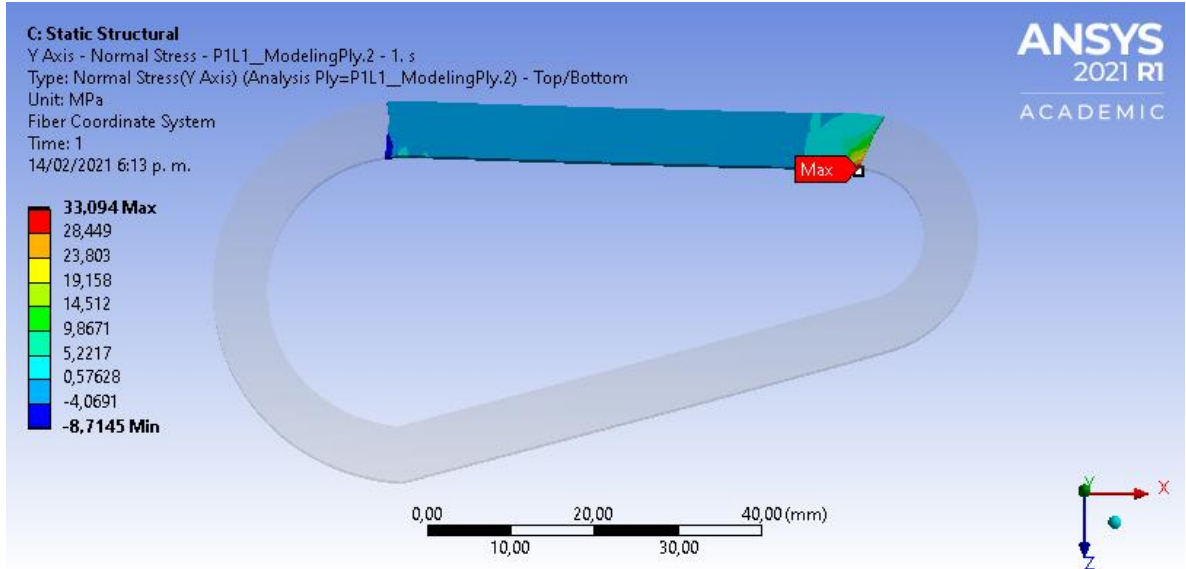
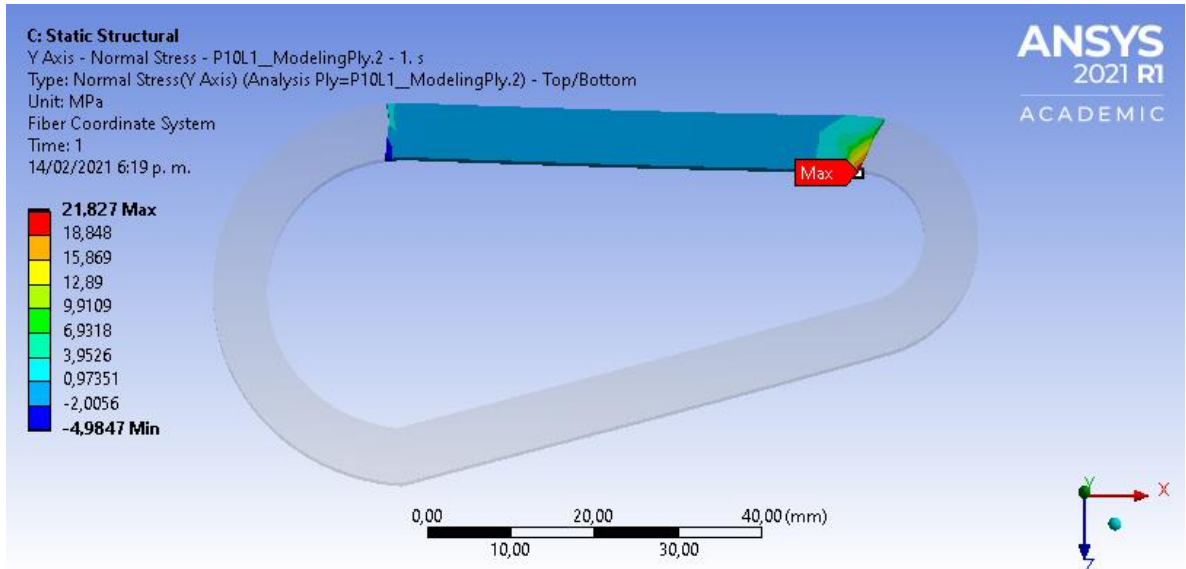
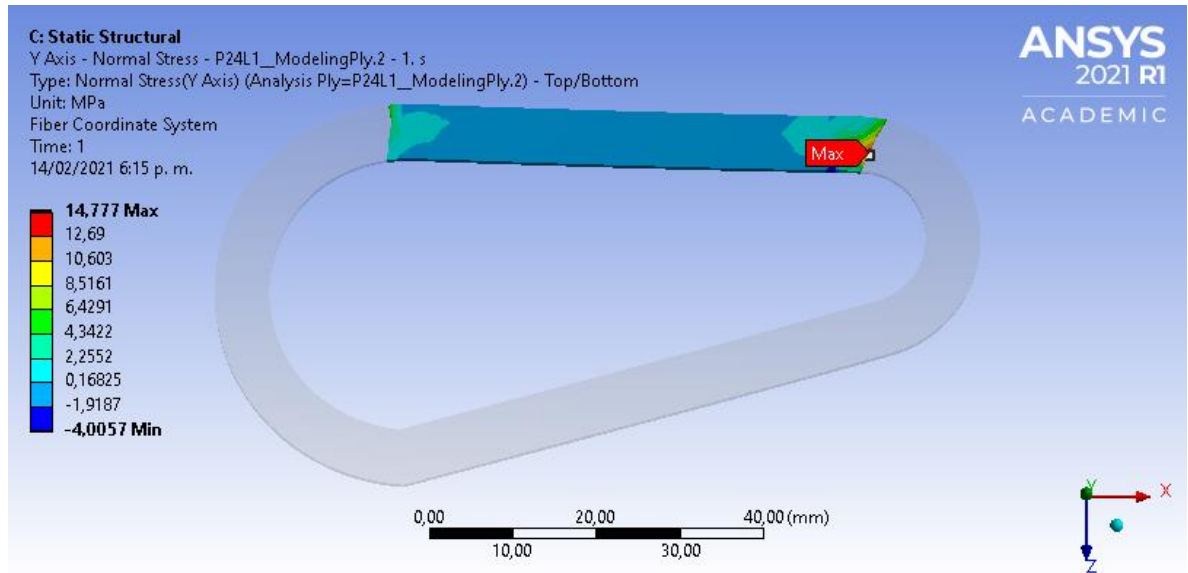


Figura 80. Capa 10 right transversal



**Figura 81. Capa 24 rght transversal**



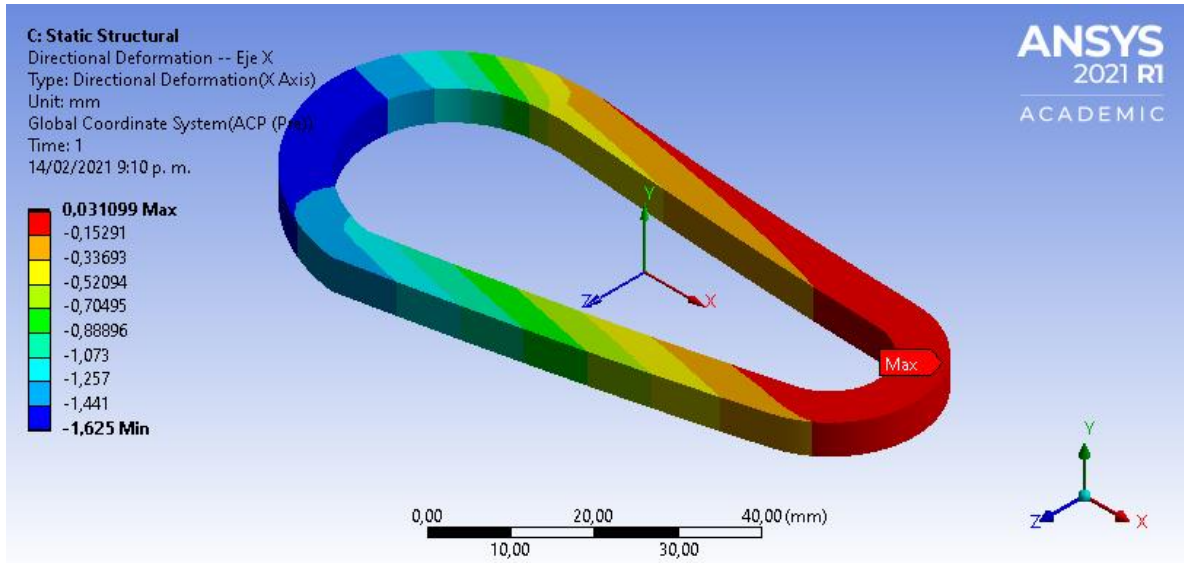
Se observa los siguientes valores en el eje principal, los cuales son: 930,34 , 487,68 y 7,07 [Mpa], en la capa 1, 10 y 25 respectivamente.

En el eje transversal, los valores tensionales fueron 33,094, 21,827 y 14,777 [Mpa] en la capa 1, 10 y 25 respectivamente, A diferencia de los análisis anteriores, en este podemos observar, que el criterio de falla en la capa 1 right longitudinal no se cumple, es decir fallara en la zona donde muestra el máximo esfuerzo, las demás capas si cumplen con el criterio de falla, al no superar la tensión permisible del material compuesto.

**3.2.6.8 Deformación direccional.** El análisis de las deformaciones fue independiente a cada eje del sistema, debido a la dirección de las fibras.

a. Eje x.

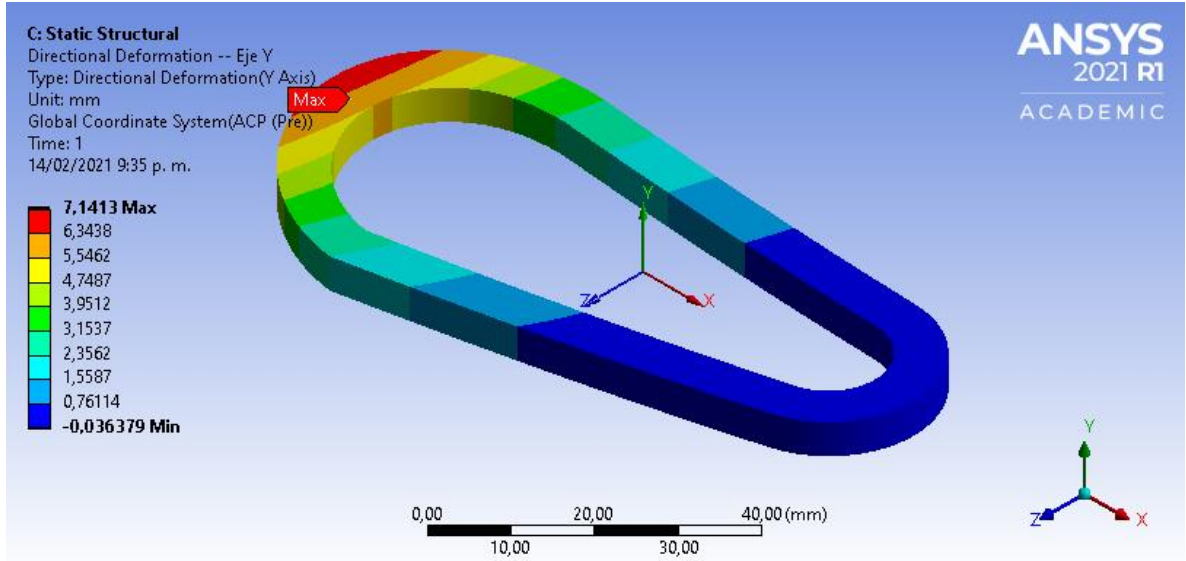
**Figura 82. Deformación direccional en el eje x**



Al ir la dirección de las fibras en el mismo eje x, hará que la deformación sea mínima, la cual es de 0,031099 [mm], lo podemos observar en figura 82.

b. Eje Y

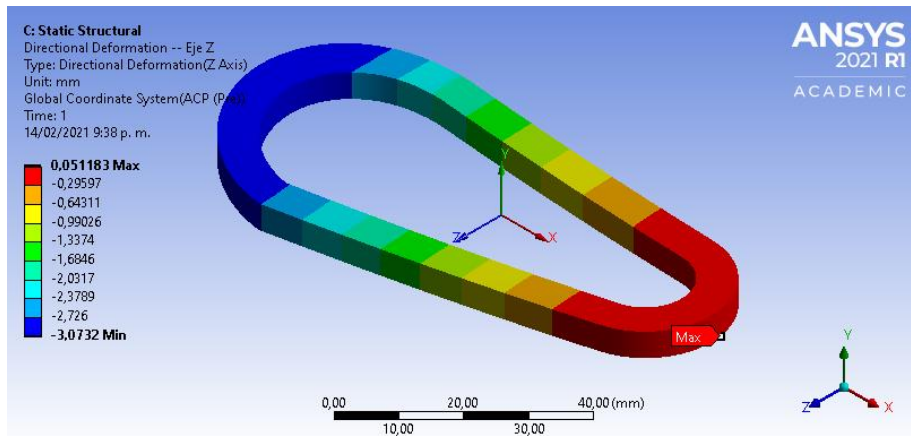
Figura 83. Deformación direccional en el eje x



Se presenta máxima deformación en el eje Y, debido a que es transversal a la dirección de las fibras, haciendo que este sea el eje débil. La deformación fue de 7,1413 [mm].

c. Eje Z

Figura 84. Deformación direccional en el eje z



La deformación en el eje Z es muy parecida a la del eje Y, debido a que en este eje no se generó mucho esfuerzo por la condición de contorno de el mosquetón HMS de PMC.

### 3.2.6.9 Factor de seguridad

Al usar el criterio de falla de tensión máxima en las capas 1,10,25 tanto en el eje principal como en el transversal, podemos obtener el factor de seguridad de cada zona estudiada del mosquetón HMS de PMC.

**Tabla 4. Criterio de falla de tensión máxima – factor de seguridad**

CRITERIO DE FALLA DE TENSIÓN MÁXIMA								
NORMAL STRESS	LEFT		UP		DOWN		RIGHT	
Direcciones paralelas de las fibras [Eje X]	[Mpa]	Factor de Seguridad	[Mpa]	Factor de seguridad]	[Mpa]	Factor de seguridad	[Mpa]	Factor de seguridad
	332,51	2,279630688	62,367	12,15386342	125,69	6,030710478	930,84	0,81431825
	231,92	3,268368403	52,675	14,39012814	88,204	8,593714571	487,68	1,5542979
	82,947	9,138365462	109,5	6,922374429	53,046	14,2894846	7,07	107,2135785
Dirección Transversal de las fibras [Eje Y]	19,72	38,43813387	66,856	11,33780065	23,366	32,44029787	33,094	22,90445398
	14,417	52,57681903	49,344	15,36154345	25,31	29,9486369	21,827	34,72763092
	11,81	64,18289585	20,115	37,6833209	29,373	25,80601232	14,696	51,57866086

Si observamos los resultados que nos muestra la tabla, según el criterio de falla que utilizamos para nuestro diseño, es bastante seguro a excepción de una de las zonas laterales. ver figura 79.

## **4. FRABRICACIÓN DEL DISEÑO**

### **4.1 MANUFACTURA ADITIVA - IMPRESIÓN FMD (MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA)**

según los tipos de procesos de manufactura aditiva expuesto en el marco teórico del presente proyecto, se trabajó con modelado por deposición fundida (FMD).

El método de este tipo de manufactura aditiva digitalizado, consiste en fabricar objetos 3D, creando un modelo previo de la geometría que se desea, en este proyecto un mosquetón de seguridad tipo HMS, depositando el material capa por capa que, en este caso en una matriz de nylon con refuerzo en fibra de carbono, hasta conformar un objeto tridimensional.

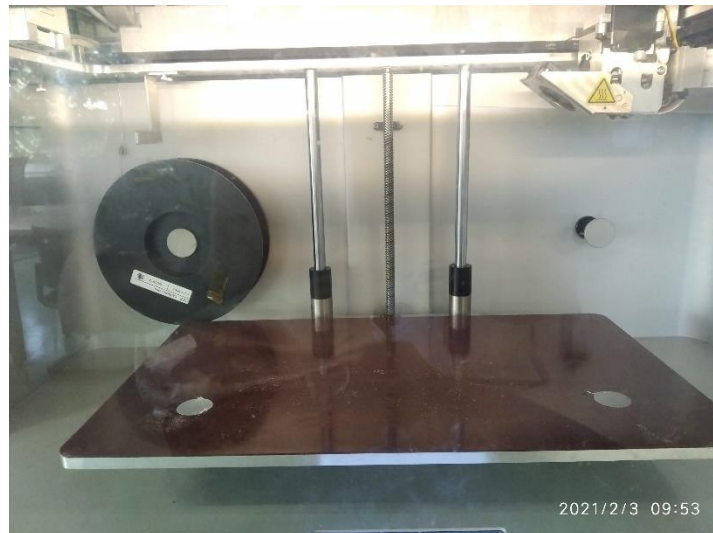
De acuerdo a lo analizado respecto a la fabricación del mosquetón con la impresora descrita a continuación, se utiliza un carrete para el nylon, el material es transportado debió a un motor el cual es calentado por un extrusor, y luego el material fundido es depositado en una cama caliente. El movimiento relativo viene determinado por sus ejes los cuales son el eje X, Y y Z, este movimiento es controlado por el software de la impresora. La fibra de carbono es depositada desde otro carrete para mezclar con el filamento de nylon fundido.

la manufactura del mosquetón se llevó a cabo en la impresora MarkTwo ED disponible en el laboratorio 312 de mecánica.

## 4.2 IMPRESORA MARK TWO 3D

la impresora mark two 3D construida de un marco unibody de aluminio que otorga a la impresora alta precisión, alrededor del proceso de impresión de refuerzo continuo de fibra (CFR) diseñada para producir piezas resistentes. También cuenta con un sistema de extrucción endurecido lo cual permite que pueda imprimir diferentes materiales entre los cuales se encuentra el nylon y la fibra de carbono. Cuenta con boquillas y tubos de alimentación de fácil acceso y mantenimiento lo que hace que sea fácil de operar. Tiene características dadas por la fabricación de filamentos fundidos (FFF) de un termoplástico y aparte de esto tiene un sistema de refuerzo de fibra de segunda generación que permite colocar fibra continua en partes. ver figura 85.

**Figura 85. Impresora Mark Two 3D.**



## 4.2.1 Características de la impresora Mark Two 3D

### 4.2.1.1 Dimensiones físicas de la impresora Mark Two 3D

**Tabla 5. Dimensiones físicas de la impresora Mark Two 3D.**

Ancho	584 mm
Profundidad	330 mm
Altura	355 mm
Peso	16 kg

Fuente: MARK FORGED (s.f.) 3d printers mark two [en línea] disponible en:  
<https://markforged.com/3d-printers/mark-two>

### 4.2.1.2 Volumen de impresión

**Tabla 6. Volumen de impresión de la impresora Mark Two 3D.**

Ancho	320 mm
Profundidad	132 mm
Altura	154 mm

Fuente: MARK FORGED (s.f.) 3d printers mark two [en línea] disponible en:  
<https://markforged.com/3d-printers/mark-two>

#### 4.2.1.3 Resolución de la capa Z

**Tabla 7. Resolución de la capa Z de la impresora Mark Two 3D.**

100  $\mu\text{m}$  – 200  $\mu\text{m}$

Fuente: MARK FORGED (s.f.) 3d printers mark two [en línea] disponible en: <https://markforged.com/3d-printers/mark-two>

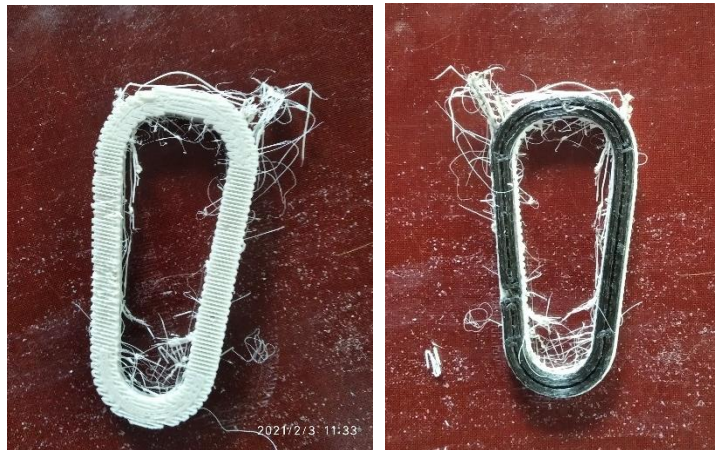
El medio de impresión específico de la impresora es filamentos de base compuestos con fibras continuas. Cabe resaltar que una de las razones por las que se escogió este tipo de fibras continuas, descrito en el desarrollo del proyecto fue por el medio de impresión.

#### 4.3 EVIDENCIA FOTOGRÁFICA.

**Figura 86. Manufactura del mosquetón de seguridad tipo HMS.**



**Figura 87. Mosquetón de seguridad tipo HMS manufacturado con matriz de nylon y con refuerzo de fibra de carbono.**



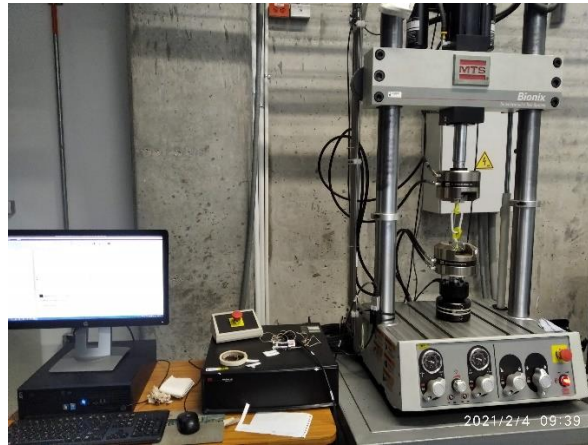
Cabe resaltar que, al realizar la manufactura del mosquetón, la impresora sufrió un daño en la boquilla de deposición del material, por lo que el mosquetón no logro llegar a manufacturarse por completo. Pudimos observar que faltaron capas de nylon, y de acuerdo al diseño analizado en ANSYS y el diámetro final que fue de 7 mm y de acuerdo a la cantidad de capas dispuesta las cuales fueron 16, se evidenció que hicieron falta aproximadamente 8 capas, y así mismo 1 mm de impresión, entonces el diámetro real se toma de 6 mm aproximadamente.

## 5. ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DISEÑO

### 5.1 MÁQUINA MTS BIONIX.

Según las especificaciones de la maquina de ensayos de tracción del laboratorio de ingeniera mecánica, está diseñada para trabajar con biomateriales como fosfatos de calcio, metales, polímeros, de nuestro interés y según los materiales del presente proyecto. El equipo consta de dos celdas de carga axial de 25 kN y 2,5 kN, respectivamente y un desplazamiento de  $\pm 57$  [mm]. Con el equipo se pueden realizar ensayos de tracción, compresión y fatiga.

**Figura 88. Máquina MTS Bionix 370.02**



El mosquetón se probó en la máquina MTS Bionix 370.02, disponible en el laboratorio de ensayos mecánicos de la escuela de ingeniería mecánica. Al realizar la prueba de tracción, lo que se desea es simular las condiciones de contorno aplicadas en el diseño, en primera instancia se utilizó una cuerda delgada y al intentar realizar la prueba se generaban concentradores de esfuerzo; Es por esto que se utilizó como accesorio una cuerda gruesa amarilla, más gruesa que la cuerda inicial la cual se evidencia en la figura 89, evitando crear concertadores de

esfuerzos, entregando condiciones de contorno más reales. Se aplicó la carga en forma de desplazamiento controlado a una tasa de 5 mm /min.

**Figura 89. Ensayo de tracción para mosquetón tipo HMS fabricado con nylon y refuerzo con fibra de carbono.**



## 5.2 ENSAYO DE TRACCIÓN

Con los datos obtenidos en la prueba de tracción se evidencio que la fuerza aplicada máxima fue de 568.95 Newtons [N], con un tiempo de 189.49 segundos [s]; teniendo en cuenta, que el mosquetón esta diseñado para soportar una carga de 1000 Newtons [N], se llegó a la conclusión que hay factores que llevaron a estos resultados tales como:

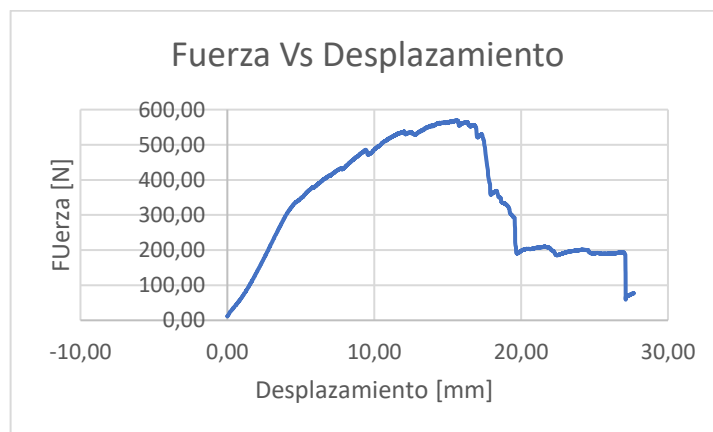
- La manufactura del mosquetón incompleta, representada en las capas faltantes de nylon y por tanto en el área transversal del material.
- La cuerda de agarre que se utilizo para realizar la prueba de tracción, la cual simula la condición de contorno de soporte.

- El diseño del mosquetón en la simulación se realizó como cuerpo rígido para facilitar su estudio y poder encontrar una maya ideal, lo cual excluye la cavidad de la barra de unión, y en la manufactura si se imprimió, lo cual genero concentradores de esfuerzos.

### 5.3 GRÁFICA FUERZA VS DESPLAZAMIENTO

Con los datos obtenidos en el ensayo de tracción del mosquetón, podemos evidenciar la fuerza continua que se le aplico, a su vez el desplazamiento que tiene el mismo, debido a la fuerza aplicada.

**Figura 90. Gráfica fuerza Vs desplazamiento del mosquetón de seguridad tipo HMS.**



Entonces en la gráfica se observa que la fuerza máxima fue de 568.95 Newtons [N] y su desplazamiento final fue de 27.66 milímetros [mm], corroborando que por factores ya mencionados estos resultados se alejan de los valores simulados en el software Ansys. Cabe resaltar, que no se realiza grafica de esfuerzo Vs deformación ya que es complejo llegar a aproximaciones cercanas debido a que el material, no esta sometido a un esfuerzo uniaxial, esto es a causa del tipo de material.

## 7. CONCLUSIONES

A continuación se enuncian las conclusiones obtenidas del prediseño, diseño y fabricación del mosquetón de seguridad tipo HMS.

Conforme al objetivo general planteado en el presente proyecto, se logró reducir el peso, debido a que el prediseño fabricado de aluminio aleado mostró un peso de 17.66 gramos (gr) y el diseño fabricado de material compuesto nylon con refuerzo con fibra de carbono mostró un peso de 6.96 gramos (gr), entonces se afirma que se presentó una reducción del peso significativa del 40%.

Al evaluar las propiedades mecánica del prediseño y diseño, se observó que tienen en común el mismo punto crítico obteniendo así un factor de seguridad de 4,47 para el prediseño. Para el diseño se estudió cada zona del mosquetón como fueron las zonas laterales, arriba y abajo las cuales están por encima del factor de seguridad del prediseño, a causa que este se hizo por un material compuesto laminado de 25 capas. Al observar el punto crítico que se presenta en el diseño, se eligió la capa 1, 10 y 25, siendo la capa 1 la primera de arriba, la 10 aproximadamente la de la mitad, y la 25 la última de abajo, generándose así un factor de seguridad de 0,814, 1,55 y 107,21 respectivamente. Cabe aclarar que el diseño al obtener valores altos en el factor de seguridad, se debe a la geometría utilizada en el proyecto, esto no quiere decir que estos valores sean erróneos, simplemente que en el diseño se podrá predecir una rotura mediante la observación y que el prediseño fallará al exceder las cargas que este pudiese aguantar sin aviso alguno, lo cual es de gran importancia en este elemento, pues está en juego la integridad de la persona.

Al determinar la distribución de esfuerzos en forma vectorial, se observó que las direcciones de los esfuerzos máximos seguían el contorno de la pieza, por lo cual se eligió fibras de forma concéntrica, siendo así la elección del tipo de fibra alineado continua además, la solicitud de impresión para la mark two es para el tipo de fibra

utilizado en el proyecto. Las fracciones volumétricas de las fibras fueron de 4.16 centímetros cúbicos [cm<sup>3</sup>] para la matriz de nylon y 2.12 centímetros cúbicos [cm<sup>3</sup>] para el refuerzo Fibra de carbono.

De acuerdo a lo propuesto en el presente proyecto, no se llevo acabo la manufactura aditiva del mosquetón completa, por medio de impresión FMD en la impresora Mark Two, utilizando el software Eiger de Markforged, el cual permitió definir los parámetros de fabricación, propuestos en el diseño.

Comparando los resultados del ensayo de tracción, dónde el mosquetón soportó una carga longitudinal de 568.95 N, con los resultados de la simulación, los cuales nos muestran una carga aplicada de 1000 N para el cual está diseñado el mosquetón, se observó que no muestran un resultado cercano a lo deseado, debido al proceso de manufactura incompleto, representado en las capas faltantes de nylon, que suman aproximadamente 1.5 milímetro (mm) de material, debido al daño que sufrió la impresora en la boquilla de deposición de material, por lo que no se alcanzó a imprimir el diseño por completo. La cuerda de agarre que se utilizó en el ensayo, la cual simula las condiciones de contorno, no logró tener el mejor agarre. El diseño del mosquetón en la simulación, se realizó como cuerpo rígido para facilitar su estudio y poder encontrar una malla ideal, lo cual excluyó el agujero del pasador en el mosquetón, dónde iría el gancho y en la manufactura si se imprimió, por lo cual este género concentradores de esfuerzos. El desplazamiento final donde el mosquetón fallo, es de 27.67 mm. Entonces por las razones mencionadas anteriormente, no se llega a una similitud cercana entre el diseño fabricado y el modelo numérico.

Para futuros estudios, se recomienda utilizar otros criterios de falla, que se pueden realizar en el módulo ACP del software ansys, como el criterio de falla de Tsai-Wu, que también es común en materiales compuestos fabricados por el método de impresión 3D.

Para futuras investigaciones se recomienda estudiar una geometría con dimensiones reales del mosquetón.

## BIBLIOGRAFIA

ANDINAUTAS. [Sitio web]. Argentina: Historia, evolución y fabricación del mosquetón de escalada. [Consulta: 16 de julio 2020]. Disponible en: <http://www.andinautas.com.ar/NotasTecnicas/Mosquetones.htm>

ASAC FORMACIÓN. [Sitio web]. Madrid: Tipos de mosquetones en escalada: según la normativa actual. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <http://asacformacion.com/?p=342>

ASAC FORMACIÓN. [Sitio web]. Madrid: Historia de las normas en el mercado en los mosquetones de escalada. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <http://asacformacion.com/?p=1182>

BAENA, Antonio. Revista técnica del deporte de competición. La Escalada como Deporte de Aventura. [En línea]. Granada (España).2007.[ Consultado 16 de julio 2020]. ISSN 1. DOI: <https://www.sporttraining.es/?s=LA+ESCALADA+COMO+DEPORTE+DE+AVENTURA>

BARBERO, Ever J. Finite element analysis of composite materials using ansys. Segunda edición. Boca Raton, FL, EE. UU. 2014. p. 103-104.

BORRACHERO, Bernardo A. Caracterización de materiales compuestos de fibras de carbono y naturales aplicados para la fabricación de componentes de automoción. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. Campus de Alcoi. Departamento de Ingeniería, 2016. p. 7

BRIGHT, Casandra Marie. [en línea]. Tesis universitaria. University of Arkansas, Fayetteville. 2014. [Consultado 16 julio 2020]. Disponible en <https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://scholar.google.es/&httpsredir=1&article=1040&context=meeguht>

CHRISTOPH, Rainer. MUÑOZ, Romero. HERNÁNDEZ, Ángel. Manufactura Aditiva. Revista Realidad y Reflexion. 2016, p. 2. ISSN 1992-6510.

CULTURA DE MONTANIA. [Sitio web]. Argentina: Evolución del equipamiento de escalda a través de la historia. [Consulta: 16 de julio 2020]. Disponible en: [http://www.culturademontania.org.ar/Historia/HIS\\_historia-escaladahielo.htm](http://www.culturademontania.org.ar/Historia/HIS_historia-escaladahielo.htm).

GUERRERO, Diego Tobías. Cálculo de la Estructura del Monocasco en Fibra de Carbono Prepreg de Vehículo Shell Eco – Maratón, Máster Universitario en Diseño y Fabricación integrada Asistidos por Computador. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2019. p. 9-10

IDC. La fabricación aditiva impulsa el mercado de impresión 3D. [En línea]. Madrid. p. 1. 2019. Disponible en: <https://impresiondigital.ituser.es/reportajes/2019/02/la-fabricacion-aditiva-impulsa-el-mercado-de-impresion-3d>

INGENIERÍA MECÁNICA. [Sitio web]. Arahal, España: Estudio de los Materiales Compuestos. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>

MARKFORGED. [Sitio web]. Boston: La Impresora 3D MarkTwo Desktop. [Consulta: 17 de marzo 2020]. Disponible en: <https://markforged.com/mark-two/>

ORTEGA, Pedro Santiago. Análisis de Autopartes de Fibra de Carbono de Geometría Simple Mediante Software. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingeniería Mecánica Automotriz. 2018. P. 10-12

SCIENCE DIRECT Criterio de estrés máximo [en línea] disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/maximum-stress-criterion#:~:text=2.1%20Maximum%20stress%20criterion,this%20criterion%20is%20less%20complicated.&text=Failure%20occurs%20once%20the%20stress,either%20in%20tension%20or%20compression.>

STUPENENGO, Franco. Materiales y Materias Primas. Barcelona: República Argentina, 2011. p.10. ISBN 987-55-0125-1

TORRES CASTILLO, Cristina Sofía. Síntesis de nanoestructura de Óxido de Grafeno Funcional izadas para el Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas del Nylon 6.6. México: Instituto Tecnológico de Ciudad de México, División de Estudios de Posgrado e Invesitcion, 2017. p. 24-25

VALERO, Eduardo. Aportaciones al Estudio de las Máquinas Eléctricas del Flujo Axial Mediante la Aplicación del Método de elementos Finitos, Tesis Doctoral. España: Universidad politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Eléctrica, UPC. 2004. p. 111-112

VELÁSQUEZ COSTA, José Antonio. Procesos de Manufactura con Tecnología 3D. Revista de Investigación Publicitaria CTSCAFE. [en línea]. 2019. [Consultado 19 de julio 2020]. ISSN 2521 - 8093. DOI: <http://ojs.ctscafe.pe/ojs-3.1.0-1/index.php/ctscafe/article/view/167>