



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

OPTIMIZACIÓN DE PESO ESTRUCTURAL PARA UN CHASIS MONOPLAZA FORMULA  
STUDENT EB17 DE LA CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ UPS SEDE CUENCA

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Mecánico Automotriz

AUTORES: HOLGER SANTIAGO CUENCA RAMÓN

KEVIN ALEJANDRO JARA ROMERO

TUTOR: ING. WILSON PATRICIO CALLE GUAMANTARIO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2022

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Holger Santiago Cuenca Ramón con documento de identificación N° 0104434261 y Kevin Alejandro Jara Romero con documento de identificación N° 0106647340; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 28 de julio del 2022.

Atentamente,



---

Holger Santiago Cuenca Ramón

0104434261



---

Kevin Alejandro Jara Romero

0106647340

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Holger Santiago Cuenca Ramón con documento de identificación N° 0104434261 y Kevin Alejandro Jara Romero con documento de identificación N° 0106647340, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Optimización de peso estructural para un chasis monoplaza Formula Student EB17 de la carrera Ingeniería Automotriz UPS sede Cuenca”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 28 de julio del 2022.

Atentamente,

---

Holger Santiago Cuenca Ramón

0104434261

---

Kevin Alejandro Jara Romero

0106647340

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Wilson Patricio Calle Guamantario con documento de identificación N° 0103551057, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: OPTIMIZACIÓN DE PESO ESTRUCTURAL PARA UN CHASIS MONOPLAZA FORMULA STUDENT EB17 DE LA CARRERA INGENIERIA AUTOMOTRIZ UPS SEDE CUENCA, realizado por Holger Santiago Cuenca Ramón con documento de identificación N° 0104434261 y por Kevin Alejandro Jara Romero con documento de identificación N° 0106647340, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 28 de julio del 2022

Atentamente,



---

Ing. Wilson Patricio Calle Guamantario, MSc.

0103551057

## **DEDICATORIA**

*Todo lo alcanzado y aprendido se lo dedico al esfuerzo de mis padres Juan Jara y Sandra Maribel quienes hicieron posible que pueda llegar hasta estas estancias de la vida por eso en honor a ellos y su sacrificio les dedico con todo el orgullo deseado a mis queridos padres, a mi querido hermano que está en el cielo viéndome orgulloso de esta meta más en mi vida, a las personas quienes fueron parte de este proyecto como profesores, amigos, compañeros y demás familiares junto con su aporte va este agradecimiento de igual manera gracias a todos.*

*A una persona muy especial en mi vida a Verónica Auquilla por el apoyo y por brindarme de su tiempo le agradezco y se lo dedico.*

*Kevin J.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a Dios primero por permitirme seguir cumpliendo una meta más en mi vida, a mis queridos padres, familiares, mi enamorada quienes estuvieron en este gran proyecto que estoy cumpliendo por el apoyo incondicional se les agradece de todo corazón.*

*A mi tutor el Ing. Wilson Calle por todo el apoyo y por su gran conocimiento un agradecimiento de la manera más honorable.*

*Kevin J.*

## **DEDICATORIA**

*Dedico esta tesis a mis padres, quienes con su aporte de vida y su dedicación pudieron sacar un alma perdida adelante pese a todos los inconvenientes. Dedico la tesis a las personas más cercanas que estuvieron en el proceso y las cuales fueron de apoyo y sin duda una gran alegría.*

*Holger C.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a la universidad por haberme dado la oportunidad de saber quién soy en realidad y darme cuenta que el mundo no está perdido, sino que hay que verlo de otra forma para cumplir las metas, agradezco nuevamente a mis padres, amigos, hermano y novia; y como diría Gustavo Cerati “No solo no hubiéramos sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a nuestro alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy, Gracias Totales”.*

*Holger C.*



## RESUMEN

Con el avance de la tecnología en diferentes campos de la ingeniería, existe grandes cambios, para la fabricación de elementos mecánicos; tanto para la ingeniería electrónica y eléctrica en los vehículos eléctricos, por ende, repercute de manera directa en las diferentes disciplinas de una competencia de Formula SAE y como en cualquier cambio tecnológico innovador se tiene un desconocimiento acerca de las herramientas de solución que se tiene.

Con el siguiente proyecto se pretende optimizar el peso de un Chasis monoplaza mediante un rediseño a partir de diseños ganadores de distintas universidades del mundo, tomando en cuenta que el principal problema fue la modificación de potencia en su motor eléctrico, de manera adicional se procederá con el mantenimiento y arreglo de la suspensión, que servirá para evitar roturas en el sistema y obtener así resultados con errores mínimos en comparación al diseño original. tomando en cuenta el material y los diferentes tipos de restricciones que se maneja en el reglamento 2022 del Formula SAE.

Con el fin de generar un antecedente, este proyecto inicia con la historia de la competencia Formula SAE, así como los tipos de chasis que existen y diferentes disposiciones.

Para la optimización del chasis se pretende indagar sobre las distintas disposiciones y reglamentos a seguir, como las características que tienen con respecto a la competencia de vehículos eléctricos.

De igual manera se analizará los diferentes tipos de impactos y esfuerzos a los que el chasis este sujeto, como impactos laterales, impactos frontales, volcamiento, esfuerzo de frenado y arranque, esfuerzo de las ruedas reflejado en el chasis en una curva. Para mencionados análisis, la investigación será enfocada en proyectos relacionados con la misma categoría, libros, artículos científicos, revistas.

Con la investigación obtenida servirá como una base para realizar diferentes tipos de triangulaciones en el chasis, partiendo de modelos previos y factores que influyen en su construcción y comportamiento en los diferentes tipos de pruebas. Con la ayuda del software “Ansys” y “SolidWorks”, en donde se podrá modificar de manera libre el chasis tubular, tomando

en cuenta los parámetros y reglamentos 2022 del formula SAE. Seguidamente, se procederá a modificar el modelo físico original en donde se cortará los miembros estructurales y se soldará una cantidad minoritaria de elementos.

*Palabras Claves: Chasis, optimización, SAE.*

## ABSTRACT

The advancement of technology in different fields of engineering, there are great changes for the manufacture of mechanical elements, for electronic and electrical engineering in electric vehicles, it has a direct impact on the different disciplines of FSAE competition and as in any innovative technological change there is a lack of knowledge about the solution tools that are available.

The following project to optimize the weight of a single-seater chassis through a redesign based on winning designs from different universities around the world, taking into account that the main problem was the modification of power in its electric motor, in addition we will proceed with the maintenance and arrangement of the suspension, which will serve to avoid breakage in the system and thus obtain results with minimal errors compared to the original design, taking into account the material and the different types of restrictions that are handled in the 2022 Formula SAE regulations.

In order to generate a background, this project starts with the history of the Formula SAE competition, as well as the types of chassis that exist and different arrangements.

For the optimization of the chassis, it is intended to inquire about the different provisions and regulations to be followed, such as the characteristics they have with respect to the competition of electric vehicles.

The different types of impacts and stresses to which the chassis is subject will be analyzed, such as side impacts, frontal impacts, rollover, braking and starting effort, and wheel effort reflected on the chassis in a curve. For the above-mentioned analysis, the research will be focused on projects related to the same category, books, scientific articles, journals.

With the research obtained will serve as a basis for performing different types of triangulations on the chassis, starting from previous models and factors that influence in the construction and behavior in different types of tests. With "Ansys" and "SolidWorks" software, where the tubular chassis can be freely modified, considering the parameters and regulations 2022

of the FSAE. Then, we will proceed to modify the original physical model where the structural members will be cut and a minority number of elements will be welded.

Keywords: Chassis, optimization, SAE.

## INDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b> .....	I
<b>CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b> .....	II
<b>CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b> .....	III
<b>DEDICATORIA</b> .....	IV
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	V
<b>DEDICATORIA</b> .....	VI
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	VII
<b>RESUMEN</b> .....	VIII
<b>ABSTRACT</b> .....	X
<b>I. INTRODUCCION</b> .....	1
<b>II. PROBLEMA</b> .....	2
i. Antecedentes .....	2
ii. Importancia y alcance.....	2
iii. Delimitación.....	2
<b>GRUPO OBJETIVO</b> .....	3
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos .....	3
<b>1. Revisión teórica del estado del arte</b> .....	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Formula SAE .....	4
1.2.1 Competencia Formula SAE.....	4
1.2 Chasis y Estructura .....	7
1.3 Protección antivuelco y posición del piloto.....	8
1.3.1 Plantilla de conductor .....	9
1.5 Arco frontal.....	10
1.6 Arco principal .....	11
1.7 Tirantes de arco principal .....	11
1.8 Protección de reposacabezas .....	13

1.9 Tirantes de arco delantero.....	13
1.10 Estructura lateral de impacto .....	14
1.11 Montaje de Arnés de hombros.....	15
1.12 Soportes de templadores del arco principal.....	15
1.13 Protección frontal del chasis.....	16
1.15 Placa anti- intrusión.....	17
1.16 Método geométrico para calcular la altura del arco frontal.....	18
1.17 Cargas aplicadas a la estructura.....	18
1.17.1 Torsión longitudinal .....	18
1.17.2 Flexión vertical.....	20
1.17.3 Flexión lateral.....	20
1.17.4 Horizontal lozening. ....	21
1.18 Estimación de cargas .....	21
1.19 Análisis por elementos finitos .....	23
1.19.1 Análisis lineal y no lineal .....	24
1.19.2 Tipos de elementos finitos.....	24
1.20 Chasis tubulares usados en la competencia de formula SAE .....	26
1.21 Marco metodológico.....	28
Introducción.....	28
1.21.1 Metodología de Diseño. ....	29
1.21.2 Identificación de la necesidad .....	29
1.21.3 Investigación preliminar.....	30
1.21.4 Planteamiento de objetivos.....	30
1.21.5 Especificaciones de desempeño. ....	30
<b>2. Desarrollo del diseño y evaluación.....</b>	<b>32</b>
2.1 Distribución de masas principales en el chasis.....	32
2.2 Posición de conducción del piloto .....	34
2.3 Geometría de la suspensión. ....	36
2.4 Desarrollo del rediseño del chasis. ....	37
2.5 Determinación de cargas presentes en la estructura. ....	40
Transferencia de masa lateral. ....	40
Trasferencia de masa longitudinal y frenado.....	42

2.6	Análisis por elementos finitos. ....	45
2.7	Convergencia de solución y densidad del mallado.....	48
2.8	Análisis de rigidez torsional. ....	49
2.9	Análisis de rigidez longitudinal.....	52
2.10	Análisis de frenado. ....	54
2.11	Simulación de impacto lateral. ....	55
2.12	Simulación de vuelco.....	57
2.13	Costos de construcción .....	58
<b>3.</b>	<b>Reconstrucción y rediseño</b> .....	<b>60</b>
3.1	Corte, desbaste y pulido de elementos del miembro estructural original .....	60
3.2	Construcción de miembros estructurales .....	62
3.3	Corte de miembros estructurales del chasis.....	63
3.4	Análisis no destructivos de soldadura .....	66
3.5	Análisis de resultado.....	72
3.5.1	Análisis de resultados finitos.....	72
3.6	Resultados de pruebas .....	73
	<b>Conclusiones</b> .....	<b>73</b>
	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>74</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	<b>76</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Medidas de seguridad para arcos antivuelco.....	8
Figura 1.2 Plantilla del conductor .....	10
Figura 1.3 Tirantes de Arco principal .....	12
Figura 1.4 Estructura lateral de impacto.....	14
Figura 1.5 Altura máxima del arco frontal mediante el método geométrico.....	18
Figura 1.6 Deformación producida por la torsión longitudinal.....	19
Figura 1.7 Flexión vertical .....	20
Figura 1.8 Flexión Lateral .....	20
Figura 1.9 Horizontal lozening.....	21
Figura 1.10 Ejemplo de nodos y mallas .....	23
Figura 1.11 Elementos finitos tipo Shell .....	25
Figura 1.12 Elementos tipo viga (Beam).....	25
Figura 1.13 Formula SAE 2020 Universidad de Michigan.....	27
Figura 1.14 Formula SAE 2020 de la Universidad de San José.....	27
Figura 1.15 Formula SAE 2021 (ZER19) de la Universidad de Arkon.....	28
Figura 1.16 Metodología de diseño [23] .....	29
Figura 2.1 Distribución de masas principales.....	33
Figura 2.2 Ubicación del centro de gravedad.....	34
Figura 2.3 Medidas antropométricas del percentil .....	35
Figura 2.4 Posición de conducción.....	36
Figura 2.5 Distancia de visibilidad del piloto a la calzada.....	36
Figura 2.6 Encaje del sistema de suspensión al chasis.....	37
Figura 2.7 Mala unión del antiguo diseño de chasis .....	38
Figura 2.8 Rediseño de chasis .....	39
Figura 2.9 Rediseño de la estructura de impacto.....	40
Figura 2.10 Transferencia de masa lateral.....	41
Figura 2.11 Transferencia de masa longitudinal.....	43
Figura 2.12 Elementos finitos tipo beam.....	46
Figura 2.13 Elemento finito tipo Shell.....	46
Figura 2.14 Superficie intermedia de miembro estructural.....	47
Figura 2.15 Nodo sin contacto de superficie.....	47
Figura 2.16 Unión de superficies intermedias.....	48



Figura 2.17 Densidad y fiabilidad del mallado. ....	48
Figura 2.18 Cargas aplicadas de Rigidez Torsional. ....	49
Figura 2.19 Resultado de deformación.....	50
Figura 2.20 Distancia de deformación $y_1$ .....	51
Figura 2.21 Distancia de deformación de $x_1$ .....	51
Figura 2.22 Esfuerzo de rigidez torsional.....	53
Figura 2.23 Deformación de rigidez torsional.....	53
Figura 2.24 Esfuerzo en análisis de frenado.....	54
Figura 2.25 Deformación en análisis de frenado.....	55
Figura 2.26 Deformación en impacto lateral.....	56
Figura 2.27 Esfuerzo en impacto lateral.....	56
Figura 2.28 Deformación en una simulación antivuelco.....	57
Figura 2.29 Esfuerzos en una simulación antivuelco. ....	58
Figura 3.1 Desface de parte superior delantera. ....	61
Figura 3.2 Sujeción de elementos rotativos para el volante .....	61
Figura 3.3 Amortiguador delantero derecho Ohlins.....	62
Figura 3.4 Aplicación de plantillas en fabricación de miembros estructurales .....	63
Figura 3.5 Corte de estructura lateral de impacto.....	64
Figura 3.6 Soldadura de tirantes delanteros entre mampara delantera y frontal .....	65
Figura 3.7 Soldadura de estructura lateral de impacto por la parte interior .....	65
Figura 3.8 Uso de tinta penetrante en cordon de soldadura.....	66
Figura 3.9 Uso de tinta reveladora y proceso final de acabado .....	67
Figura 3.10 Pintado del nuevo chasis.....	68
Figura 3.11 Formula SAE EB17 .....	68
Figura 3.12 Formula SAE EB17 rediseñado .....	69
Figura 3.13 Parte trasera SAE EB17 .....	70
Figura 3.14 Parte trasera Formula SAE EB17 rediseñado .....	70
Figura 3.15 Arco delantero SAE EB17 .....	71
Figura 3.16 Arco delantero SAE EB17 modificado.....	71

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	5
Magnitudes para construcción de chasis .....	5
Tabla 2.....	7
Dimensiones mínimas para construcción de chasis.....	7
Tabla 3.....	22
Masas del vehículo.....	22
Tabla 4.....	22
Requisitos de análisis estructural .....	22
Tabla 5.....	32
Masas principales .....	32
Tabla 6.....	34
Dimensiones en percentiles masculinos y femeninos .....	34
Tabla 7. Lista de materiales para optimización del chasis Formula SAE EB17 .....	58

## **I. INTRODUCCION**

La optimización del chasis para un formula SAE EB17 parte desde un objetivo principal el cual es sacar el mayor provecho de los materiales y que los mismos ofrezcan una resistencia igual o superior; de esta forma el proyecto se divide en varias formas como: línea de la investigación, el modelado y la aplicación.

El trabajo se lo realiza debido a un cambio en el paquete de baterías y baja potencia, por lo cual el vehículo debe ser más liviano para poder mover su masa inercial. El proyecto debe tener bases en las cuales se puede desencadenar una investigación a fondo sobre el tema, se tomará en cuenta los aspectos más importantes para el diseño y la ergonomía. Se debe apreciar que el vehículo con la investigación deberá cumplir requisitos tanto del nuevo reglamento FSAE 2022 y además ser compatible con el proyecto físico. Se analizará proyectos de distintas universidades para apreciar diferentes tipos de triangulaciones en los chasis tubulares.

Se analizará las cargas y deficiencias que tiene el primer vehículo, luego se modificara hasta poder obtener un chasis geoméricamente estable y cumpliendo previamente con las etapas de diseño. Se examinará cada esfuerzo y movimiento que tenga el vehículo, para asegurar que el diseño propuesto sea lo más eficiente.

Como fase final se planteará unas pruebas no destructivas, las cuales servirán como verificación de los diferentes procesos de construcción, ofreciendo fiabilidad y garantía.

## **II. PROBLEMA**

### **i. Antecedentes**

En el mundo de la competencia de automóviles o monoplaça, el peso y la aerodinámica son uno de los factores más importantes, por lo tanto, la reducción de peso en el chasis representa ganancias significativas al momento de desplazar su masa inercial. parte del problema es la reducción de potencia en las baterías, debido a una nueva ingeniería que se realizara para el conjunto de baterías de alto voltaje del SAE EB17; en los cálculos obtenidos al inicio de su vida útil, se contó con 4.08kW y alcanza un voltaje de 408VDC (Santiago Chuquimarca, 2017). En la actualidad cuenta con 370VDC y con una potencia de 3.70kW; lo cual significa que se generó una pérdida de 10.31% de potencia inicial con la que contaba el modelo.

### **ii. Importancia y alcance**

La propuesta de optimizar un chasis para el SAE EB17 perteneciente a la Carrera de Ingeniería Automotriz; se han obtenidos cálculos, teniendo en cuenta que el peso del chasis es de 35kg, se presenta un nuevo desafío, el cual es reducir el peso del mismo en un 10.31% o más, debido a la nueva estructura de baterías reformulada por los estudiantes de Ingeniería Automotriz. Se plantea corregir fallas en el diseño anterior que han provocado que los componentes mecánicos tengan un prematuro desgaste y se vieran afectados directamente para mantenimientos correctivos.

### **iii. Delimitación**

La Universidad Politécnica Salesiana en el desarrollo del campo investigativo se ha dado paso al enfoque sobre la eficiencia del diseño y la construcción optimizando los pesos al mínimo, con la finalidad de que el monoplaça sea más eficiente con los nuevos reglamentos 2022 del Formula SAE, beneficiando al Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte (GIIT) y de manera puntual a la línea de Diseño Mecánico Automotriz

## **GRUPO OBJETIVO**

Con la propuesta del proyecto, se busca beneficiar al Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte (GIIT) y de manera puntual a la línea de Diseño Mecánico Automotriz.

## **III. OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Optimizar de peso estructural para un chasis monoplace Formula Student EB17 de la carrera de Ingeniería Automotriz UPS Sede Cuenca.

### **Objetivos Específicos**

- Realizar una revisión teórica del estado del arte, mediante revisión bibliográfica para el análisis, diseño y proceso de construcción del chasis Formula SAE EB17.
- Rediseñar el chasis del Formula SAE EB17 mediante software de simulación SolidWorks y ANSYS, para mejorar la eficiencia del vehículo a través de la reducción de su peso.
- Implementar el rediseño de un chasis monoplace Formula Student EB17 de la carrera de Ingeniería Automotriz UPS Sede Cuenca.

## **1. Revisión teórica del estado del arte**

### **1.1 Introducción.**

A continuación, se describirán temas orientados en el perfeccionamiento del chasis tubular; como primer punto se dará a conocer sobre la competencia del Formula SAE; los reglamentos y exigencias que debe cumplir de acuerdo a la regulación pre establecida; continuando con una investigación teórica acerca de los tipos y particularidades de los materiales empleados para la construcción de un chasis.

Se efectuará un estudio con respecto a proyectos dirigidos a la construcción de bastidores tubulares, que forman una estructura en forma de celosía o perimetral, con el propósito de tener una idea clara

de diseño y optimización; con esto llevar a cabo una indagación exhaustiva del estado del arte de los chasis tubulares empleados en las competencias Formula SAE.

## **1.2 Formula SAE**

### **1.2.1 Competencia Formula SAE**

Formula SAE se divide en muchos tipos de competencia, las cuales son: SAE Aero Desing, AutoDriver Challenge, Baja SAE, SAE Clean Snowmobile Challenge, Formula Hybrid, Formula SAE, Formula SAE Electric. Cada evento se realiza en un país distinto, es decir que las competencias entre estudiantes son alrededor del mundo. Las competencias en general se centran en el diseño y construcción del mismo, se aplican conocimientos técnicos, estrategias de diseño, los cuales son presentados y evaluados por los jueces en diferentes eventos (FORMULA SAE, 2022).

Las categorías en las que el vehículo participa son:

- **Suspensión:** Se califica el diseño, la construcción, detalles/ removimiento de impurezas, se analiza las ruedas, los brazos de suspensión, anclajes de la dirección, resortes, amortiguadores, geometría y está considerado en las pruebas dinámicas del vehículo. Selección y uso del material.
- **Estructura, cuerpo, aerodinámica:** Se califica la estructura primaria (tubular, semi tubular, monocasco y su respectiva aerodinámica), sistema de conductos, rigidez y métodos de deformación, análisis de cargas, selección y uso de materiales.
- **Tracción, manejo, sistema de recuperación:** Se evalúa el acumulador o acumuladores, conversión de controladores y motor, consideraciones de conexiones, transmisión, par motor, frenos regenerativos y de igual forma la selección y uso de los materiales.
- **Cabina, controles, frenado y seguridad:** Interfaces de la unidad, asiento, cinturones de seguridad, volante de dirección, columna de dirección, panel de control, medidas de cabina de conductor y protección, facilidad de control, pedales, sistemas de frenado, selección y uso de materiales.

- **Sistemas de gestión e integración:** Diseño de integración, administración esquemática, se califica de igual forma si los archivos están protegidos, existe una organización de métodos, herramienta utilizada, cuales fueron utilizadas y cuales fueron creadas.
- **Manufactura y servicio:** se califica si es fácil de reparar, existen sistemas los cuales se puede intercambiar en el diseño de manufactura, también se califica si el vehículo necesita herramienta especial para el diagnóstico y reparación del vehículo.
- **Estilo:** Califican el diseño y su apariencia, es un vehículo el cual fue realizado de manera profesional o no.
- **Creatividad:** Se observa si el carro siguió todas las reglas o algo cambio, también se califica como creatividad a algo que los jueces deben aprender, o tiene nuevas innovaciones las cuales merecen puntos especiales.

La sección en la cual se desarrollan más los puntos sobre la construcción del chasis y sus reglas son los apartados F1 hasta el F11 del reglamento Formula SAE 2022 versión 21 de diciembre del 2021, en los cuales se detalla protecciones, construcción y atenuadores, los cuales están relacionados directamente con la seguridad del chasis y su manufactura.

Algunos de los requerimientos para la construcción del chasis deben cumplir con las siguientes aplicaciones:

**Tabla 1**

**Magnitudes para construcción de chasis**

<b>Aplicación</b>	<b>Tubo de acero debe cumplir con la siguiente magnitud</b>	<b>Material alternativo para tubos permitidos</b>
Arco Frontal	Magnitud B	Si
Suporte del Arco Frontal	Magnitud C	Si
Armazón de arco de cabina	Magnitud A	Si

Tirantes de arco de cabina	Magnitud B	Si
Estructura lateral de impacto	Magnitud B	Si
Miembro múltiple lateral superior de impacto	Magnitud D	Si
Arco principal	Magnitud A	No
Tirantes de arco principal	Magnitud B	No
Soportes de tirantes del arco principal	Magnitud C	Si
Estructura de fijación de cinturones de seguridad	Magnitud B	Si
Barra de montaje de cinturones del hombro	Magnitud A	No
Tirantes de barra de montaje de cinturones de hombro	Magnitud C	Si
Estructura de protección del acumulador	Magnitud B	Si
Componentes de protección	Magnitud C	Si
Otros tubos estructurales	Magnitud C	Si

Fuente: (FORMULA SAE, 2022)

A continuación, se presentará una tabla la cual contiene los requerimientos mínimos para la construcción con tubería de acero, cabe recalcar que un tubo debe cumplir con los cuatro requisitos mínimos para cada tamaño especificado.



**Tabla 2****Dimensiones mínimas para construcción de chasis**

<b>Tubo</b>	<b>Área mínima Momento inercial</b>	<b>Área de sección transversal mínima</b>	<b>Diámetro exterior mínimo</b>	<b>Espesor de pared mínima</b>	<b>Ejemplos de medidas de tubos</b>
a. Magnitud A	11320 mm <sup>4</sup>	173 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	2.0	1.0" x 0.095" 25 x 2.5 mm
b. Magnitud B	8509 mm <sup>4</sup>	114 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.065" 25.4 x 1.6 mm
c. Magnitud C	6695 mm <sup>4</sup>	91 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.049" 25.4 x 1.2 mm
d. Magnitud D	18015 mm <sup>4</sup>	126 mm <sup>2</sup>	35.0 mm	1.2 mm	1.375" x 0.049" 35 x 1.2 mm

Fuente: (FORMULA SAE, 2022)

**1.2 Chasis y Estructura**

El chasis es el ensamblaje estructural fabricado que soporta todos los sistemas funcionales del vehículo. El ensamblaje puede ser una única fabricación, múltiples estructuras fabricadas o una combinación entre estructuras y soldaduras.

A continuación, se tiene varias combinaciones de componentes que debe tener, las cuales son:

- Armazón de atenuador de impactos delantero (arco frontal) y soporte de atenuador de impactos.

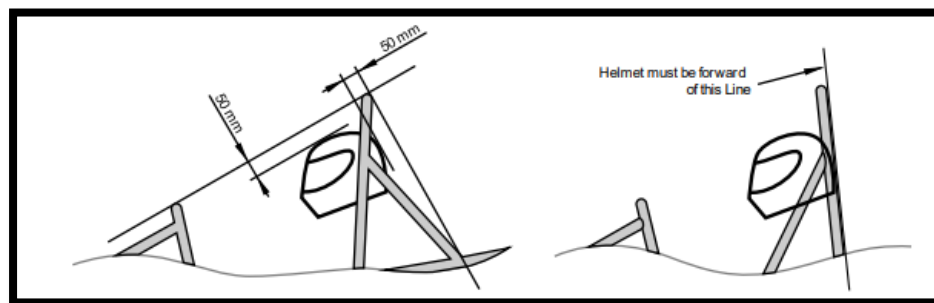
- Armazón de cabina para piloto, armazón superior de protección de piloto, templadores de parte trasera de chasis y soportes.
- Estructura lateral de impacto.
- Protección del sistema de tracción y protección del sistema de impacto trasero.
- Sistemas de sujeción de marcos para el conductor.

### 1.3 Protección antivuelco y posición del piloto.

Cuando el piloto está sentado en posición normal de conducción, se encuentra con los cinturones de seguridad y considerando un percentil 95 porciento masculino deberá cumplir:

- Un mínimo de 50mm desde la línea recta trazada desde la parte superior del arco principal hasta la parte superior del armazón delantero.
- Un mínimo de 50 mm de la línea recta dibujada entre la posición de la parte superior del arco principal y el extremo inferior de los refuerzos del arco, si los mismos se extienden hacia atrás.
- Si los refuerzos del arco principal se extienden hacia la parte delantera, el casco no debe atravesar el arco principal. (FORMULA SAE, 2022)

Figura 1.1 Medidas de seguridad para arcos antivuelco.



Fuente: (INTERNATIONAL, 2021, pág. 32)

### **1.3.1 Plantilla de conductor**

Un plano de dos dimensiones será usado para representar el 95 por ciento masculino para seguir las siguientes dimensiones presentadas en la figura (1.1).

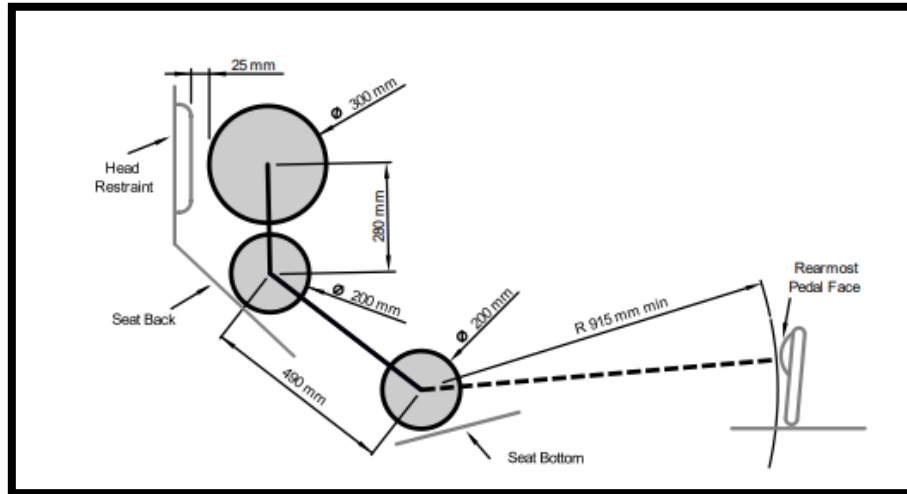
- Un círculo de 200 mm de diámetro representara las caderas y nalgas del conductor.
- Un círculo de 200mm de diámetro representara los hombros y la región cervical
- Un círculo de 300mm de diámetro representara la cabeza (con casco)
- Una línea recta de 490mm unirá los centros de los dos círculos de 200mm.
- Una línea recta de 280mm unirá los centros de los círculos superiores de 200 mm y el círculo de la cabeza de 300mm. (FORMULA SAE, 2022)

### **1.4 Plantilla de posición del conductor.**

La plantilla de posición del conductor será posicionada como:

- El asiento será ajustado a la perspectiva trasera
- Los pedales serán puestos en la perspectiva más adelantada.
- La circunferencia superior de 200 mm será ubicada en la localidad inferior del asiento donde la distancia entre el centro de menciona circulo y la cara más lejana de los pedales no exista menos de 915mm.
- La circunferencia el cual representa los hombros tiene una medida de 200 mm, el cual será posicionado en la parte del asiento.
- La cabeza representada con un círculo de 300 mm se ubicará a no más de 25 mm del reposa cabeza (donde se encuentra el casco del conductor mientras está sentado). (FORMULA SAE, 2022)

Figura 1.2 Plantilla del conductor



Fuente: (INTERNATIONAL, 2021, pág. 33)

## 1.5 Arco frontal

- El arco frontal debe ser estructurado en sección cerrada de tubos de metal.
- Con una limpia triangulación, el arco frontal debe ser fabricado por más de una pieza de tubería.
- El arco frontal debe extenderse desde el miembro del armazón más bajo en un lado del armazón hasta arriba, de igual forma hacia arriba y hacia abajo hasta el miembro de marco más bajo del otro lado.
- La superficie superior del aro delantero no debe ser más baja que la parte superior.
- El arco delantero no debe pasar a más de 250 mm del volante. Este trayecto se mide a nivel central del vehículo, desde la zona trasera del arco delantero a la superficie delantera del arco del volante con la dirección en la posición de frente.
- De vista lateral cualquier parte del arco frontal por encima de la estructura de impacto del lado superior debe ser inclinado menos del 20° de la vertical.

## 1.6 Arco principal

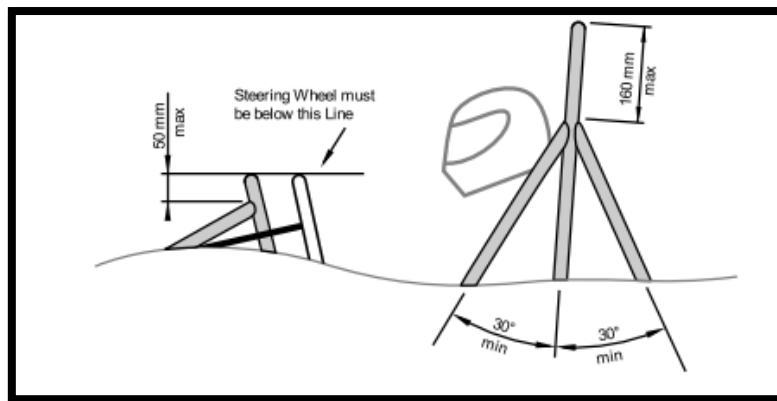
- El arco principal tiene que ser un solo elemento constructivo de tubería de acero continua y sin cortar.
- En la vista delantera del chasis, los miembros verticales del arco principal deben tener un mínimo de separación de 380 mm (dimensión interior), en donde el arco principal se encuentra unido a la parte inferior de los tubos de la estructura mayor del chasis.
- El arco principal debe extenderse desde el miembro de estructura más bajo / parte inferior del monocasco en un lado del marco, arriba y hasta el miembro más bajo / parte inferior del monocasco al otro lado del marco.
- Desde la vista lateral del vehículo debe:
  - a. La parte del arco principal que se encuentra por encima de su punto de unión con el impacto lateral superior el rubo debe estar a menos de 10° del eje vertical.
  - b. Cualquier doblez en el arco principal por encima de su punto de unión a la estructura principal del chasis debe sujetarse a un nodo de la estructura de soporte de un templador del arco principal con unión de tubería.
  - c. El arco principal debajo del accesorio del miembro de impacto del lado superior:
    - Puede estar hacia adelante en cualquier ángulo.
    - No debe estar hacia atrás más de 10° del eje vertical.

## 1.7 Tirantes de arco principal

- Los tirantes de los arcos principales deben construirse con tubería de acero de sección cerrada las cual debe cumplir con las especificaciones (Tabla 1).
- El arco principal debe estar sostenido por dos tirantes que se extiendan desde la parte frontal hacia atrás, para ambos lados del arco principal.

- En la vista lateral del marco, el arco principal no debe descansar sobre el mismo sitio de la línea vertical a través de la posición superior del arco principal, dando a conocer que si el arco se inclina hacia la parte frontal los tirantes deberán apuntar hacia la parte delantera del arco, por el otro lado si tiene una inclinación hacia atrás, los elementos constructivos deben estar por detrás del arco antes mencionado.
- Los tirantes del arco principal comprometen fijarse 160 mm o menos por debajo de la superficie del arco principal, los tirantes trataran de situarse lo más cercano de la parte superior del aro principal.
- Los ángulos que se encuentra entre los tirantes y el arco principal deben ser de 30° o más.
- Los tirantes del arco frontal deben ser rectos sin dobleces y debe cumplir con los requisitos de:
  - a. Integrado de forma segura al marco
  - b. Capaz de transmitir todas las cargas del aro principal a la estructura principal sin que el chasis falle.

Figura 1.3 Tirantes de Arco principal



Fuente: (INTERNATIONAL, 2021, pág. 34)

## **1.8 Protección de reposacabezas**

Si se usa, el miembro de marco de protección de reposacabezas debe:

- a. Fije a los nodos donde los tirantes del arco principal se conectan
- b. Construirse en una sola pieza de tubería de acero de sección cerrada continua sin cortes.
- c. Para el doblado de cualquier radio, comprendido en la línea central, requiere que sea de tres o más veces el diámetro exterior del tubo y además en los dobleces realizados tendrán que ser continuas, sin evidencia de aplastamiento o falla de pared.
- d. El soporte no debe acoplarse a la protección del reposacabezas.

## **1.9 Tirantes de arco delantero**

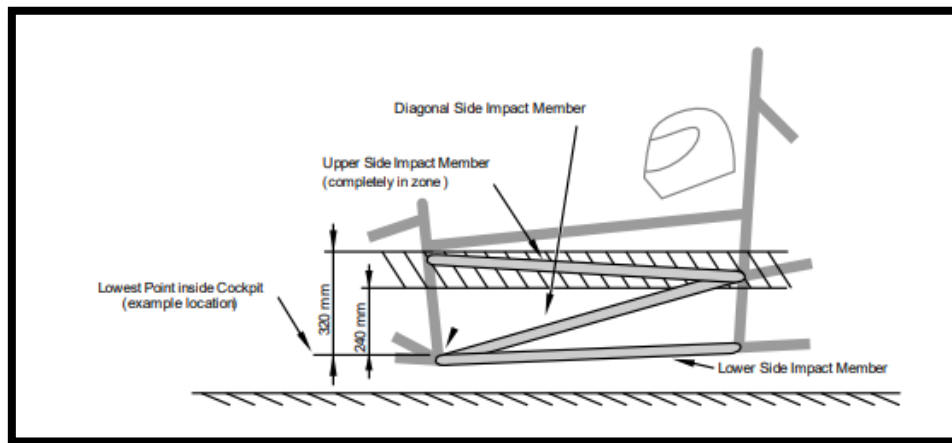
Los tirantes del arco delantero deben construir con material que cumpla las magnitudes mencionadas en la tabla 1.

- El arco delantero debe estar soportado por dos tirantes que se extiendan en dirección hacia adelante, en la parte izquierda y derecha del chasis.
- Los refuerzos del arco delantero deben construir para ser de protección de piernas y proteger la estructura frente a los pies del conductor.
- Los refuerzos del arco delantero deben sujetarse próximos a la parte superior del arco delantero, pero tampoco deberá superar de 50 mm por debajo del plano superior del arco frontal, como se presenta en la figura a continuación (figura 1.3)
- Si el arco delantero sobre la estructura de impacto del lado superior se inclina hacia atrás más de 10° desde el eje vertical, debe estar soportado por refuerzos del arco delantero para tener una triangulación total de nodos estructurales.
- Los tirantes del arco delanteros deben ser rectos sin dobleces.

## 1.10 Estructura lateral de impacto

- Los miembros del maco de la estructura de impacto lateral deben construirse con tubería de sección cerrada, para los miembros de la estructura lateral de impacto con la triangulación conveniente.
- Los miembros constructivos del chasis en la parte de impacto lateral se pueden fabricar con varios elementos, la estructura lateral de impacto debe estar comprendida por tres o más elementos estructurales situados en cada lado del conductor cuando este se encuentra recostado en la posición normal de manejo como se muestra en la figura 1.4

Figura 1.4 Estructura lateral de impacto



Fuente: (INTERNATIONAL, 2021, pág. 38)

- El miembro de impacto del lado superior debe:
  - a. Enlazar el aro delantero y el aro principal
  - b. Estar enteramente en una zona paralela al suelo entre 240 mm y 320 mm por encima el punto más bajo del plano superior del tubo de impacto lateral inferior, El larguero del marco superior se puede usar como entre-tubo si cumple con la altura, el diámetro y los requisitos del espesor, por otra parte, la estructura de impacto lateral inferior debe conectar la parte inferior del arco delantero. El larguero del marco inferior del tubo debe de cumplir con los requisitos del espesor de la tabla 2.



- El tubo lateral diagonal de impacto debe:
  - a. Conecte el tubo de impacto del lado superior y el tubo de impacto del lado inferior delante del arco principal y aparte trasera del arco delantero.
  - b. Triangular completamente la estructura lateral creadas con la parte lateral superior y la base inferior de cada lado.

### **1.11 Montaje de Arnés de hombros**

La barra de montaje del arnés para los hombros debe cumplir:

- a. El tubo debe ser una sola pieza de acero de sección cerrada y continua el cual debe cumplir los requisitos de la tabla 1 y tabla 2.
- b. Fije el arco principal en ambos lados del chasis.

Las barras de montaje del arnés para hombros los cuales tienen que cumplir con:

- a. Tubos templadores unidos en la curva y arco principal
  - El material para los templadores de la barra de arnés de hombro debe cumplir con la Tabla 1.
  - El ángulo de la vista lateral entre la barra del arnés para hombros y los tirantes no debe ser inferior a 30°. (FORMULA SAE, 2022)

### **1.12 Soportes de templadores del arco principal**

Los segmentos de la estructura del sistema de soporte de los templadores del arco principal deben cumplir con las magnitudes de la Tabla 2.

El extremo inferior de los templadores del arco principal mediante soportes tubulares a los miembros del marco en cada lado del chasis:

- a. Una sección tubular inferior y superior deben hacer una correcta triangulación de los tubos, el segmento de soporte superior tiene que unirse al nodo donde se encuentra el miembro constructivo de impacto lateral.

- b. La sección tubular de soporte inferior debe unirse al nodo donde está conectado el arco principal.
- c. Cada uno de las secciones tubulares pueden ser tubos doblados o múltiples, siempre y cuando cumplan los requisitos de las tablas antes mencionadas (Tabla 1, Tabla 2).
- d. En el SES (Structural Equivalency Spreadsheet) se puede encontrar ejemplos de configuraciones aceptables para secciones tubulares.

### **1.13 Protección frontal del chasis**

Requisitos:

- Delante de arco frontal debe existir un atenuador de impacto entre la placa frontal y el atenuador.
- Todas las técnicas de fijación del atenuador de impacto a la placa de anti - intrusión del arco frontal deben proporcionar las suficientes rutas de cargas, si se llegara a producir impactos fuera del eje. (FORMULA SAE, 2022)

### **1.14 Placa Anti - intrusión AIP**

Debe ser una de las siguientes opciones

- Acero macizo de 1,5mm de espesor mínimo
- Placa de aluminio solido de espesor de 4,0mm
- Material compuesto.

El requisito del perfil exterior de la placa anti - intrusión depende del método de fijación del arco frontal:

- unas juntas soldadas, el perfil debe extenderse hasta o más a la de la línea central del arco frontal.
- Uniones atornilladas, el perfil debe coincidir con las dimensiones exteriores del tabique frontal por toda la periferia.

La fijación de la placa anti- intrusión directamente al aco frontal debe documentarse en la presentación SES del equipo. Los métodos de fijación aceptados son:

Soldadura.

- Las soldaduras pueden ser continuas o interrumpidas.
- Si se interrumpe, la relación soldadura-espacio debe ser de 1:1 o mayor.
- Todas las longitudes de soldadura deben ser superiores a 25mm.

Uniones atornilladas.

- Usar menos de ocho remaches de 8mm o 5/16” de diámetro.
- La distancia entre dos centros de pernos debe ser de 50mm como mínimo.
- Cada accesorio de perno debe tener capacidad de extracción, arranque y flexión de 15 kN.

Todos los elementos no triturables dentro de la estructura principal deben tener un espacio libre mínimo de 25mm a la cara trasera de la placa anti- intrusión

- Los elementos no deformables incluyen, entre otros, baterías, cilindros maestros, cilindros hidráulicos embalses. (FORMULA SAE, 2022)

### **1.15 Placa anti- intrusión**

Compuestas:

- No debe fallar en un impacto frontal.
- Debe soportar una carga estática mínimo de 120kN distribuida en los 200mm x 100mm área mínima del atenuador de impacto.

La resistencia de la placa anti- intrusión compuesta debe verificarse mediante uno de los dos métodos:

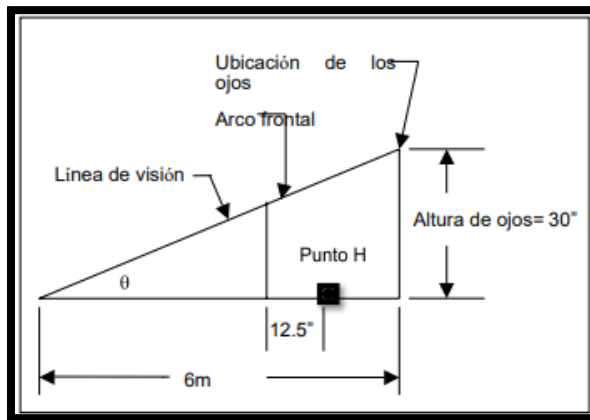
- Prueba física del AIP unido a una sección estructuralmente representativa del chasis previsto.

- El dispositivo de prueba debe tener una resistencia y rigidez equivalentes a un frente de referencia del arco frontal o debe ser igual a los primeros.

### 1.16 Método geométrico para calcular la altura del arco frontal

El perfeccionamiento de esta técnica se piensa sobre la distancia promedio de los ojos, partiendo así del mecanismo ergonómico (figura 1.5) de acuerdo a la referencia H; a la vez, al descubrir que los pilotos tienen una preferencia la cual es poder ver el suelo a partir de 6m y la distancia horizontal del arco frontal respecto a la referencia H. Dados los parámetros se puede determinar alturas máximas del arco frontal mediante la imagen representada a continuación. Figura 1.5

Figura 1.5 Altura máxima del arco frontal mediante el método geométrico.



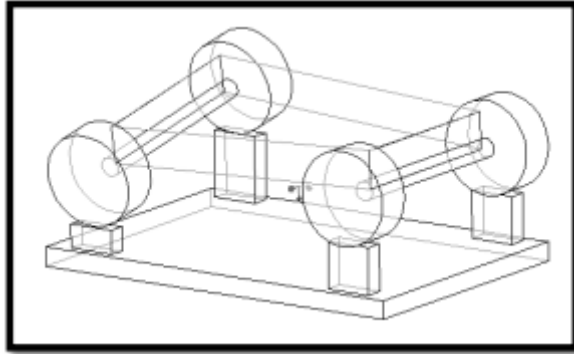
Fuente: (Salazar, 2018)

### 1.17 Cargas aplicadas a la estructura

Unos de los principales pasos durante el proceso de diseño es determinar los tipos de cargas que actúan sobre el chasis ya que sea en estado dinámico o en reposo. El chasis se deforma de diversas maneras según el requerimiento de las cargas y la magnitud que se presenta. Las deformaciones presentes comúnmente en el vehículo son: torsión longitudinal, flexión vertical y horizontal lozenging.

#### 1.17.1 Torsión longitudinal

Figura 1.6 Cargas de deformación producida por la torsión longitudinal.



Fuente: (R.Singh, 2010)

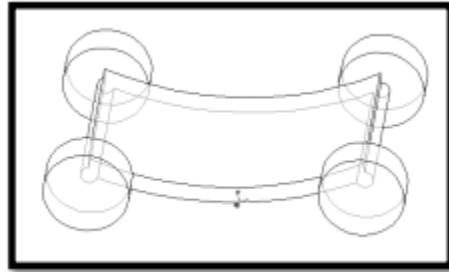
La torsión longitudinal es el resultado de fuerzas actuando opuestamente, aplicadas en una o dos ruedas del vehículo; es decir, momento de un par de fuerza aplicado en el eje delantero de forma longitudinal al vehículo. El chasis es considerado un elemento de unión que conecta las ruedas donde actúa las diferentes cargas dinámicas.

La rigidez torsional interfiere en el modelado del chasis por las cargas que se encuentran físicamente en la estructura, y así también interviene en el peso, rendimiento y control de estabilidad de un monoplaza.

La rigidez torsional se formula en unidades  $N \cdot m / \text{grado}$ . Equipos con vasta experiencia en el tema arrojan valores en sus diseños de  $300 N \cdot m / \text{grado}$  en el análisis de rigidez torsional, los diferentes números se obtienen a partir de simulaciones donde la suspensión trasera es fija y se emplea una fuerza sobre la parte delantera.

### 1.17.2 Flexión vertical

Figura 1.7 Flexión vertical

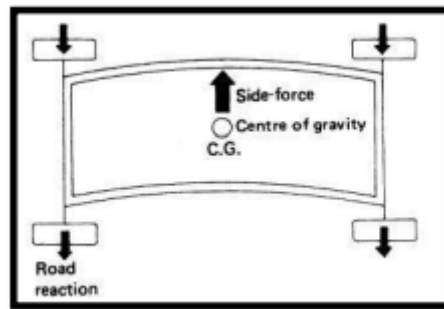


Fuente: (R.Singh, 2010)

La flexión vertical es la deformación de la suma del peso de todos los componentes del vehículo montados en el bastidor, por ejemplo: motor, baterías, y tren de fuerza motriz, sistema de dirección, etc. Las diferentes cargas se posicionan en toda la estructura mediante nodos creando energías de flexión en los componentes estructurales. Las resistencias se originan en los diferentes ejes por ende se tendrá una mayor deformación en el centro de gravedad como se puede observar en la figura 1.7

### 1.17.3 Flexión lateral

Figura 1.8 Flexión Lateral

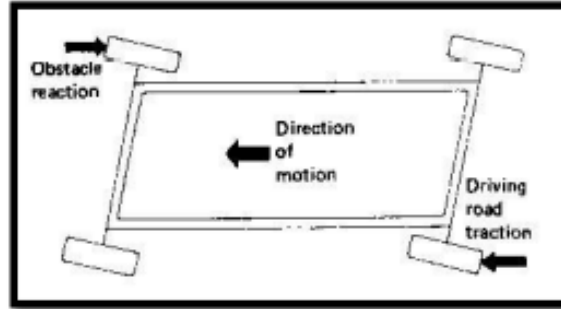


Fuente: (R.Singh, 2010)

La deformación por flexión lateral es el resultado de cargas causadas por fuerzas centrífugas e impactos laterales del viento en cierta medida. Las cargas distribuidas en la estructura siendo aguantadas por mecanismos del armazón como los arcos antivuelco. Las fuerzas se encuentran en los neumáticos por ende los ejes persisten estáticos, la deformación más grande la recibirá en la parte central de la estructura como se muestra en la figura 1.8

### 1.17.4 Horizontal lozenging.

Figura 1.9 Horizontal lozenging



Fuente: (R.Singh, 2010)

Este tipo de deformación es causada por fuerzas contrarias longitudinalmente al vehículo y aplicadas en ruedas opuestas de diferentes ejes. Los esfuerzos de cargas se ven afectadas en el cambio en la altura de la tensión de reacción, además el tamaño cambiara a medida que cambie el modo de funcionamiento. Se podrá observar la deformación del chasis en forma de paralelogramo representado en la figura 1.9

En el momento de diseño se debe tomar en cuenta el análisis de la torsión longitudinal y flexión vertical, en los cuales se toma como criterios principales para la obtención del resultado satisfactorio en la conformidad de la geometría, la rigidez torsional se toma en cuenta porque la reacción se que produce en las curvas está en función a la transferencia de masa lateral.

### 1.18 Estimación de cargas

Los mecanismos de los vehículos Formula SAE se modelan para poder soportar una carga de impacto de 3.5G, 1.5G al momento del frenado y 1.5G de magnitudes laterales. En los análisis en los diferentes softwares se pueden considerar cargas individuales o combinadas.

Establecer las capacidades, tipos o áreas de estudio de fuerzas es imprescindible para la optimización. Las masas a ser consideradas para la construcción se mientras a continuación:

**Tabla 3****Masas del vehículo.**

Componentes	Masa (kg)
Conductor	82
Motor	12
Tren de fuerza	20
Sistema de dirección	11
Batería	80
Chasis	35
Total	240

Fuente: Autores

Los requerimientos obligatorios para el perfeccionamiento de la optimización estructural deben partir de las situaciones de limitación.

**Tabla 4****Requisitos de análisis estructural**

Prueba	Condiciones de restricción	Aplicación de fuerza
Flexión estática lateral	Fijar los anclajes de la suspensión delantera y posterior.	En esta parte se aplicará diferentes tipos de fuerzas a lo largo del chasis.
Flexión estática vertical	Fijar los anclajes de la suspensión delantera y posterior.	Fuerzas en la cabina y a lo largo de la estructura en la cual se sujeta el motor en modo vertical.



Torción longitudinal	Fijar los soportes de la suspensión posterior.	Aplicación de fuerzas en las ruedas delanteras en la suspensión frontal.
Análisis de frecuencia	Fijar los soportes de la suspensión delantera y posterior.	Aplicar en toda la estructura una frecuencia de rango entre 69 Hz a 204 Hz.

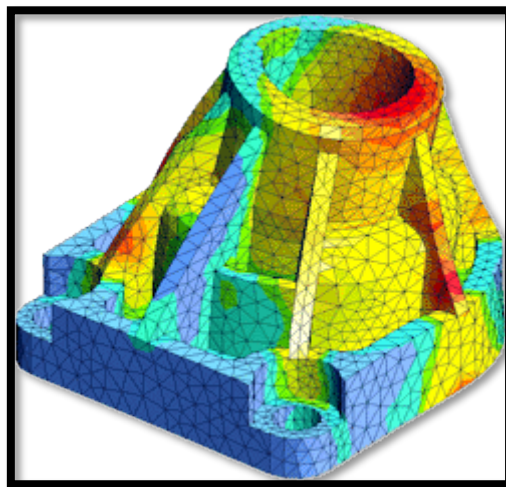
Fuente: Autores

### 1.19 Análisis por elementos finitos

El análisis de los elementos finitos se basa en la división de cuerpos o espacios en secciones, donde las ecuaciones integrales que describen los fenómenos naturales están en realidad en forma de una serie de subdominios de separación llamados fenómenos finitos.

La malla es el fraccionamiento de dominio de elementos finitos en forma de agrupación como se detalla a continuación. Es decir, la figura está compuesta por nodos los cuales forman un conjunto llamado malla. (Borja Robalino, 2017)

Figura 1.10 Ejemplo de nodos y mallas



Fuente: (E.Zigurat, 2012)

### 1.19.1 Análisis lineal y no lineal

El análisis lineal es la representación de las fuerzas repartidas de igual forma y con la misma cantidad de fuerza en un conjunto y estas varían en proporción a iguales cargas aplicadas, por otra parte, el comportamiento del dominio durante el análisis es no lineal.

El análisis no lineal puede ser diferenciado por las siguientes condiciones de dominio:

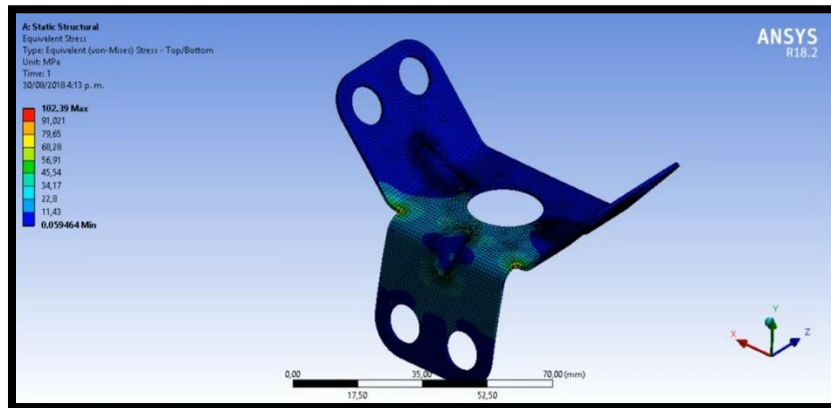
- **El análisis no lineal geométrico:** Esto está representado por grandes deformaciones donde la sección transversal se distorsiona exponencialmente a medida que el material se deforma.
- **El análisis no lineal del material:** Los desplazamientos pequeños admiten al material permanecer en el rango de tensión – deformación, lo que significa que los desplazamientos grandes hacen que el material alcance su punto de fluencia y se vuelva dúctil cuando la tensión cambia exponencialmente.
- **El análisis no lineal en la frontera:** Esta condición surge como resultado del contacto entre diferentes partes de la estructura.

### 1.19.2 Tipos de elementos finitos

#### Elementos tipo Shell

Sus elementos bidimensionales se utilizan en el estudio de paneles o elementos estructurales de paredes delgadas en comparativa con su perímetro. Para el desarrollo del mallado con elementos constructivos de tipo Shell (malla) se trabajó con diferentes entornos y partes del modelo CAD.

Figura 1.11 Elementos finitos tipo Shell

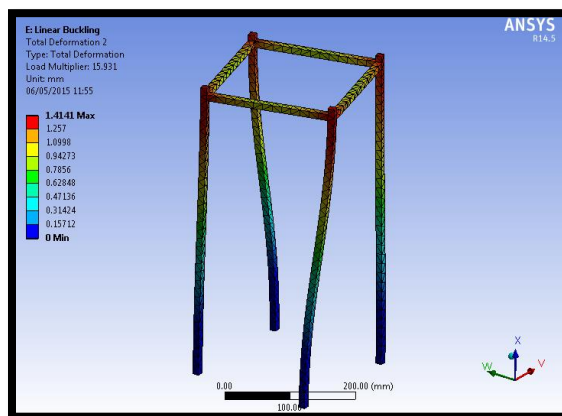


Fuente: (Ingenieria, 2020)

### Elementos tipo viga (Beam)

Los elementos tipo viga, son componentes estructurales, su deformación se genera en sentido perpendicular en su eje. Las fuerzas se determinan con respecto a dimensiones tales como: área, longitud, momento de inercia, torsión y las propiedades mecánicas del material. Si una de estas vigas causa problemas en el análisis, se pide dividirla en elementos de tipo viga finitos más cortos, en la cual se podrá analizar como una sección transversal uniforme.

Figura 1.12 Elementos tipo viga (Beam)



Fuente: Autores

## 1.20 Chasis tubulares usados en la competencia de formula SAE

A continuación, se hablará de diferentes estructuras que han utilizado las diferentes universidades que se han construido para la competencia de Formula SAE con vehículos eléctricos, como es el caso del Formula SAE EB17 para obtener una mejor explicación y procesos que se puede seguir para poder seleccionar un chasis, aquí se podrá ver que existen 3 tipos de estructuras básicas las cuales se detallan a continuación:

- Estructura delantera: Es conocida como la estructura delantera la cual es diseñada para proteger las piernas del conductor, es la parte del chasis que esta por delante del arco frontal.
- Estructura central: Consta de una estructura intermedia formada por arcos antivuelco y una estructura conocida como impacto lateral.
- Estructura posterior: Se encuentra ubicada por detrás del arco principal y sujeta los elementos de movimiento como son: cadena, motor, semi ejes.

Los equipos que diseñan vehículos monoplace eléctricos apuntan por una construcción de monocasco, para tener una disminución de peso, por lo que menos masa inercial menos cantidad de desgaste en la batería y un mayor rango de potencia en pista.

En el año 2021 la universidad de Michigan presento el diseño de su del prototipo de vehículo eléctrico totalmente rediseñado de la versión del 2020. En el cual la estructura delantera y la triangulación, juntos con las zonas de impacto lateral forman una estructura solida acorde a las reglas del formula FSAE; de esta manera se pudo reducir la cantidad de material empleado en la construcción. La estructura posterior se encuentra dividida en dos subestructuras, esto representa desventajas en la rigidez y la cantidad de material empleado en su fabricación. (Estruch, 2016)

Figura 1.13 Formula SAE 2020 Universidad de Michigan.



Fuente: (Hanway, 2021)

La universidad de San José presento su rediseño del vehículo eléctrico FEA en el año 2020, en donde el bastidor presenta una estructura delantera con una geometría muy similar a los vehículos anteriores con la diferencia de que los refuerzos del arco frontal no triangulaban con los demás elementos de la estructura, en donde la estructura central es relativamente larga en comparación con los anteriores, por lo cual se requiere de una triangulación diferente a la propuesta por el reglamento FSAE, ya que la longitud de los elementos que conforman la estructura de impacto lateral es demasiado grande.

Figura 1.14 Formula SAE 2020 de la Universidad de San José.



Fuente: (Kuo, 2019)

La universidad de Arkon ubicada en el país de Estados Unidos ha creado un formula SAE eléctrico, el cual obtuvo el tercer puesto en el año 2021 en la ciudad de Michigan, pero anterior a eso obtuvo

el quinto lugar en la competencia Formula SAE Lincoln en el mes de julio del 2019, con este antecedente pudieron mejorar su diseño y hacer un buen rediseño esencialmente en el bloque de baterías, terminando segundo en la categoría de eficiencia entre los 14 vehículos eléctricos que se encontraban para esta etapa; la prueba de rendimiento son 22km planos los cuales se debe acabar en el menor tiempo posible. Tomando en cuenta estos datos, el vehículo eléctrico de la Universidad de Arkon propuso una batería de 432 baterías de iones de litio los cuales son más fiables y eficientes.

Figura 1.15 Formula SAE 2021 (ZER19) de la Universidad de Arkon.



Fuente: (Akron, 2019)

## 1.21 Marco metodológico

### Introducción

En este apartado del proyecto se describe los procesos necesarios para el desarrollo del diseño y construcción de un chasis tubular rediseñado del ya antes construido y presentado. Se replantea una mejora de diseño la cual establece nuevas soluciones y ventajas en el proceso.

Continuamente se hace la aceptación de los requerimientos que intervienen directamente en el diseño del chasis, efectuando la geometría del mismo para modelar, optimizar y valorar el diseño del chasis mediante el estudio de fuerzas utilizando el software Ansys.

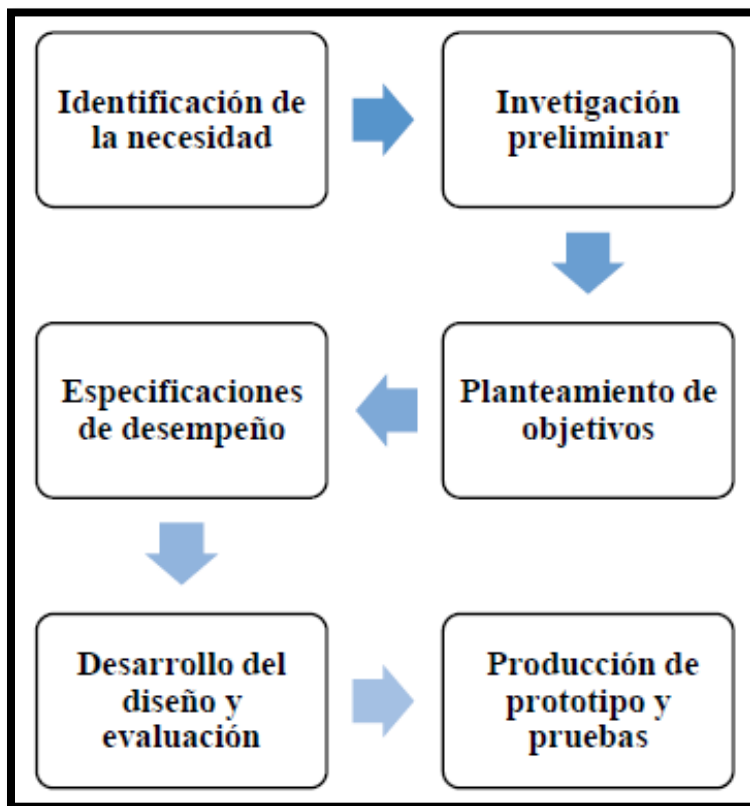
Posteriormente se establece el análisis de los resultados obtenidos con los cuales se procede a realizar el proceso de fabricación según los parámetros de calificación de la competencia.

### 1.21.1 Metodología de Diseño.

Los procesos de modelado en base a una serie de metodologías que hace referencia a la creación de sistemas y elementos.

La metodología responde al libro de “Diseño de maquinaria” por Rober L. (Norton, 2018), las fases de diseño se ven reflejadas en la siguiente figura

Figura 1.16 Metodología de diseño [23]



Fuente: (Salazar, 2018)

### 1.21.2 Identificación de la necesidad

como ya se presentó un prototipo de chasis nace la necesidad de mejorar este, partiendo de las nuevas especificaciones de la Formula SAE, los estudiantes de la universidad establecen en rediseñar y mejorar las prestaciones del chasis acogiendo las nuevas disposiciones del reglamento presentado.

### **1.21.3 Investigación preliminar.**

La investigación ejecutada de modelado y reconstrucción del monoplaza se realizó anteriormente con el “análisis del fundamento teórico y estado del arte” examinando: el reglamento actual y las disposiciones, los tipos de chasis, requerimientos de la cabina, tipo de soldadura, materiales empleados.

### **1.21.4 Planteamiento de objetivos.**

Rediseñar y construir un marco tubular con un software llamado SolidWorks para el monoplaza eléctrico.

Este diseño debe ser liviano y soportar los esfuerzos de operación y competencia, lo que garantiza la seguridad del conductor y además componentes del monoplaza, además, los procesos de diseño e ingeniería deben cumplir con las nuevas reglas propuestas por la competencia FSAE.

### **1.21.5 Especificaciones de desempeño.**

La siguiente sección de diseño se toma en cuenta las fuerzas a las que está sometida el chasis. Las consideraciones de diseño se derivan de los requisitos establecidos por los diversos sistemas del vehículo.

La estructura debe desempeñar en su totalidad con el cumplimiento de las normativas Formula SAE, en el siguiente listado se puede observar los diferentes aspectos a seguir.

- Distancia entre ejes de 1535mm
- Ancho de vía delantera de 1200mm.
- Ancho de vía posterior de 1100mm
- Geometría de suspensión; puntos de anclaje, amortiguadores y barras estabilizadoras.
- Acceder área para: motor, baterías, sistema de dirección, sistema de enfriamiento y pedales tren de fuerza motriz, controladores, conductor,.



- Todos los artículos electrónicos deberán estar dentro del chasis.
- Centro de gravedad lo más bajo posible.
- Establecimiento fijo de conducción.
- Resistencia torsional mínima de 1680Nm/deg.
- Máximo de peso de 34Kg
- Llevar a cabalidad el reglamento 2022 FSAE.

## 2. Desarrollo del diseño y evaluación.

### 2.1 Distribución de masas principales en el chasis.

Los principales pesos que entran en el análisis del vehículo, tenemos los siguientes; se considera principalmente al piloto en relación de las masas más voluminosas como la batería, motor, controlador que tienen pesos de mayor porcentaje de carga para el vehículo monoplace los cuales afectan directamente en el comportamiento dinámico. La principal causa es establecer la correcta ubicación en conjunto con el espacio que los mismo necesitan, se muestra las masas que se consideran principales en la tabla 4.

**Tabla 5**

#### Masas principales

Componente	Masa (Kg)
Piloto	82
Baterías	12
Controladores	20
Motor	10
Tren de fuerza motriz	80
Dirección	35
Caja de pedales	239

Fuente: Autores

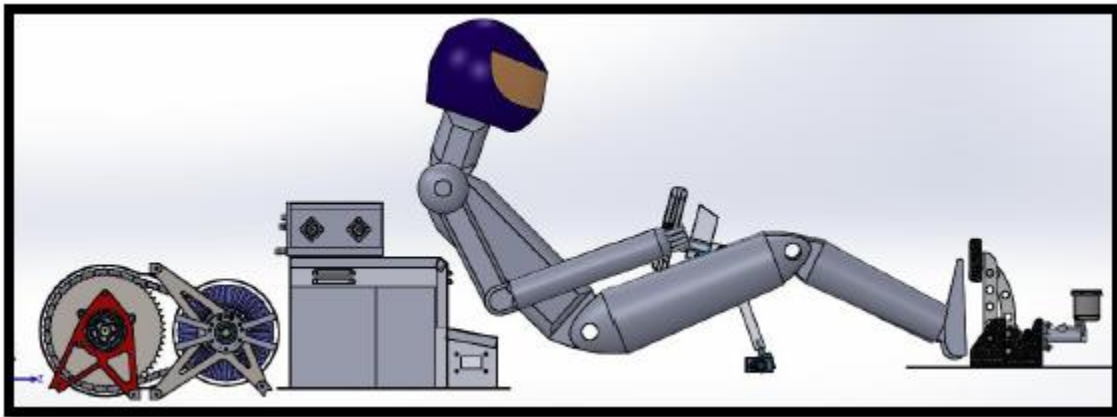
El monoplace Formula SAE tiene una ingeniería de baterías combinado por 100 celdas en conjunto con diferentes componentes electrónicos generando un peso de 70Kg. Los equipos de la formula SAE proponen las diferentes disposiciones; la primera es formar dos conjuntos de celdas en las cuales van ubicadas al costado del chasis, la segunda manera es un ensamble de baterías las cuales se ubican atrás del asiento del piloto.

Cada ensamble presentado de baterías presenta ventajas y desventajas por ejemplo al momento de implementar dos paquetes de baterías aumenta el costo de fabricación, genera ensamble de masas

longitudinalmente afectando directamente en la rigidez del chasis y aumentando el peso del chasis al agregar varios miembros estructurales las cuales sostengan la batería, de otra forma colocando un solo paquete de baterías el chasis debería ser lo suficientemente largo para abarcar todas las celdas.

Por lo general las baterías se coloca detrás del piloto ya que facilita el diseño del chasis y mejora la disposición de los elementos sujetadores de las celdas, la distribución de masas principales se define en la figura 2.1

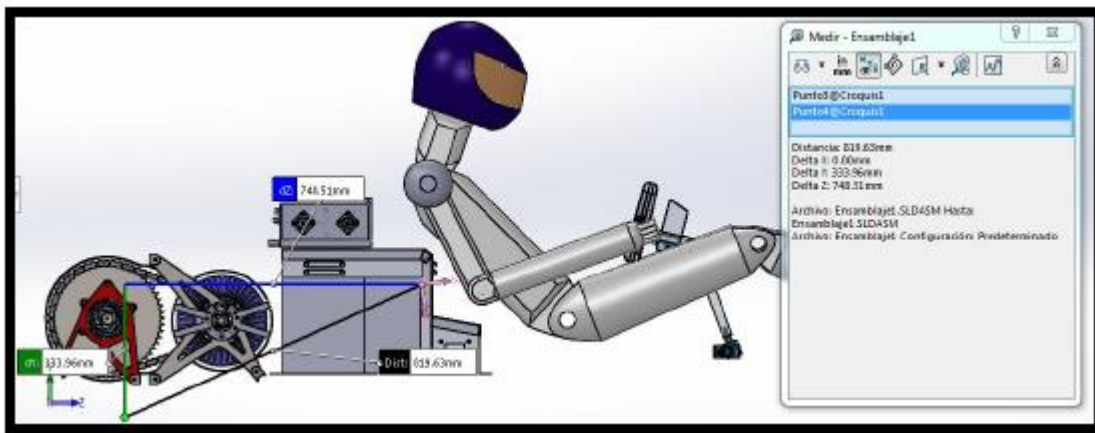
Figura 2.1 Distribución de masas principales



Fuente: (Salazar, 2018)

Con ayuda del software ANSYS se determina la ubicación del centro de gravedad total de todas las masas principales como se observa en la figura 2.2

Figura 2.2 Ubicación del centro de gravedad



Fuente: (Salazar, 2018)

## 2.2 Posición de conducción del piloto

La posición de manejo del piloto se determina de acuerdo con los objetivos de la cabina planteados en el análisis del fundamento teórico. Las dimensiones del torso y extremidades del piloto se determinan según los reglamentos del Formula SAE como se indica en la figura 2.3 y la tabla 5

**Tabla 6**

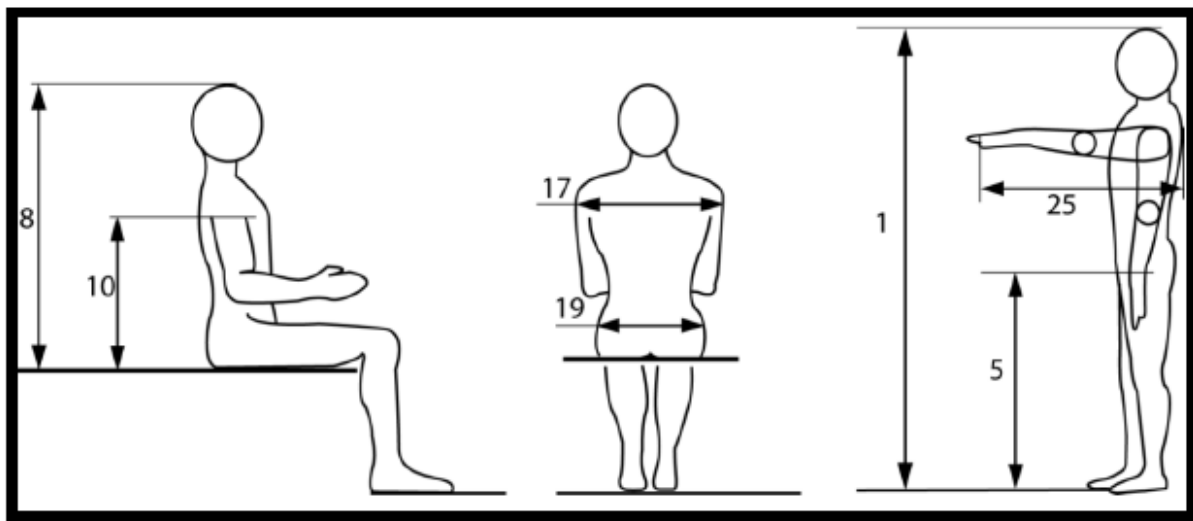
**Dimensiones en percentiles masculinos y femeninos**

NUMERO DE DIMENSIONES	DESCRIPCION	DIMENSIONES	
		95 PERCENTIL MASCULINO	5 PERCENTIL MASCULINO
1	Altura de pie	186.5cm	151.5cm
5	Altura de cadera	100cm	74cm
8	Altura sentado	97cm	79.5cm
10	Altura de hombros sentado	64.5cm	50.5cm

17	Ancho de hombros	50.5cm	37.5cm
19	Ancho de caderas	40.5cm	31cm
25	Longitud total del brazo	50.5cm	37.5cm
30	Longitud de pie	28.5cm	22cm
31	Ancho del pie	11cm	8.5cm

Fuente: Autores

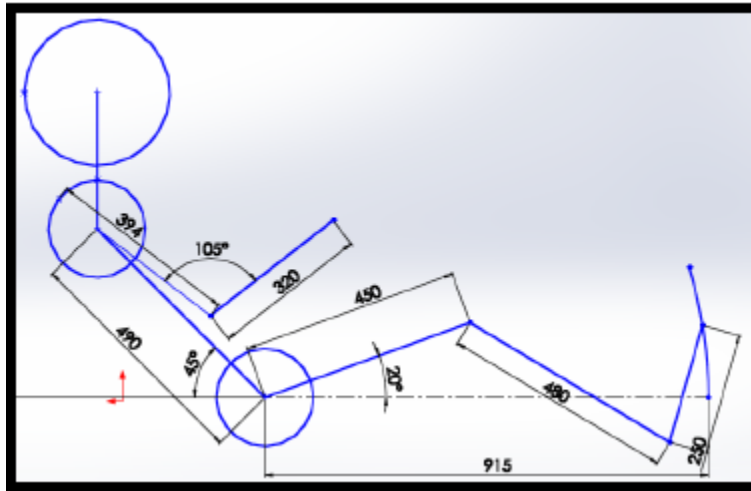
Figura 2.3 Medidas antropométricas del percentil



Fuente: (Mora, 2019)

El espaldar del piloto debe tener una inclinación a 45° para disminuir la altura del centro de gravedad y mantener la distribución de masas establecida con anterioridad. De acuerdo al boceto 2.4 se determinan los ángulos que se forman a las diferentes medidas, la visión de manejo se plantea con la finalidad de que cualquier persona que sea apta para manejar un formula SAE lo pueda realizar, sin modificar ninguna distancia dentro de las condiciones principales.

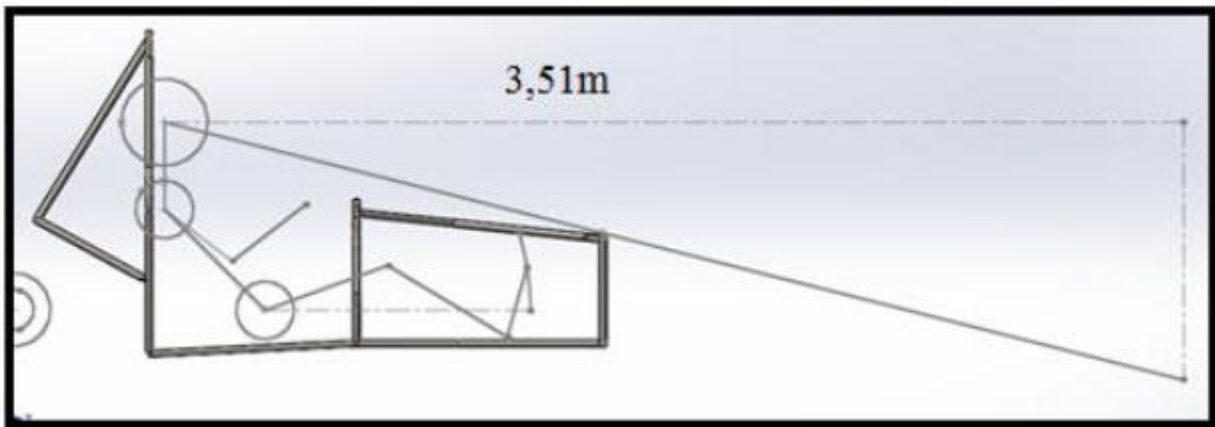
Figura 2.4 Posición de conducción.



Fuente: (Salazar, 2018)

La posición de conducción influye directamente en el espacio de la cabina, la altura y ubicación de los arcos antivuelco, como consecuencia, altera la visibilidad del piloto, esta se ve afectada por estas variables como se muestra en la figura 2.5 en donde el piloto observa la calzada a partir de los 3.51m desde la posición del piloto.

Figura 2.5 Distancia de visibilidad del piloto a la calzada.



Fuente: (Salazar, 2018)

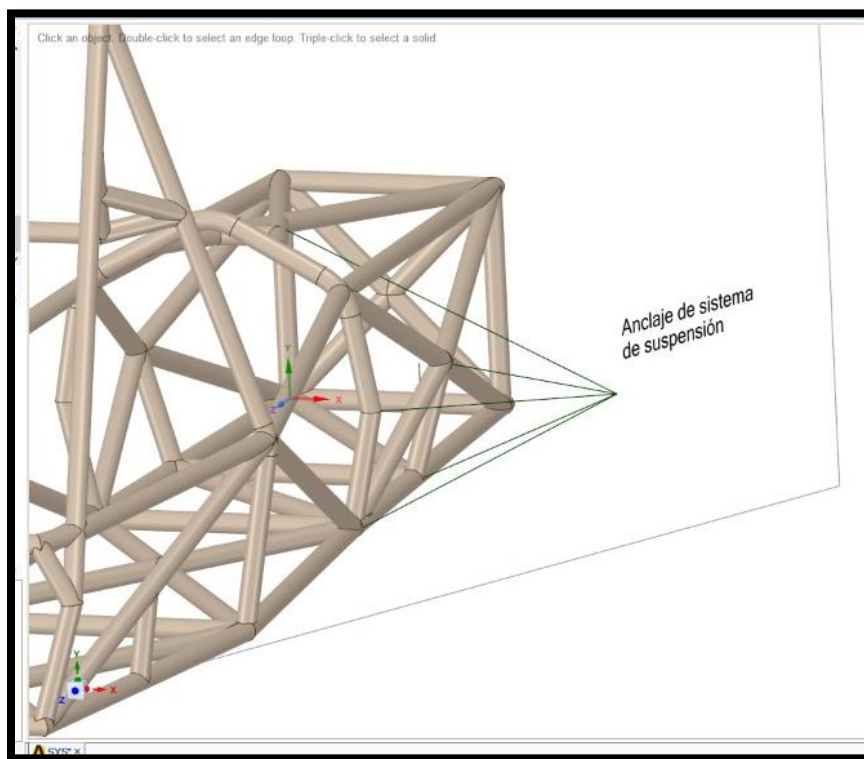
### 2.3 Geometría de la suspensión.

El sistema de suspensión se adaptó el mismo ya realizado anterior mente y se ajustó el nuevo rediseño de chasis, haciendo que las cargas compartidas se distribuyan en forma exacta hacia los

nodos del chasis. Los puntos de anclajes de suspensión pueden alejarse de los nodos con un máximo de 10cm, así como las reglas del Formula SAE no nos limitan en modo alguno al sistema de suspensión. Lo que libera la composición del sistema.

La geometría de suspensión esta correlacionada con el modelado del marco (chasis) determinando las superficies de la estructura posterior y delantera, de igual manera afecta la triangulación del chasis en la figura 2.6, la configuración de la geometría del marco se muestra en relación con el sistema de suspensión. (INTERNATIONAL, 2021)

Figura 2.6 Encaje del sistema de suspensión al chasis.



Fuente: Autores

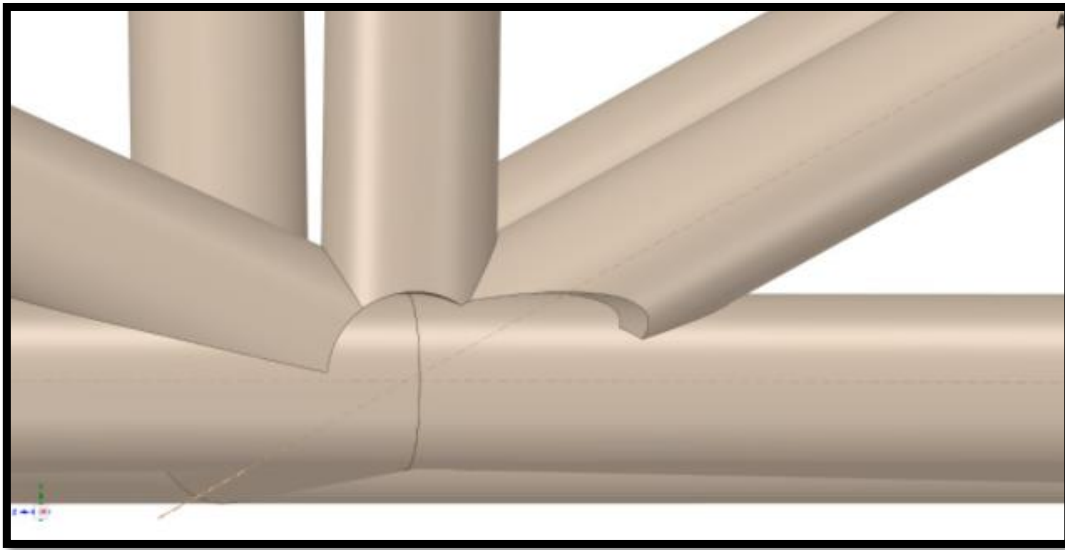
## 2.4 Desarrollo del rediseño del chasis.

Inicialmente se partió de una base de chasis ya propuesta y construida, se analizó detalles de construcción y se verifico todos los aspectos como, por ejemplo: punto medio de gravedad de

acuerdo a las distribuciones de pesos, anclajes por tanto se determinó el lugar de manejo del piloto y la altura del arco principal.

Para el rediseño se inició desde los puntos de unión en donde se determinó que al momento de la construcción está desfasado algunos nodos en los cuales no está completamente centrado en la figura 2.7 se puede observar este punto de análisis.

Figura 2.7 Mala unión del antiguo diseño de chasis

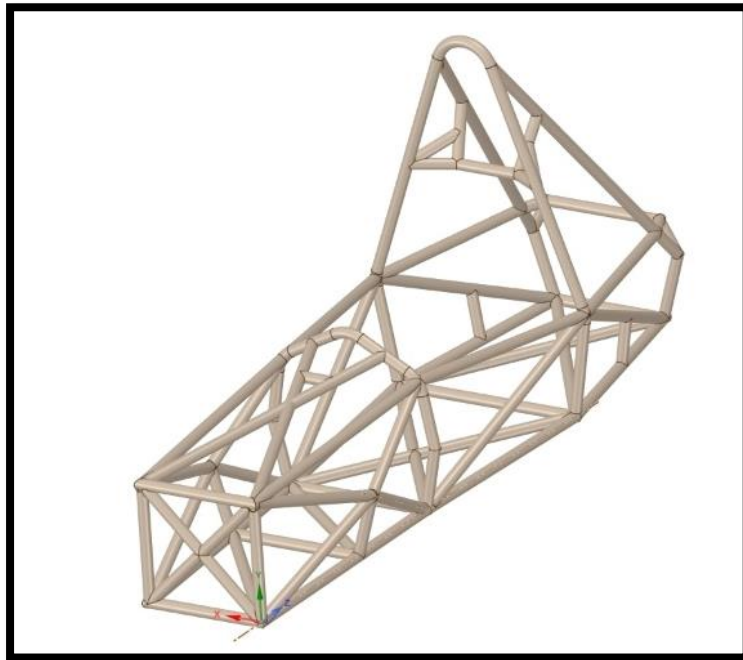


Fuente: Autores

Para nuestro rediseño presentamos una solución que se basa en la reducción de uniones y estructura que se pueden ir eliminando con el siguiente diseño planteado que se muestra en la figura 2.8



Figura 2.8 Rediseño de chasis

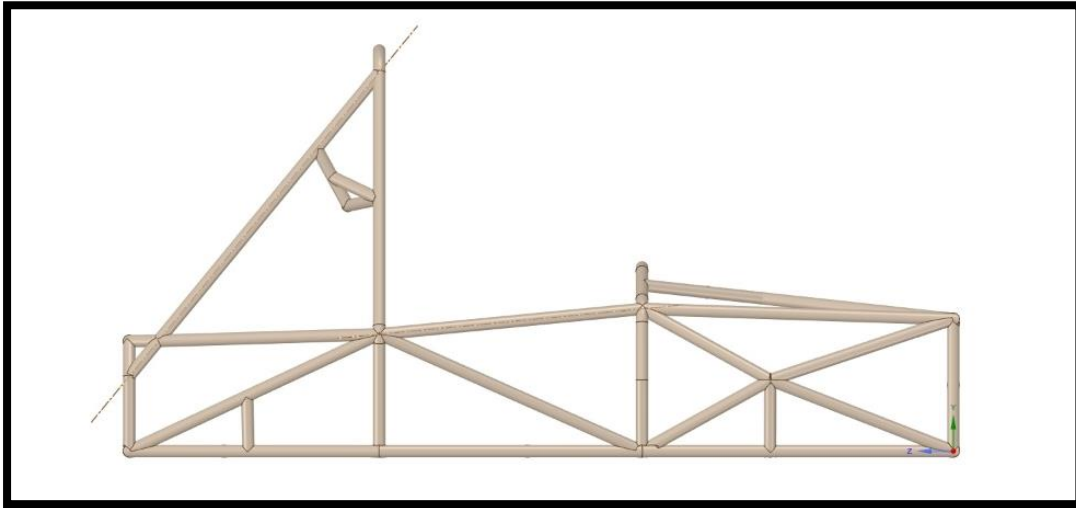


Fuente: Autores

La estructura se optimizó considerando los siguientes aspectos: facilidad de construcción, reducción de material y peso, distribución de esfuerzos determinados mediante elementos finitos, el rediseño de la figura 2.8 muestra una geometría más simple con menor cantidad de elementos comparando con el anterior diseño en su parte posterior y laterales, la triangulación del chasis tiende a simplificarse a medida que se perfecciona el diseño obteniendo una reducción de peso y corrigiendo el proceso de construcción antes ya ensamblado. (Rodríguez, 2010)

En la figura 2.9 se presenta el rediseño en donde se modificó la estructura de impacto lateral de acuerdo al nuevo reglamento de Formula SAE 2022, al igual que la parte posterior reduciendo material y sobre todo peso al igual cumpliendo con el nuevo reglamento.

Figura 2.9 Rediseño de la estructura de impacto.



Fuente: Autores

La estructura posterior presenta una mejora de diseño y eliminación de estructura cumpliendo con las cargas a las cuales va a estar trabajando, como, por ejemplo, cargas de motor y resistencia mecánica del bastidor, el reglamento de la fórmula SAE propone triangulaciones con las cuales se podrá modelar la parte frontal como la posterior el apéndice F1.17.

## **2.5 Determinación de cargas presentes en la estructura.**

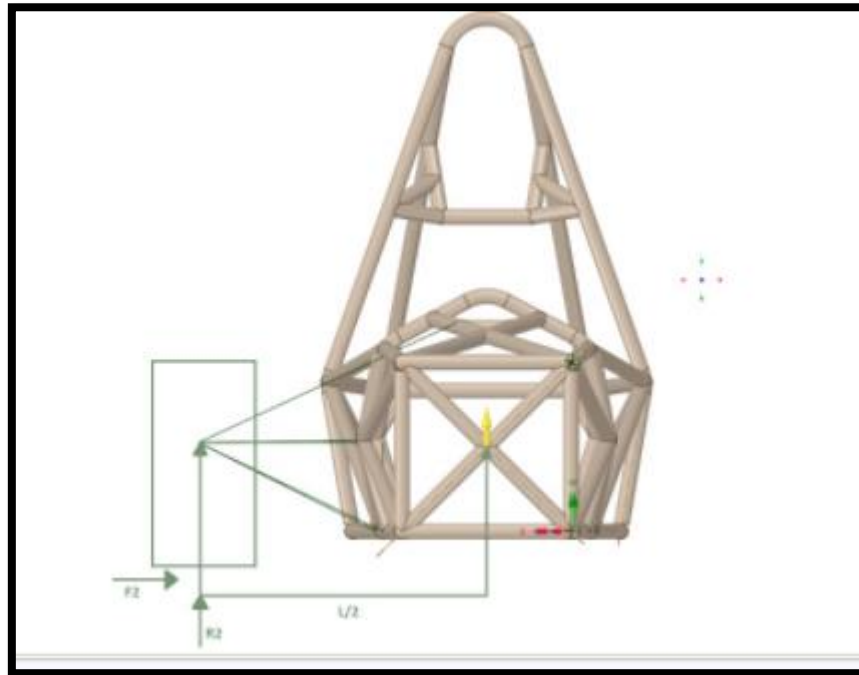
Durante la etapa de rediseño se analizó las cargas estructurales a las cuales está sometido el chasis, en las cuales el vehículo en pista va a enfrentarse: frenado, transferencia de masa longitudinal, transferencia de masa lateral.

### **Transferencia de masa lateral.**

Condiciones iniciales

En los cálculos se supone que el vehículo describe una curva con aceleración centrífuga 2G cuya posición actúa sobre el centro de gravedad propuesto anteriormente. La figura 2.10 muestra el diagrama de cuerpo libre, la dirección y fuerza de las cargas.

Figura 2.10 Transferencia de masa lateral



Fuente: Autores

Calculo

$h$ = altura del suelo al centro de gravedad (m)

$W$ = peso del vehículo (N)

$A_c$ = aceleración centrífuga ( $m/s^2$ )

$$L = 1.2m$$

$$h = 0.33m$$

$$W = 345kg * \frac{9.81m}{s^2} = 3384.45N$$

$$A_c = m * 2G = 6768.9N$$

$$\sum Fy = 0$$

$$R_2 + R_1 - W = 0 \quad (5.1)$$

$$R_2 = -R_1 + W$$

$$\sum M_2 = 0$$

$$1.2 R_1 + 0.33Ac - 0.6W = 0$$

$$R_1 = \frac{0.6W - 0.33Fg}{1.2}$$

$$R_1 = -169.2225N$$

*Reemplazando R1 en la ecuación (5.1)*

$$R_2 = -R_1 + W$$

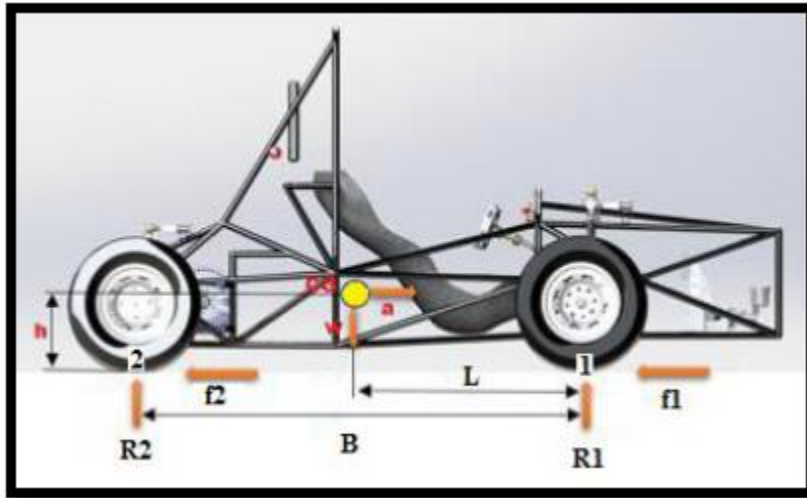
$$R_2 = 3553.6725N$$

La reacción de R2 es la fuerza que intervienen en el análisis de la rigidez torsional aplicado a sus dos extremos del eje delantero y en sentidos contrarios.

### **Trasferencia de masa longitudinal y frenado.**

Esta sección refiere la transferencia de cargas a las ruedas delanteras después del freno. El tiempo de frenado inicial está determinado por el coeficiente de fricción, la velocidad máxima y la velocidad de los neumáticos ubicados en el centro de gravedad. El peso del vehículo que se muestra en la siguiente figura.

Figura 2.11 Transferencia de peso longitudinal.



Fuente: (Salazar, 2018)

Condiciones iniciales:

$$l = 0.72$$

$$H = 0.33$$

$$B = 1.535\text{m}$$

$$W = m * \frac{9.81\text{mm}}{\text{s}^2} = 3384.45\text{N}$$

$$V_0 = 120 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V = 0$$

$$t = 3\text{s}$$

$$cf = 0.83$$

Cálculos;

$$\sum Fy = 0$$

$$R_2 + R_1 - W = 0$$

$$\sum F_x = m * a$$

$$-f_2 - f_1 = m * a$$

$$-0.83R_2 - 0.83R_1 = m * a$$

$$a = \frac{dV}{dt}$$

$$a \int_0^t dt = \int_0^t dv$$

$$at = -V_0$$

$$a = -\frac{33.33 \frac{m}{s}}{3s}$$

$$a = -11.11 \frac{m}{s^2}$$

reemplazando en el valor de la aceleración de frenado en la ecuación (5.3) se obtiene:

$$-0.83 R_2 - 0.83R_1 = -3832.95N \quad (5.4)$$

$$\sum M_G = 0$$

$$0.72R_2 - 0.48R_2 - 0.33f_1 = 0$$

$$0.72R_1 - 0.48R_2 - 0.33 * 0.83R_1 = 0$$

$$0.43R_1 - 0.77R_2 = 0$$

$$R_1 = \frac{0.77R_2}{0.43}$$

$$R_1 = 1.79 * R_2$$

reemplazando 5.5 en la ecuación 5.4 se obtiene:

$$-0.83R_2 - 0.83R_1 = -3832.95N$$

$$-0.83R_2 - 0.83(1.79R_2) = -3832.95N$$

$$R_2 = 1655.20 \text{ N}$$

*El valor de  $R_2$  se sustituye en la ecuación 5.5 como se muestra a continuación.*

$$R_1 = 1.79 * R_2$$

$$R_1 = 2738.89 \text{ N}$$

$$f_1 = 0.833 * R_1$$

$$f_1 = 1288.53 \text{ N}$$

$$f_2 = 0.833 * R_2$$

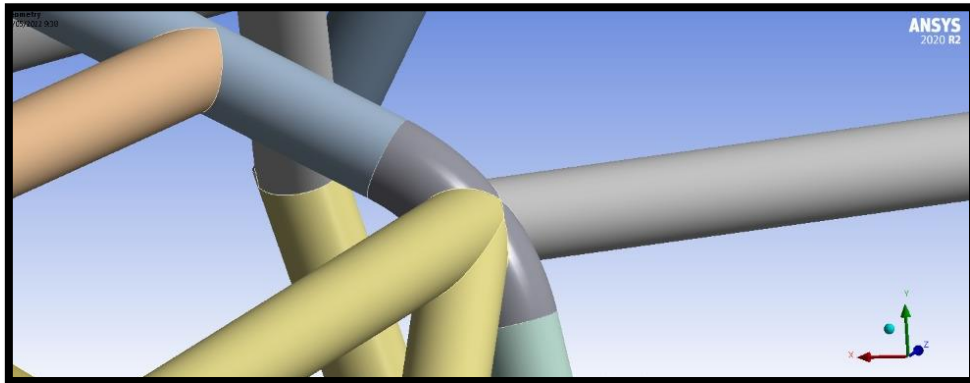
$$f_2 = 1373.82 \text{ N}$$

las cargas  $R_1$  y  $f_1$  las cuales son las que actúan en el estudio a partir de elementos finitos en los diferentes tipos de análisis como: rigidez longitudinal y frenado.

## **2.6 Análisis por elementos finitos.**

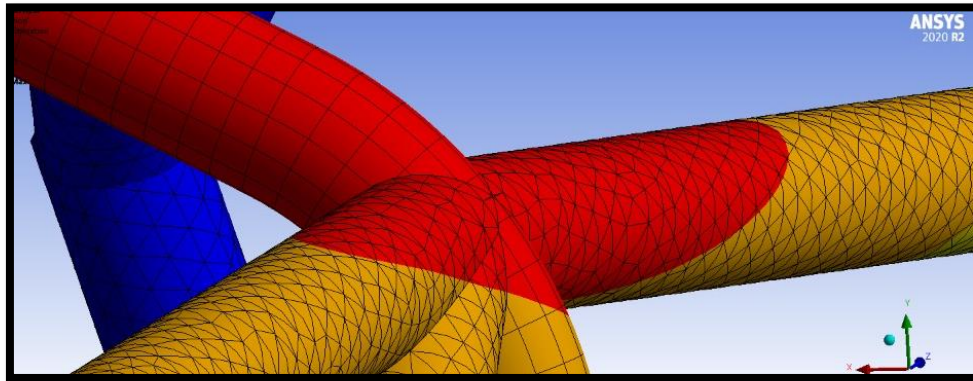
En los estudios estructurales ANSYS Y SolidWorks se utilizan los elementos finitos: beam (viga) y Shell (mallado). Las modelaciones de tipo beam se aprovechan en simulaciones de rápida distribución de esfuerzos para obtener un análisis global de todo el elemento, los elementos tipo Shell exponen una variedad de resultados de manera más puntual. Como se puede observar en la figura 2.12 se analiza un elemento tipo beam y en la figura 2.13 se observa un elemento tipo Shell en los cuales se nota la diferencia visiblemente de los elementos finitos. (Estruch, 2016)

Figura 2.12 Elementos finitos tipo beam.



Fuente: Autores

Figura 2.13 Elemento finito tipo Shell.

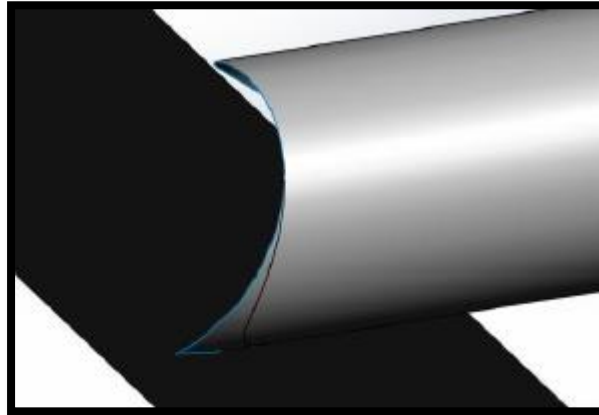


Fuente: Autores

Para nuestro análisis se realiza la aplicación de elementos finitos tipo Shell los cuales generan un mallado sobre la zona delgada que escasea de grosor, es inevitable crear una superficie intermedia en todos los elementos como se muestra en la siguiente figura.



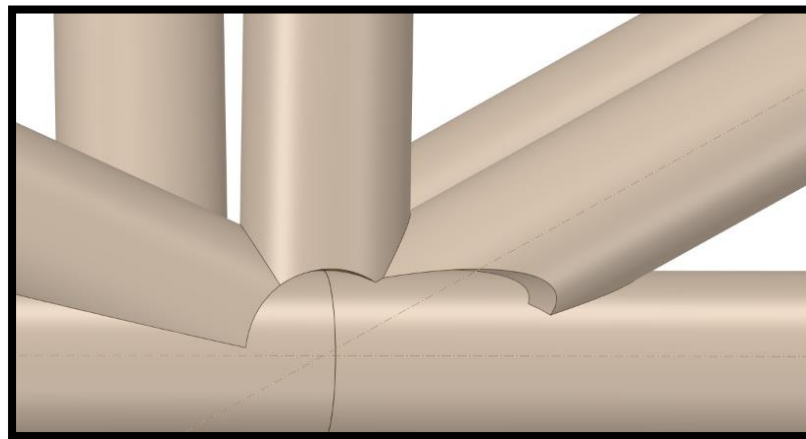
Figura 2.14 Superficie intermedia de miembro estructural.



Fuente: Autores

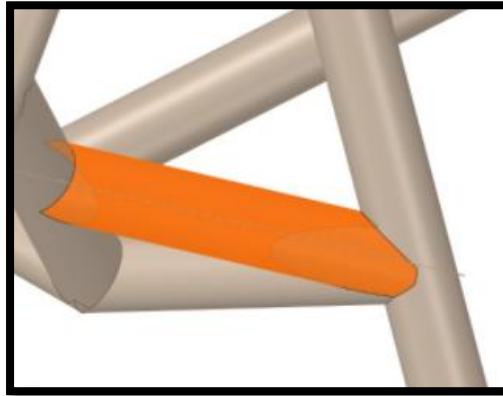
Después que se genera todas las zonas intermedias entre los tubos se presenta un problema puntal para el análisis de mallado el cual es la falta de contacto de las zonas en las uniones de la estructura del chasis (figura 2.15), en los cuales se presentan dos opciones, la primera es empatar de manera manual las diferentes uniones para después realizar un corte en los miembros estructurales y la segunda es genera condiciones de contacto, con correcciones de errores con el programa Ansys.

Figura 2.15 Nodo sin contacto de superficie.



Fuente: Autores

Figura 2.16 Unión de superficies intermedias.

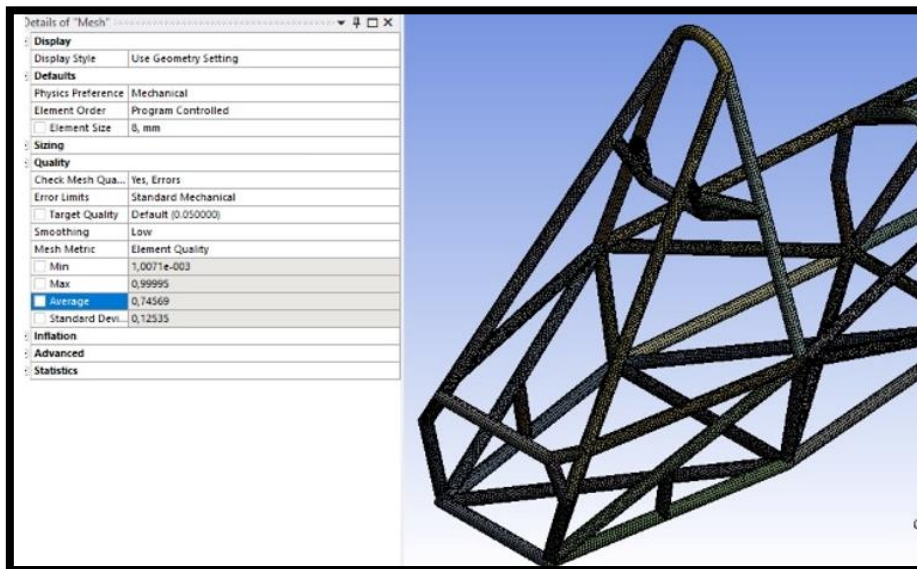


Fuente: Autores

## 2.7 Convergencia de solución y densidad del mallado.

La creación del mallado reside en que tan fiable necesito que sea mi estructura para la cual nosotros hemos optado por los valores que nos da el programa de ANSYS haciendo que la composición de diferentes tamaños aumente el porcentaje de fiabilidad tal como lo presentamos a continuación con un mallado de 8mm nos da una fiabilidad del 75% aproximadamente tal como se demuestra en la figura 2.17

Figura 2.17 Densidad y fiabilidad del mallado.



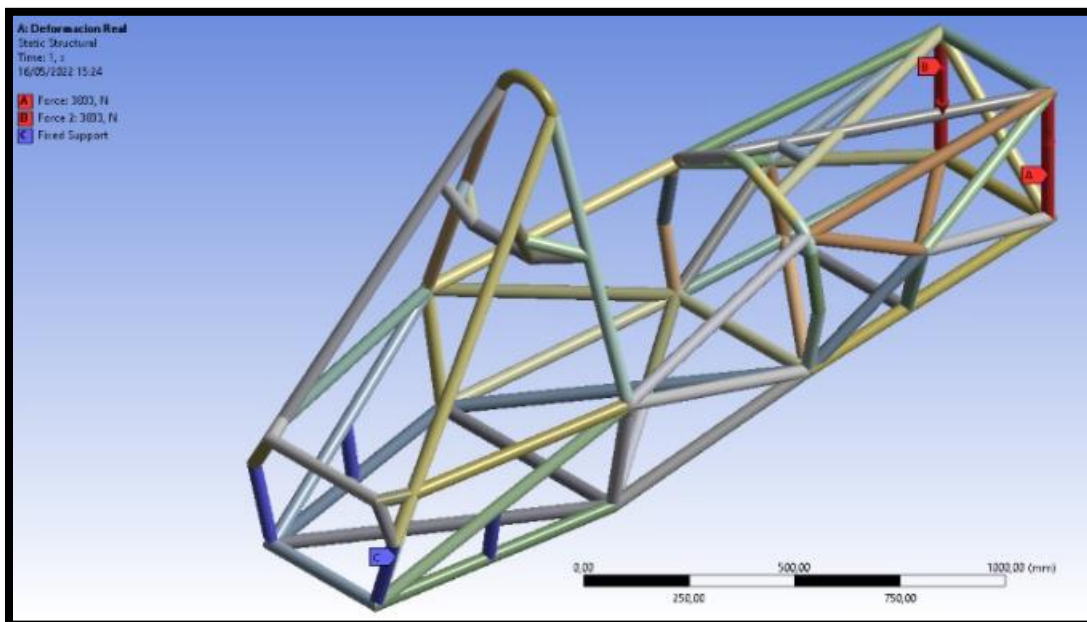
Fuente: Autores

## 2.8 Análisis de rigidez torsional.

El análisis se forma a partir de un par torsional en el eje delantero en dirección a la oscilación de los neumáticos con un valor de 3832.95Nm consecuencia de la carga de 3133N actuando en las llantas del monoplaza. Los diferentes tipos de esfuerzo se aplican en los anclajes de suspensión delantera y las restricciones se las pone en la parte trasera, específicamente en los parantes de anclaje de la suspensión trasera, como se demuestra en la figura 2.18, los resultados de la deformación y el esfuerzo son los siguientes:

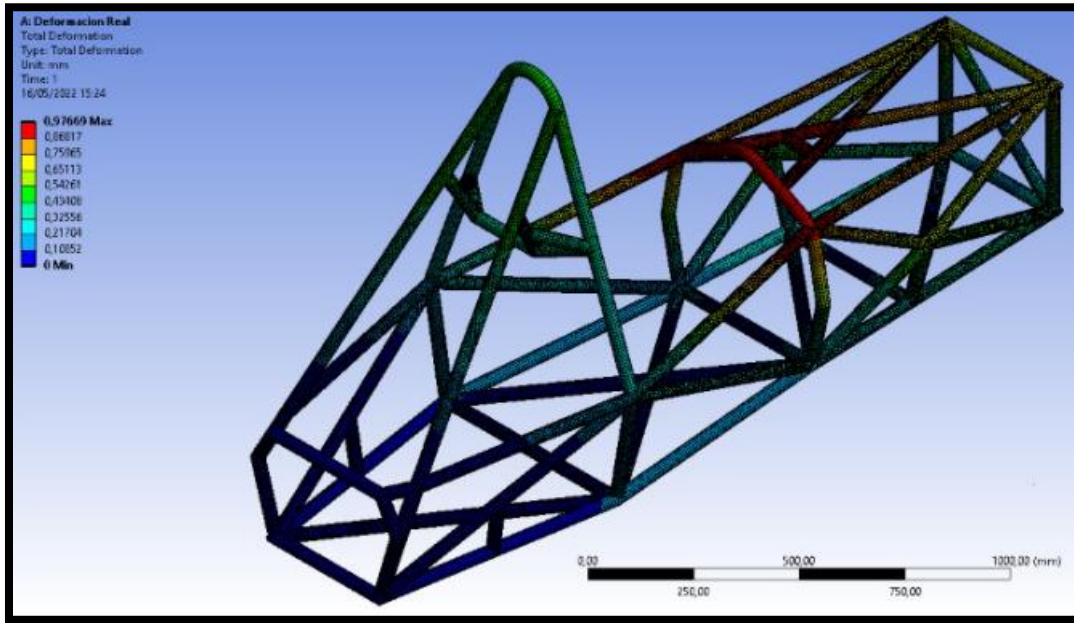
- Deformación con una carga de 380Mpa de 0.97mm como se indica en la figura 2.19

Figura 2.18 Cargas aplicadas de Rigidez Torsional.



Fuente: Autores

Figura 2.19 Resultado de deformación.

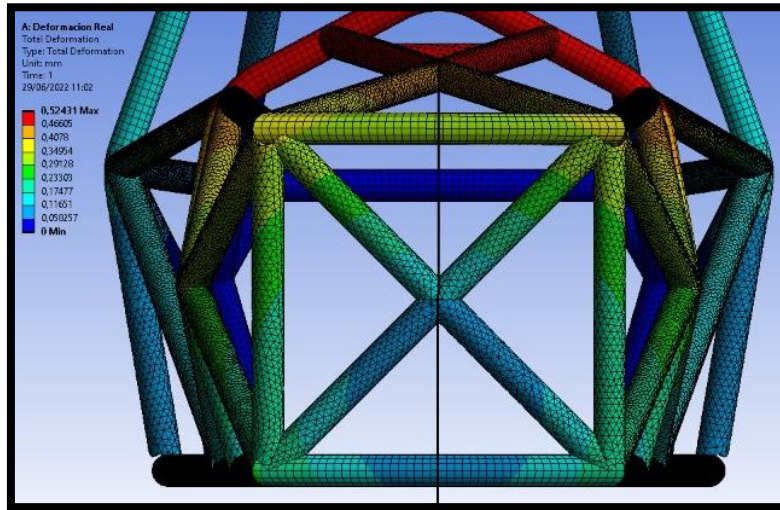


Fuente: Autores

En la rigidez torsional esta proporcionada por  $k = \frac{M}{\theta}$  en el cual  $M$  significa par torsional y  $\theta$  es el ángulo de deformación máxima en el plano donde se efectúa el momento  $M$ .

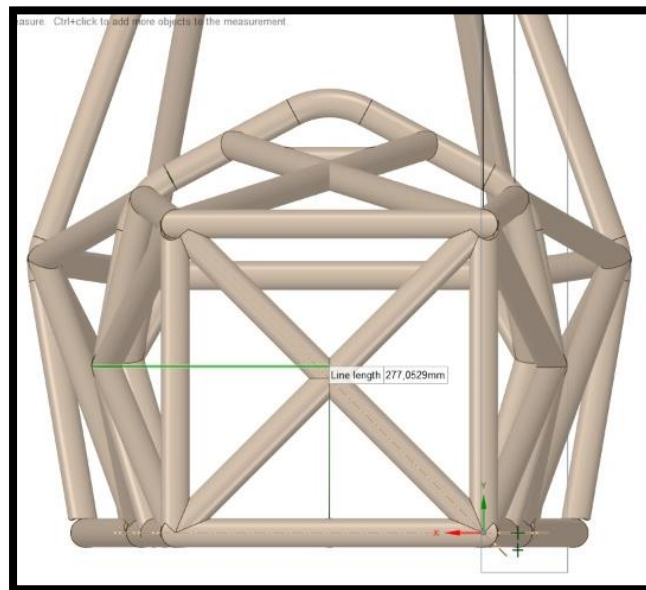
El ángulo  $\theta$  se obtiene de la ecuación  $\theta = \tan^{-1} y_1/x_1$  en donde  $y_1$  es la deformación en sentido vertical con un valor de 0.52mm mostrada en la figura 2.20 y  $x_1$  se toma como deformación horizontal desde visto desde un plano central del chasis en el punto donde se calcula la deformación en el plano  $y_1$ , con valores de 277.05mm demostrados en la figura 2.21

Figura 2.20 Distancia de deformación  $y_1$



Fuente: Autores

Figura 2.21 Distancia de deformación de  $x_1$



Fuente: Autores

Al conseguir  $y_1$  y  $x_1$  se calcula el ángulo  $\theta$  en donde:

$$\theta = \tan^{-1} y_1/x_1$$

$$\theta = \tan^{-1} 0.52/277.05$$

$$\theta = 0.11 \text{ grados}$$

Obteniendo el ángulo de deformación se calcula la rigidez torsional con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{M}{\theta}$$

$$k = \frac{3832.95 \text{ Nm}}{0.11 \text{ grados}}$$

$$k = \frac{34845 \text{ Nm}}{\text{grados}}$$

la rigidez torsional es el resultado superior el cual se encuentra en el rango de 2600 a 3200 Nm / grados, para un vehículo Formula SAE EB17.

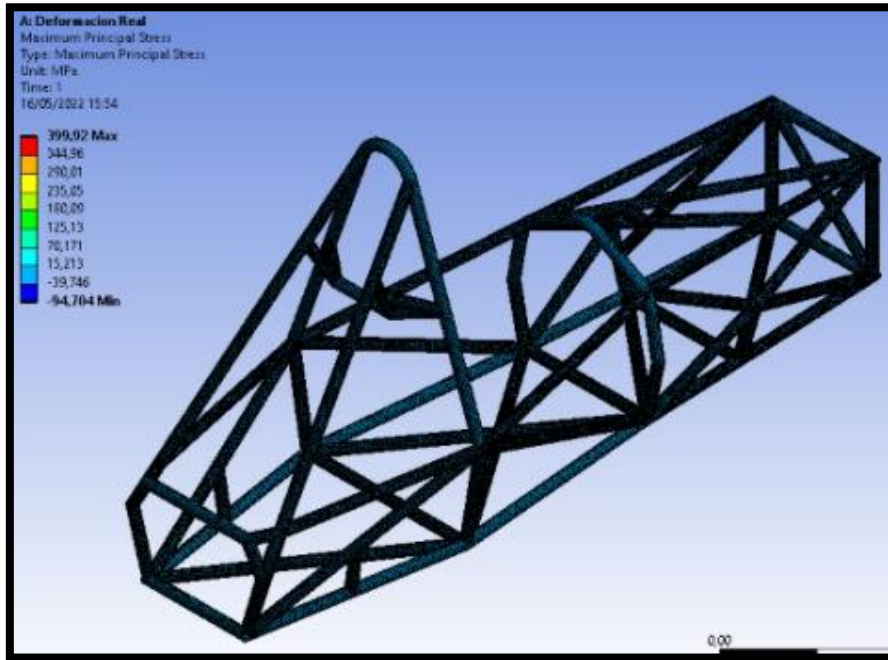
## **2.9 Análisis de rigidez longitudinal.**

La rigidez se determina estableciendo un mínimo estable en la rueda de 2738.89 N, de pie durante el borde. Con esta carga, los soportes se colocan en posiciones rígidas en la parte superior e inferior del sistema. Dando como resultados lo que se observa en la figura 2.22 y 2.23.

Los esfuerzos y deformaciones máximas de 399.92 Mpa y 0.69 mm fueron alcanzadas por el rediseño del formula SAE.

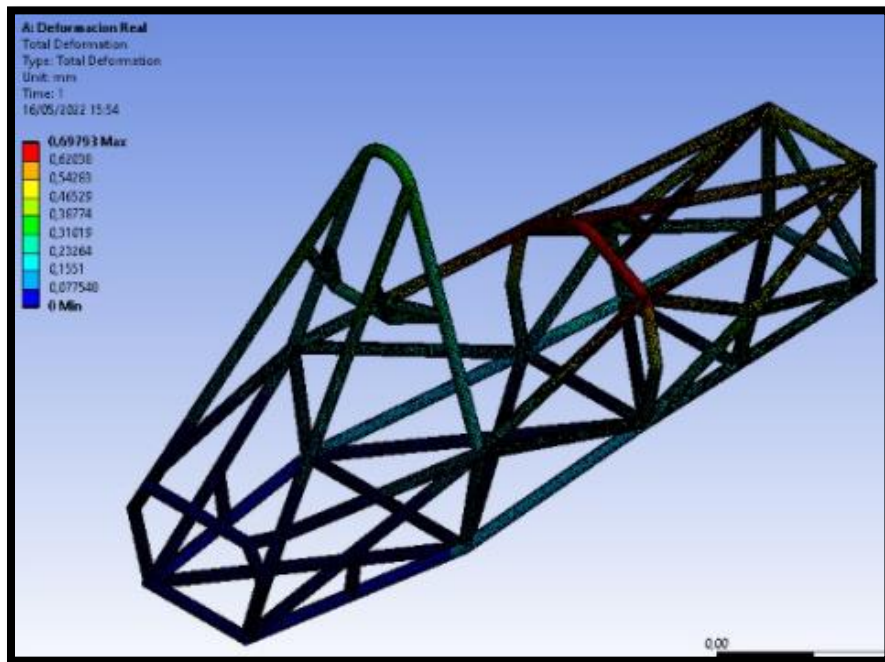


Figura 2.22 Esfuerzo de rigidez torsional.



Fuente: Autores

Figura 2.23 Deformación de rigidez torsional.



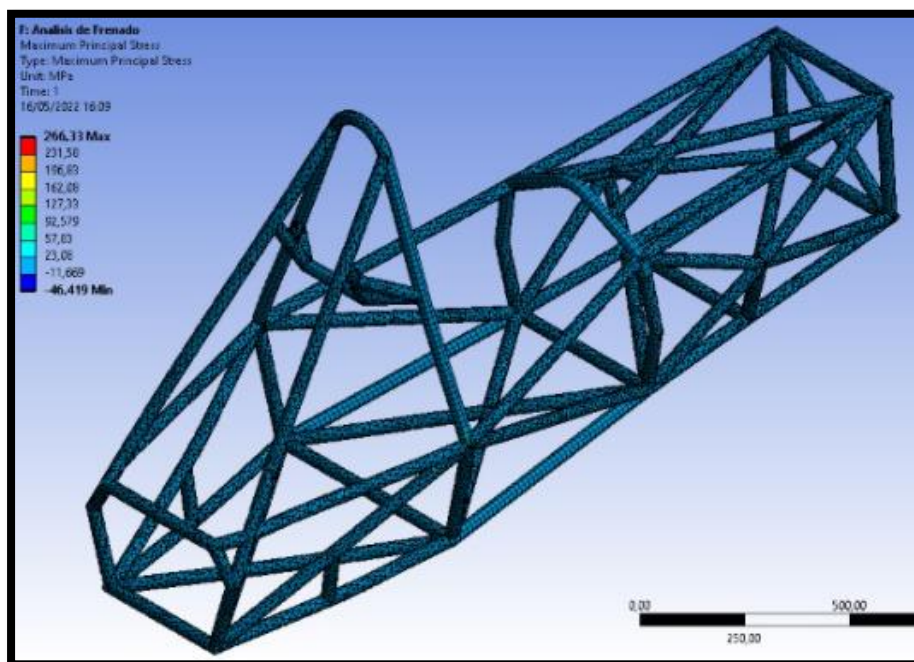
Fuente: Autores

## 2.10 Análisis de frenado.

En el ensayo estructural actúan las fuerzas de frenado sobre las llantas delanteros longitudinalmente a la estructura, las restricciones y fuerzas del chasis se destinan en la suspensión delantera y posterior, de la misma forma el valor es de 2738.89N en sentido vertical y 1288.53 N en sentido horizontal. Se puede observar los ensayos en la figura 2.24 y 2.25.

- En el cual se indica 266.33Mpa y 1.79mm de deformación.

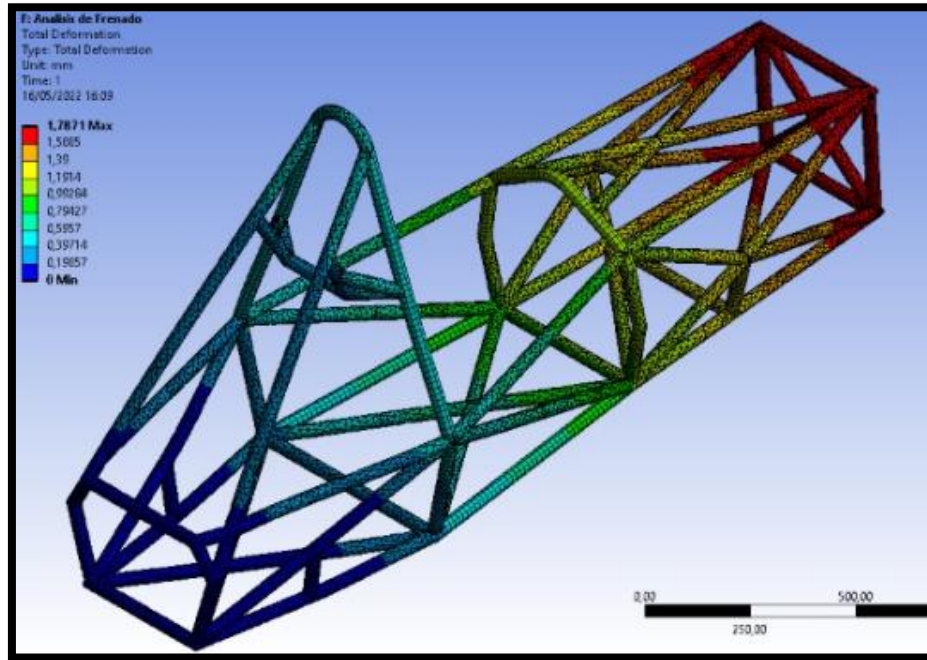
Figura 2.24 Esfuerzo en análisis de frenado.



Fuente: Autores



Figura 2.25 Deformación en análisis de frenado.



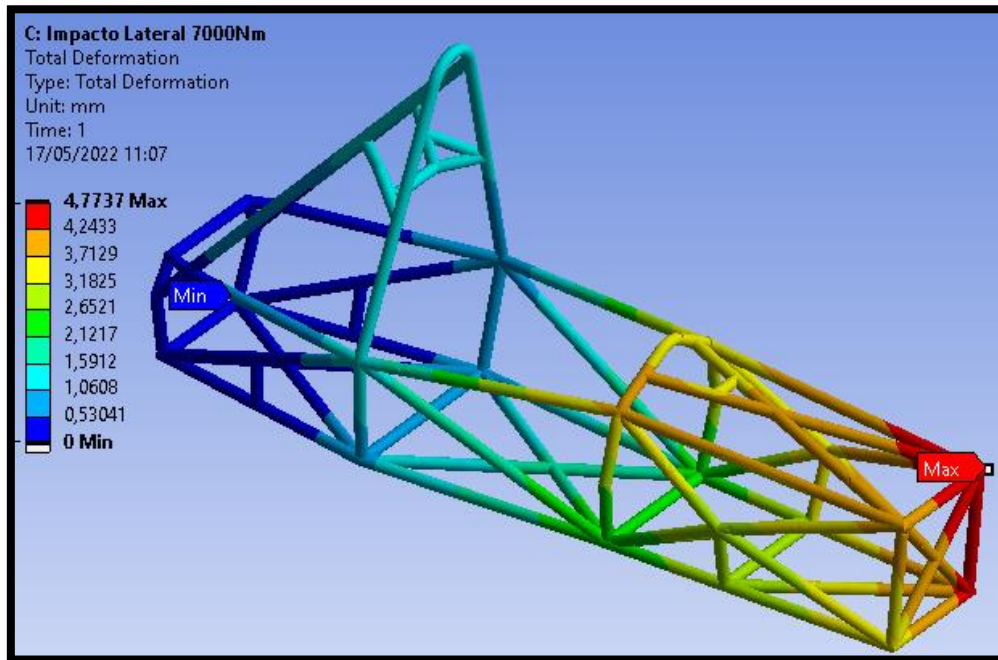
Fuente: Autores

### 2.11 Simulación de impacto lateral.

Para el ensayo de impacto lateral quien conforman situaciones originarias de desplazamiento máximos se establecen por las normativas SAE literal F6.4, la fuerza de impacto es de 7000N aplicada en la estructura de impacto lateral y las condiciones de movimiento se colocan en los nodos inferiores de los arcos antivuelco, además la deformación máxima en cualquier parte del chasis debe ser de 25mm (Salazar, 2018).

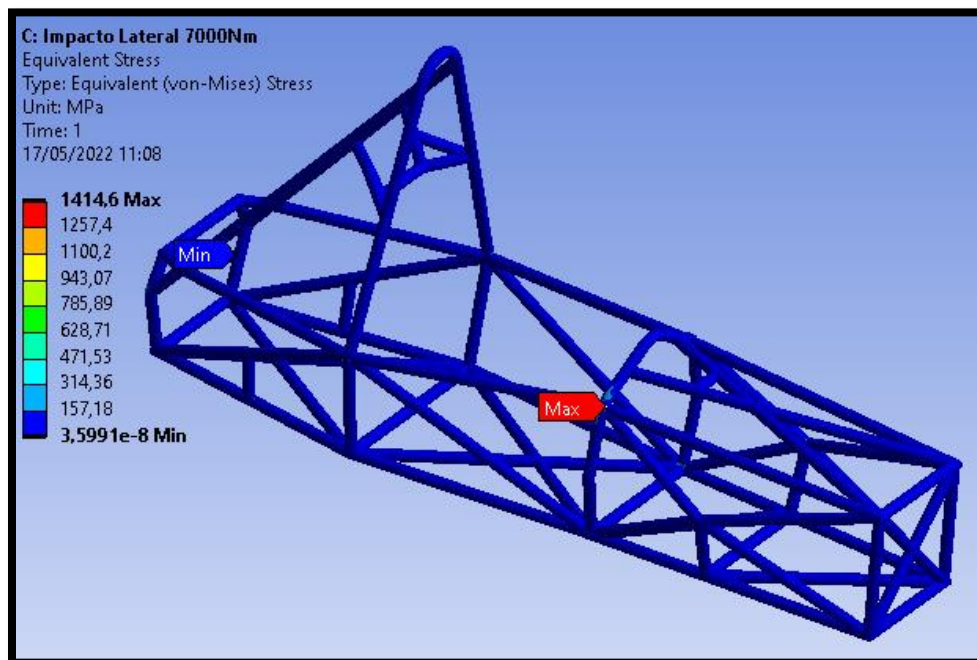
Tenemos el resultado obtenido del análisis donde se demuestra que el valor máximo de deformación es de 4.7737mm como se muestra en la figura 2.26, los esfuerzos se dan en las uniones del arco antivuelco de igual importancia se muestran fuerzas máximas de 1414.6Mpa de este modo muestra a continuación. (figura 2.27)

Figura 2.26 Deformación en impacto lateral.



Fuente: Autores

Figura 2.27 Esfuerzo en impacto lateral.



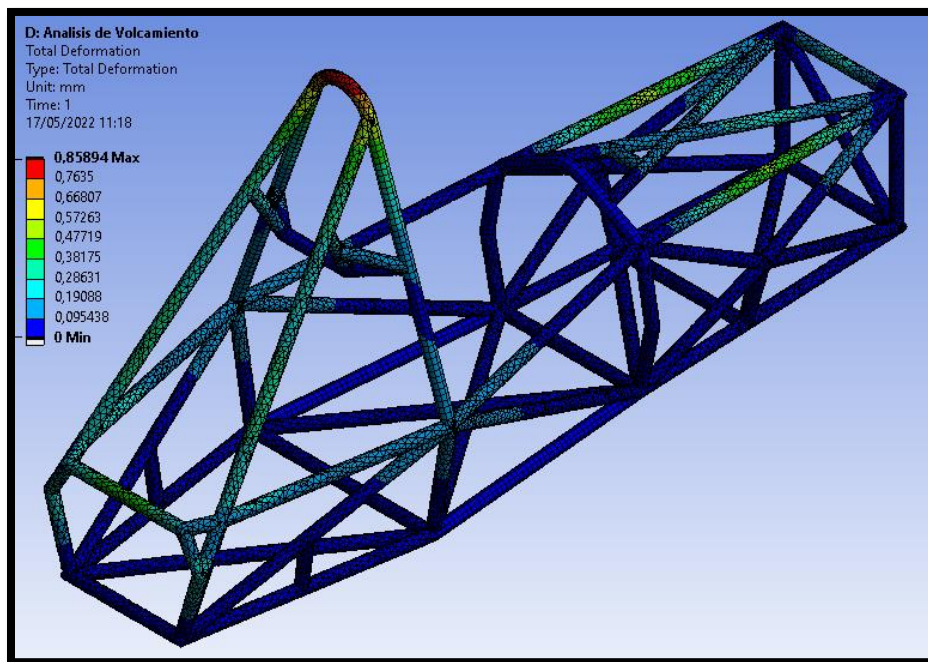
Fuente: Autores

## 2.12 Simulación de vuelco.

Para este análisis las situaciones iniciales y deslizamientos máximos son determinados en las nuevas normativas formula SAE 2016 literal AF4.3 en donde presentamos una simulación en donde se emplean tres cargas en sentido longitudinal (6kN), una carga en sentido transversal (5kN), y una carga en sentido vertical (9kN). Las condiciones de movimiento se sobreponen en las uniones inferiores de los arcos antivuelco, por ende, la deformación permisible en cualquier elemento del chasis debe ser de 25mm. (FORMULA SAE, 2022)

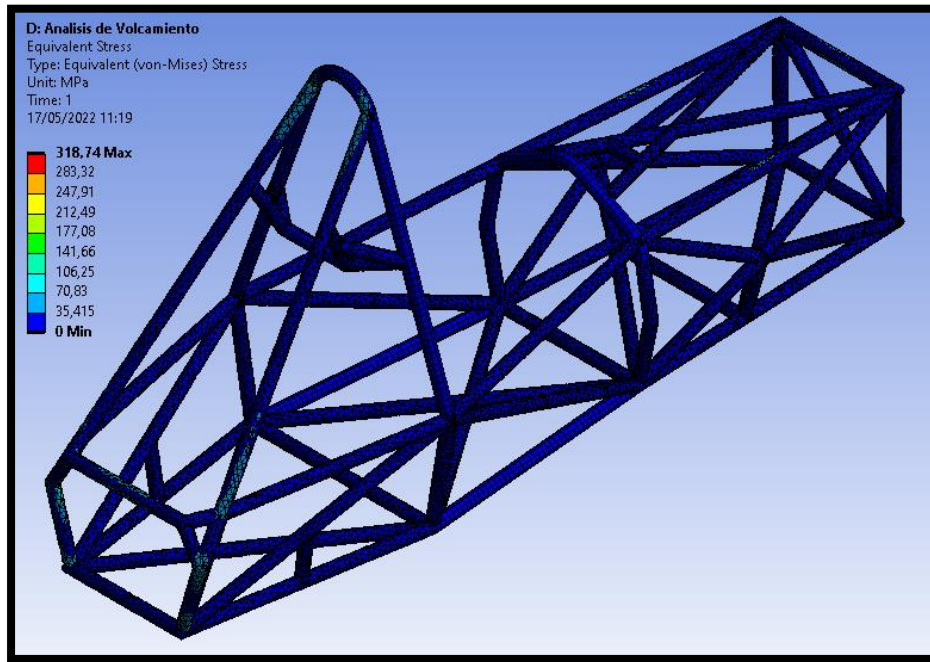
Los análisis obtenidos en la simulación de vuelco demuestran que el valor máximo de deformación es de 0.85mm representado en la imagen 2.28, En los nodos de la estructura es de 318.74 MPa de esfuerzo máximo, representado en la imagen 2.29.

Figura 2.28 Deformación en una simulación antivuelco.



Fuente: Autores

Figura 2.29 Esfuerzos en una simulación antivuelco.



Fuente: Autores

### 2.13 Costos de construcción

En la tabla presentada a continuación se podrá observar los elementos necesarios para la optimización del chasis Formula SAE; a la vez se ejemplifica la cantidad y costo. Con esta tabla se trata de tener el precio de la optimización del chasis.

Tabla 7. Lista de materiales para optimización del chasis Formula SAE EB17

#### MATERIALES Y ELEMENTOS PARA LA OPTIMIZACION DEL MONOPLAZA TUBULAR FORMULA SAE EB17

Numeración	Producto	Cantidad	Valor Unitario (USD)	Valor Total (USD)
1	Alambre MIG/MAG 5kg	1	15.00	15.00

2	Disco de corte metal 41'2P x0.8	2	2.17	4.34
3	Disco de lijas 115*22.23 – 120p	2	3.78	7.56
4	Disco de desbaste metal 115*6.0*22.23mm	3	3.12	9.36
5	Tanque Indurmix 10m <sup>3</sup>	1	90	90
6	Tubos de acero 1 in x 0.065 in	1	75	75
7	Pintura automotriz negro mate	1/8	9	9
8	Kit de tintas penetrantes para la inspección de soldadura	1	65	65
<b>TOTAL</b>				275.26

Fuente: Autores

### **3. Reconstrucción y rediseño**

El proceso para la reconstrucción y rediseño se debe realizar primero un estudio y una vez realizado el proceso, se realiza los siguientes procesos:

- Corte, desbaste y pulido de elementos del miembro estructural original
- Ensamble de nuevos miembros estructurales
- Unión mediante soldadura de elementos estructurales y verificación de integridad de la soldadura.

#### **3.1 Corte, desbaste y pulido de elementos del miembro estructural original**

Para realizar el corte de la estructura se debe primero realizar un análisis en el cual se detecten cuáles son los miembros estructurales que no están realizando un aporte para los impactos que se puedan presentar en el vehículo y además se analiza también las cargas con los diferentes tipos de amortiguamiento y frenado que pueda existir en la estructura.

Siguiendo el análisis presentado previamente desde el punto 2.8 al 2.12, en el cual se muestran los diferentes tipos de fuerzas y movimientos que tiene la estructura, como primer punto se corta los puntos de sujeción del arco frontal con la mampara delantera, en las cuales se puede observar un desplace de 1cm del punto medio, por lo que la suspensión interviene en este punto, dado que no se tiene la misma carga ni la misma distancia para los amortiguadores, en este punto se pudo encontrar otro error de construcción el cual era la inclinación de la dirección, por lo cual se podrá solucionar el problema de dureza de la dirección.



Figura 3.1 Desface de parte superior delantera.



Fuente: Autores

La figura representada a continuación se podrá observar los miembros estructurales los cuales sostiene al volante, el cual será desplazado 3cm, el cual nos ofrecerá un ángulo adecuado para el buen funcionamiento de la dirección, ofreciendo suavidad en el giro.

Figura 3.2 Sujeción de elementos rotativos para el volante



Fuente: Autores

Debido al mal centrado de la “X” delantera superior se tuvo un problema en los amortiguadores los cuales tenían más de 1 grado de libertad, en el cual los esfuerzos recaen directamente en el amortiguador, por lo cual uno de ellos se rompió en la punta por el esfuerzo que se tiene en el eje “y”, en la figura 3.3 a continuación se puede observar el amortiguador en malas condiciones.

Figura 3.3 Amortiguador delantero derecho Ohlins



Fuente: Autores

### 3.2 Construcción de miembros estructurales

Los miembros estructurales utilizados para la fabricación de fueron extraídos del programa como elemento individual para obtener las medidas que se necesitaba para los nuevos cortes de los tubos, en donde se emplearon plantillas para que los tubos tuvieran la medida exacta y los tipos de acoples que se necesitaba. En la siguiente imagen se puede observar un elemento individual el cual se empleará el modo “creación de prototipo” para obtener las medidas en modo 2D.



Figura 3.4 Aplicación de plantillas en fabricación de miembros estructurales



Fuente: Autores

### 3.3 Corte de miembros estructurales del chasis

Para el corte de los miembros estructurales se tomó en cuenta los estudios hechos en el programa “ANSYS”, en el cual se pudo detallar que elementos eran los reemplazados, con un total de 12 tubos retirados los cuales fueron reemplazados por 4 principales y 2 tubos en los cuales se realizó una corrección del anterior diseño puesto que estaban mal posicionados. Para este proceso se toma medidas antes de realizar el proceso para verificar al momento que se corte los elementos estructurales no tengan ningún cambio.

Se procede a cortar los elementos laterales de la estructura de impacto lateral, los tirantes de la parte superior que sujetan la mampara de impacto con la mampara delantera, y lo que es toda la parte trasera, debido a su sobre dimensionamiento del chasis. En la siguiente figura se puede observar el corte de los miembros estructurales laterales del chasis.

Figura 3.5 Corte de estructura lateral de impacto



Fuente: Autores

Una vez realizado los cortes y pulido en los elementos se tiene únicamente las estructuras principales, las cuales son: Estructura antivuelco, mampara frontal y delantera. Teniendo realizado el proceso de corte de cada uno de los elementos y el pulido del chasis, se procede a hacer la conexión de los miembros estructurales con suelda, en este caso se ha usado suelda MIG con gas CO<sub>2</sub>, el cual nos garantiza una fusión de materiales y cordones de suelda limpios para la verificación de sueldas. Para este paso se debe realizar la conexión de los diferentes miembros estructurales por medio de puntos de suelda, para verificar las conexiones y las medidas que se precisan.

En la figura mostrada a continuación se puede observar la conexión de dos elementos mediante un cordón de suelda, el cual fue realizado en cuatro partes por ser una conexión total entre dos tubos. Para la aplicación de la suelda CO<sub>2</sub> se debe tener en cuenta que la calibración del gas debe estar entre 15 a 20 LPM (flujo de gas).

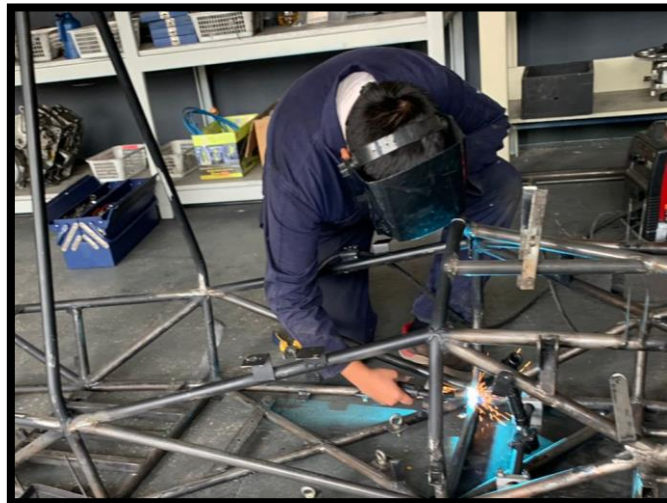
Figura 3.6 Soldadura de tirantes delanteros entre mampara delantera y frontal



Fuente: Autores

Finalmente, para obtener todo el sistema del chasis completo se debe realizar unos pequeños retoques de soldadura en los bordes más complejos para la estructura quede completamente armada sin ningún tipo de poro y sin deficiencias, en la figura mostrada a continuación se puede observar todos los miembros estructurales soldados.

Figura 3.7 Soldadura de estructura lateral de impacto por la parte interior



Fuente: Autores

### 3.4 Análisis no destructivos de soldadura

En la soldadura es examinada con el uso de tintas penetrantes, dándonos a conocer que es un análisis con el cual evidenciar la eficacia de cordones de suelda y separaciones que existen entre uniones. Este procedimiento consiste en observar a simple vista pequeñas porosidades sobresaltándolas de color fosforescente. (Salazar, 2018)

Igualmente se limpiar las uniones de suelda entre uniones del chasis. Las soldaduras tienen que estar sin polvo, grasas y materiales contaminantes, por lo cual se debe realizar una limpieza profunda para dicho proceso.

En el proceso de limpieza realiza se utilizó disolvente para las grasas y pintura en la cual dejamos a los elementos listos para la aplicación del líquido penetrante.

Una vez limpio la superficie a ser comprobada se aplicará el primer spray el cual es el elemento penetrante, el objetivo es tener una película uniforme y fina en la superficie antes ya limpiada, después de este proceso se deja reposar en un lapso conocido como “tiempo de penetración” el cual consiste en dejar actuar de 15 a 10 minutos tiempo en el cual las porosidades absorben el químico.

Figura 3.8 Uso de tinta penetrante en cordón de soldadura



Fuente: Autores

Posteriormente, se retira el exceso del líquido penetrante limpiando completamente la superficie con algún agente disolvente.

Tomando en cuenta que la realizacion de la inspeccion nos dara los distintos tipos de fallos y fisuras que existan entre cordones y uniones de soldadura. Dado que si no se retira de manera correcta las tintas estan podran mostrar falsas porosidades o grietas.

La funcion del liquido revelador es de crear una reaccion quimica la cual incita a salir a la tinta por las diferentes grietas que presenta los nodos.

Los resultados del quimico revelador se puede apreciar a continuaciòn dando a conocer al usuario la cantidad de porosidades que tiene el cordon de suelda. En este paso se puede hacer las correcciones necesarias en las sueldas, por tal modo si existe suelda la cual tiene un indice alto de porosidades se tendra que eliminar el cordon de suelda para volver a unir los elementos de manera correcta evitando problemas posteriores de fatiga de material y desoldado.

Figura 3.9 Uso de tinta reveladora y proceso final de acabado



Fuente: Autores

Como proceso final tenemos el pintado de la estructura después de haber realizados las pruebas limpiamos la tinta penetrante y procedimos con el acabado final en el cual se basa en pintar toda la estructura con spray negro brillante el cual le dio un acabado estético de mejor calidad a la estructura tal como se presenta en la figura 3.10.



Figura 3.10 Pintado del nuevo chasis

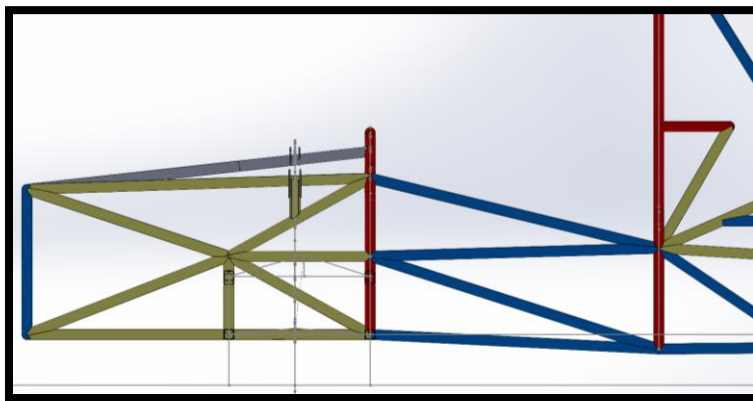


Fuente: Autores

Este acabado se utilizó tres frascos de pintura de negro brillante para darle un mejor acabado en el cual se corrigió fallas y se procedió a terminar el trabajo de pintado.

En la figura representada a continuación se tiene el modelo original del Formula SAE EB17 (Figura 3.11), en el cual se puede observar la unión entre la mampara principal y la frontal tiene una unión de 4 elemento constructivos, los cuales forman la estructura de impacto lateral, y en la figura 3.12 se puede observar que fueron retirados 2 tubos para ser reemplazado por uno solo.

Figura 3.11 Formula SAE EB17



Fuente: Autores

Figura 3.12 Formula SAE EB17 rediseñado



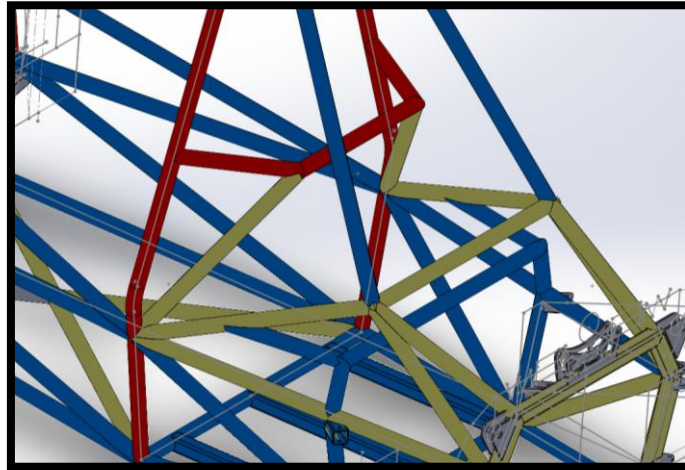
Fuente: Autores

A continuación, en la imagen 3.12 se puede observar que la triangulación utilizada fue por medio de puntos críticos de esfuerzo, tomando en cuenta que se tiene la misma rigidez en el chasis, sin interferir en la disposición y análisis del mismo.

En la parte trasera se remodelo gran parte, debido a que existían varios elementos constructivos los cuales no desempeñaban una función óptima, por dado motivo se decidió retirar y reemplazar por tubos directos y triangulaciones más pequeñas aportando una rigidez un poco superior, esto ocurre porque los elementos constructivos no tienen divisiones y tampoco soldaduras en las cuales pueda existir algún tipo de mal soldado o falla de estructura.

En la imagen 3.13 se puede observar que los elementos constructivos son por uniones, debido a que el reglamento del Formula SAE 2017 no permitía unir al arco principal con el arco trasero del chasis.

Figura 3.13 Parte trasera SAE EB17



Fuente: Autores

A partir del nuevo modelado de la parte posterior del monoplaza, se unió directamente el arco principal con el arco trasero; con una triangulación directa entre elementos de esfuerzo, tanto por volcamiento como por choque, como se podrá observar en la imagen a continuación.

Figura 3.14 Parte trasera Formula SAE EB17 rediseñado

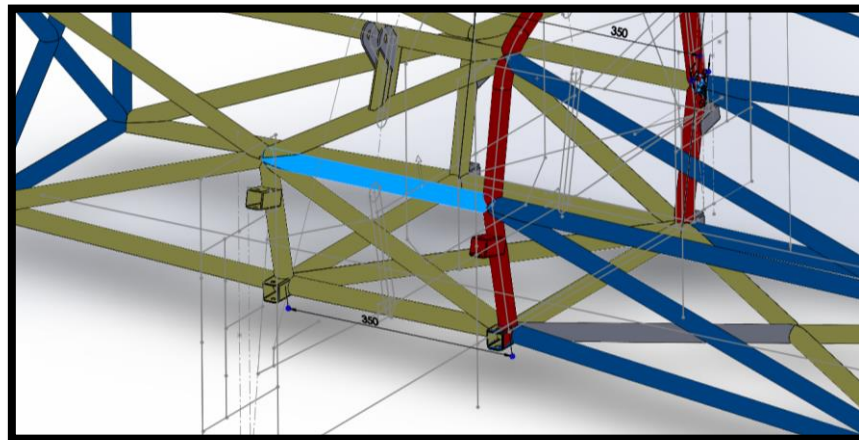


Fuente: Autores



En la siguiente figura se retiró el tubo señalado debido a que la triangulación anterior era por medio de los tubos que unía la mampara frontal con el arco principal, de tal forma en el rediseño se pudo retirar y por ende mermar peso final para el chasis, en la figura 3.15 se puede observar el diseño original del chasis, en el cual se puede ver que la unión entre los elementos de estructura de impacto lateral hace una unión con el tubo sujeto al arco delantero.

Figura 3.15 Arco delantero SAE EB17



Fuente: Autores

A continuación, se puede prestar atención que la triangulación en la mitad de la estructura, por la modificación en la estructura de impacto lateral.

Figura 3.16 Arco delantero SAE EB17 modificado



Fuente: Autores

### **3.5 Análisis de resultado**

#### **3.5.1 Análisis de resultados finitos**

##### **3.5.1.1 Rigidez torsional**

El estudio de rigidez torsional a partir de elementos finitos aporta:

- El valor de rigidez torsional calculado es de 7793,3 Nm/grado
- La mayor carga de deformación es de 4,7737 mm donde se presentan esfuerzos máximos de 1414,6 Mpa.
- Las concentraciones de esfuerzos en los nodos de la estructura son de 380 Mpa y en los fragmentos intermedios de los segmentos se alcanza fuerzas de 320 Mpa.

Los esfuerzos máximos que se tiene en los estudios no sobrepasan el borde elástico, consiguiendo un factor de seguridad 1.2, se puede observar la deformación máxima del material es cuando se tiene un impacto lateral el cual es de 4.8mm el cual no afecta de manera directa en la dinámica del Formula SAE, para los cálculos obtenidos se requiere un desplazamiento de fase mayor a 10 mm para que la suspensión empiece a tener problemas.

Los valores de rigidez torsional para los vehículos de Formula SAE están sobre 2600 a 3200 Nm/grado. Por ende 7793.3 Nm/grado se obtiene de triangulaciones y la distribución de materiales y sus espesores de pared.

##### **3.5.1.2 Rigidez Longitudinal**

La rigidez longitudinal se establece por su máxima flexión en el armazón por la masa de los diferentes sistemas que componen el monoplaza. Los esfuerzos máximos y deformación alcanzados en la estructura son de 399.92MPa y 0.69mm.

##### **3.5.1.3 Frenado**

En el estudio estructural actúan las fuerzas de frenado que actúan sobre las ruedas delanteros en sentido longitudinal al chasis, la fuerza empleada como tal es de 2738.89N en sentido vertical y

1288.53N en el sentido horizontal, se encuentran los valores de 266.33Mpa y 1.79mm de deformación en el chasis. (Estruch, 2016)

#### **3.5.1.4 Impacto lateral**

En el análisis obtenido donde se demuestra que el valor máximo de deformación es de 4.7737mm, las uniones de esfuerzo se establecen en las uniones del arco antivuelco, arrojando unas fuerzas máximas de 1414.6Mpa.

#### **3.5.1.5 Vuelco**

Para este análisis las condiciones iniciales y desplazamientos máximos en la simulación se implementan tres cargas en sentido longitudinal (6kN), una carga en sentido transversal (5kN), y una carga en sentido vertical (9kN). Las condiciones de movimiento se colocan en las uniones inferiores de los arcos antivuelco. (INTERNATIONAL, 2021) Los resultados de simulación de vuelco señalan que el valor máximo de deformación es de 0.85mm, dando que en algunos nodos de la estructura es de 318.74 MPa.

### **3.6 Resultados de pruebas**

Los resultados del químico revelador reveló que existen imperfecciones en ciertos cordones de soldadura. Los desperfectos que tienen mencionados cordones se los puede corregir con el fin de tener una soldadura limpia para que no exista problemas de unión, con esto se corrige para evitar a largo plazo la creación de grietas.

### **Conclusiones**

- Una vez rediseñado el Formula SAE EB17, se ha logrado cumplir los objetivos específicos propuestos en el proyecto de titulación, con esto se pudo llevar a cabo la optimización del chasis en su totalidad, cumpliendo con las normativas propuestas por las reglas del Formula SAE 2022 y reduciendo su peso en 3.4 kg de la totalidad del peso del chasis.
- Completando el análisis del estado del arte, este permitió establecer e identificar las reglas más generales de la estructura del chasis y las restricciones para la optimización del diseño

original de la construcción, esta optimización del chasis se realizó con el apoyo de varios trabajos de titulación, los cuales sirvieron de guía.

- Con un análisis en el programa de SolidWorks se pudo determinar las medidas y soluciones que se podía tener para una mejora en el peso y de esta forma poder optimizar de mejor manera el chasis tubular, con el estudio de los sistemas. Esto permitió dimensionar de manera correcta y poder tener una triangulación del sistema sustituyendo varios elementos de sujeción, de esta forma se tuvo un primer dibujo el cual se analizó los elementos finitos para poder determinar de manera homogénea una buena sustitución de material y siguiendo los patrones del Formula SAE original, también se pudo cambiar varios patrones con las nuevas normas del reglamento 2022; dando uso de elementos tipo Shell en los análisis de mallas condescendió lograr resultados para una mejor exactitud, en los cuales se puede analizar esfuerzos de compresión, torsión y flexión de manera puntual, los análisis establecieron una triangulación es idónea para aguantar situaciones límites de trabajo y de igual forma varios tipos de impactos y fuerzas.
- La implementación del nuevo diseño para el formula SAE EB17 se pudo observar que a pesar de haber disminuido peso en 3.4 kg o 9.71% del peso del chasis, se pudo mantener la resistencia y aportando una mayor eficiencia a los diferentes tipos de esfuerzos, esto se da por la reducción de elementos constructivos por elementos únicos de unión. Para garantizar que los procesos de construcción estén acordes al diseño realizado en el capitulo 2, se realizó una verificación a la soldadura mediante tintas penetrantes.

## **Recomendaciones**

- Al ser un proyecto de competencia se tiene que analizar el reglamento y normas actualizado del Fórmula SAE 2022 ya que existen cambios con el anterior reglamento, esto con el fin de no presentar inconvenientes al momento de hacer cambios en la estructura
- Al momento de hacer los cortes del antiguo diseño se tiene que verificar por donde se van a realizar puesto que tiene que quedar una base en donde van las uniones del nuevo diseño.
- En los cortes donde no van uniones se debe dejar una superficie lisa esto con las maquinas apropiadas que son la pulidora y devastadora de metal para tener unos mejores acabados en

los cuales no se presente ningún filo que pueda generar algún riesgo al equipo que trabaje en el Formula SAE.

- En la fase de corte se debe apreciar los elementos que pueden ser reutilizados con el fin de no desperdiciar material dado que el nuevo diseño es compatible.
- Se recomienda siempre seguir la guía de construcción, o seguir un diseño de construcción antes de realizar cortes o soldaduras de elementos.
- Recordar una revisión de elementos mecánicos tales como: uniones de chasis, anclajes de chasis, amortiguadores, dado que por el uso se puede presentar inconvenientes de mantenimiento obligatorio.

## Referencias Bibliográficas

- Akron, T. U. (2019). *ZIPS RACING The University of Akron*. Obtenido de ZER19/Veronica: <https://zipsracing.org/zer-19>
- Borja Robalino, R. S. (2017). *Academico*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15081/1/UPS-CT007439.pdf>
- E.Zigurat. (07 de 09 de 2012). *Ingenieros de la crisis*. Obtenido de POSTPROCESO, OTRO PASO MÁS EN EL ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS: <https://ingenierodelacrisis.wordpress.com/2012/09/07/postproceso-otro-paso-mas-en-el-analisis-mediante-elementos-finitos/>
- Estruch, A. P. (2016). *Vehiculo de competicion fomrula SAE: Diseño y Optimizacion del chasis*. Valencia: Universidad politecnica de valencia.
- FORMULA SAE. (2022). *SAE*. Obtenido de <https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- Hanway, H. (27 de Julio de 2021). *Electrical & Computer Engineering University of Michigan*. Obtenido de Michigan Electric Racing takes first place at Formula SAE Michigan: <https://ece.engin.umich.edu/stories/michigan-electric-racing-takes-first-place-at-formula-sae-michigan>
- Ingenieria, A. N. (18 de Mayo de 2020). *Ansys Notas Ingenieria*. Obtenido de Stamping part - Ansys workbench: [https://www.youtube.com/watch?v=xY6aenLiL\\_U](https://www.youtube.com/watch?v=xY6aenLiL_U)
- INTERNATIONAL, S. (2021). Formula SAE Rules 2022. En S. INTERNATIONAL, *Formula SAE Rules 2022* (pág. 32).
- Kuo, Y.-C. (19 de Diciembre de 2019). *Crowdfunding SJSU*. Obtenido de Spartan Racing Formula SAE: <https://power.sjsu.edu/project/12942>
- Mora, M. R. (2019). *Antropologia Fisica. Universidad Tecnica de Ambato*.
- Norton, R. L. (2018). *Diseño de Mquinaria*. Mexico. Obtenido de [https://scholar.google.com/ec/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&as\\_vis=1&q=dise%C3%B1o+de+maquinaria+norton+2009&btnG=#d=gs\\_cit&t=1656889909267&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3AKyFaPfK-gZAJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D1%26hl%3Des](https://scholar.google.com/ec/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=dise%C3%B1o+de+maquinaria+norton+2009&btnG=#d=gs_cit&t=1656889909267&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3AKyFaPfK-gZAJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D1%26hl%3Des)
- R.Singh. (2010). *Semantic Scholar*. Obtenido de STRUCTURAL PERFORMANCE ANALYSIS OF FORMULA SAE CAR: <https://www.semanticscholar.org/paper/STRUCTURAL-PERFORMANCE-ANALYSIS-OF-FORMULA-SAE-CAR-Singh/df42360fa90e001331c9ebb5e804d5b384140bbb>

Rodriguez, C. (2010). *Diseño y Analisis de un chasis para un prototipo SAE*. Obtenido de Academico: <http://bit.ly/2Sh3vCW>.

Salazar, V. R. (2018). *Diseño y construcción de un chasis tubular de un vehiculo de competencia formula sae electrico*. Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana.

Santiago Chuquimarca, M. S. (2017). Diseño y Desarrollo de una batería de alto voltaje para un vehiculo de competencia tipo formula Sae Eléctrico. *Universidad Politecnica Salesiana*, 64.