



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño y construcción de la estructura tubular del vehículo prototipo tipo "Tumbler"

Dueñas Narváez, José Esteban y Tello Torres, Carlos Daniel

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero

Automotriz

Ing. Cruz Arcos, Guillermo Mauricio

28 de febrero de 2024

Latacunga

Reporte de verificación de contenido



Plagiarism and AI Content Detection Report

TESIS_DUEÑAS_TELLO_FINAL_FINAL-1...

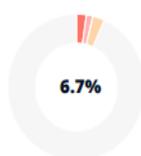
Scan details

Scan time:
February 28th, 2024 at 18:21 UTC

Total Pages:
73

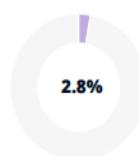
Total Words:
18105

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	2.4%	428
Minor Changes	1.5%	276
Paraphrased	2.8%	506
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	2.8%	507
Human text	97.2%	17598

[Learn more](#)



Cruz Arcos, Guillermo Mauricio
C.C.: 050301055-5



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Certificación

Certifico que el trabajo de unidad de integración curricular. **Diseño y construcción de la estructura tubular del vehículo prototipo tipo "Tumbler"** fue realizado por los señores **Dueñas Narváez, José Esteban y Tello Torres, Carlos Daniel**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenido; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se sustente públicamente.

Latacunga, 28 de febrero del 2024



Cruz Arcos, Guillermo Mauricio
C.C.: 050301055-5



Departamento de ciencia de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Responsabilidad de Autoría

Nosotros **Dueñas Narváez, José Esteban** y **Tello Torres, Carlos Daniel**, con cédulas de ciudadanía N° **172716856-7** y **180547752-6**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de unidad de integración curricular: **"Diseño y construcción de la estructura tubular del vehículo del prototipo tipo "Tumbler" "** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 28 de febrero de 2024

.....
Dueñas Narváez, José Esteban
C.C.: 172716856-7

.....
Tello Torres, Carlos Daniel
C.C.: 180547752-6



Departamento de ciencia de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Autorización de Publicación

Nosotros **Dueñas Narváez, José Esteban** y **Tello Torres, Carlos Daniel**, con cédulas de ciudadanía N° **172716856-7** y **180547752-6**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de unidad de integración curricular: "**Diseño y construcción de la estructura tubular del vehículo prototipo tipo "Tumbler"**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 28 de febrero del 2024



.....
Dueñas Narváez, José Esteban
C.C.: 172716856-7



.....
Tello Torres, Carlos Daniel
C.C.: 180547752-6

Dedicatoria

Con profundo aprecio por su constante apoyo e inspiración, quiero dedicar este proyecto de investigación a primordialmente a mis padres, quienes hicieron de este un camino mucho más ameno, porque cuando hubo obstáculos, no dudaron en ser apeo para poder seguir en este renuente camino.

Uno pierde a quien realmente olvida, y durante este tiempo y el que mi alma me lo permita serás precursor de todos los sueños y objetivos logrados, Freddy Dueñas, padre, sé que desde el cielo me has guiado y bendecido en estos mis últimos pasos por esta etapa, aunque el no tenerte presente lo hizo mucho más difícil, gracias a tus enseñanzas y el carácter que formaste en mí, esto ha sido posible.

María Narváez, madre, sin duda eres el pilar principal en cada uno de mis logros, me has dado la sabiduría para afrontar todas las etapas de mi travesía, mediante el ejemplo genuino de cómo afrontar la vida, incluso cuando las circunstancias se tornaron complejas, inculcaste en mí la importancia de cumplir con mis obligaciones y compromiso, lo que soy es gracias a ti.

Finalmente, pero no menos importante a Paula Dueñas, quien, como hermana, ha sido ejemplo de superación y de excelencia, has visualizado mi crecimiento y mis caídas; hemos afrontado momentos duros, sin embargo, prosperamos.

Es por eso, que este logro es tanto mío como suyo, porque de no haber sido por ustedes, los obstáculos hubieran sido mucho más difíciles de superar y las caídas mucho más dolorosas, con mucho amor y una inmensa gratitud, se los dedico.

Dueñas Narváez José Esteban

Agradecimiento

La gratitud es la memoria del corazón, por lo cual quiero expresar mi más inmenso agradecimiento a Hortencia Molina, quien durante todo el transcurso de esta etapa me brindó su cobijo, me abrió las puertas de su hogar y veló por mi bienestar e integridad, sin ella nada de esto hubiera sido posible.

A Marcelo Molina, quien fue apoyo tanto emocional como académico, que a pesar de todo me ayudó a solucionar muchos de los problemas que se me presentaron, muchas veces cumplió con roles inimaginables, es por eso que le extiende la mayor de las gratitudes.

A mis compañeros y amigos Cristhian, Alexander, Daniel, Carlos, Sebastián, Josué, David y Frank, con los que hemos compartido aulas, sufrimientos, angustias, pero sobre todo alegrías, quiero darles las gracias por hacer de esta travesía una enseñanza y un bello recuerdo.

Expresar mi mayor respeto y agradecimiento al Ingeniero Mauricio Cruz, docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz, mentor y guía desde el empuje de esta etapa, que ha extendido su mano y ha depositado su confianza en nosotros para poder culminar el presente proyecto de investigación.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas que han estado a lo largo de este camino, las huellas que han dejado y las enseñanzas que han brindado a mi vida, todas las experiencias vividas, me han formado como la persona que soy.

Dueñas Narváez José Esteban

Dedicatoria

Este proyecto de investigación está dedicado principalmente a mis queridos padres, Italo Tello y Germania Torres. Han sido mi fuente de amor, sabiduría y apoyo constante a lo largo de mi carrera. Su respaldo ha sido mi faro, guiándome a través de las derrotas y victorias en la vida. Agradezco profundamente por inculcarme el valor de la honestidad, la importancia de la perseverancia y por todos los sacrificios que han hecho por mí.

A pesar de nuestras diferencias y desacuerdos, siempre hemos encontrado la manera de dejar a un lado nuestras disputas y unirnos como uno solo para alcanzar nuestros objetivos. A mi hermano mayor, Paul, le agradezco cada consejo, aprendizaje y anécdota compartida. A pesar de nuestras experiencias buenas o malas eres un ejemplo para mí. A Italo, te agradezco por ser mi motivación diaria, por sacarme una sonrisa, por ser mi versión de niño y recordarme cada día por qué hago cada cosa, este logro es nuestros mis queridos hermanos.

A mis abuelos, tanto paternos como maternos, les agradezco su preocupación constante por mí, por el apoyo incondicional y cada consejo que me ha ayudado a ser la persona que soy.

Carlos Daniel Tello Torres

Agradecimiento

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a mi tío Geova, quien ha sido más que un familiar, un amigo incondicional en este significativo proceso. Sus consejos y su ejemplo de buscar la felicidad a pesar de los obstáculos han sido una inspiración invaluable.

A mis compañeros y amigos de la universidad, Cristhian, Alexander, José, Carlos, Sebastián, Josué, David y Frank, les extiendo mi más sincero agradecimiento. Han sido una parte integral de mi vida, compartiendo conmigo tanto los momentos de alegría como los desafíos durante el curso de nuestra carrera. A pesar de los obstáculos que encontramos en este camino, su presencia y apoyo fueron fundamentales para la culminación de esta etapa.

Mi gratitud también se extiende a mi tutor, el Ingeniero Mauricio Cruz, docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz. Su mentoría y guía durante esta etapa han sido esenciales. Agradezco su apoyo y el tiempo que dedicó para la elaboración y conclusión de este proyecto de investigación.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a mis amigos Kevin, Alex, Alexander, Wladimir y demás. Su guía y las experiencias únicas que compartimos han sido una parte esencial de esta etapa de mi vida. Su amistad y apoyo han enriquecido mi experiencia y han contribuido en gran medida a mi crecimiento personal.

Carlos Daniel Tello Torres

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Dedicatoria.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenido.....	10
Índice de figuras.....	16
Índice de tablas.....	20
Índice de ecuaciones	21
Resumen.....	22
Abstract.....	23
Capítulo I Planteamiento del problema de investigación.....	24
Antecedentes	24
Planteamiento del problema	25
Justificación e importancia.....	27

	11
Alcance.....	28
<i>Objetivo General</i>	28
<i>Objetivos específicos</i>	28
Metas.....	29
Hipótesis.....	29
Variables de investigación	29
<i>Variables dependientes</i>	29
<i>Variable independiente</i>	29
Metodología de desarrollo del proyecto	30
<i>Método documental-bibliográfico</i>	30
<i>Método experimental</i>	30
<i>Metodología de investigación</i>	30
<i>Método analítico</i>	30
<i>Método sintético</i>	30
Capítulo II Fundamento teórico	31
Chasis.....	31
Tipos de chasis	31
<i>Chasis monocasco</i>	31
<i>Chasis tubular</i>	32
<i>Chasis híbrido</i>	33
Normativas	34

	12
<i>Fórmula SAE</i>	34
<i>ASTM A500</i>	39
<i>FIA</i>	40
<i>INEN</i>	41
Procesos de corte de tubos	46
<i>Corte abrasivo</i>	46
<i>Corte de sierra de banda</i>	47
<i>Aserrado en frío</i>	47
Proceso de doblado de tubos	48
<i>Doblado por comprensión</i>	49
<i>Doblado por arrastre y con mandril</i>	49
Tipo de soldadura.....	50
<i>Proceso SMAW</i>	50
<i>Proceso GMAW</i>	52
<i>Proceso GTAW</i>	54
<i>Proceso SAW</i>	55
<i>Proceso FCAW</i>	56
Ensayos no destructivos de soldadura	58
<i>Inspección visual</i>	60
<i>Inspección por líquidos penetrantes</i>	61
<i>Etapas de la inspección por líquidos penetrantes</i>	61

	13
Criterio de rigidez	62
<i>Rigidez torsional</i>	63
<i>Rigidez a flexión</i>	63
<i>Rigidez en la estructura de un automóvil</i>	64
Cargas en la estructura de un automóvil.....	65
Software CAD.....	65
Software CAE	65
<i>Estrés de Von Mises</i>	66
<i>Cargas Estáticas</i>	66
<i>Tensión</i>	67
<i>Deformación unitaria</i>	67
<i>Cargas dinámicas</i>	67
<i>Factor de seguridad</i>	67
Capítulo III Diseño	69
Diseño detallado.....	69
<i>Cabina</i>	69
<i>Estructura de impacto lateral</i>	70
<i>Distancia al suelo</i>	71
<i>Protección antivuelco</i>	72
<i>Arco delantero</i>	72
<i>Arco principal</i>	73

	14
<i>Triangulación</i>	74
Selección de tubos	75
Creación del material	76
Cálculo de cargas.....	77
<i>Cálculo de cargas muertas</i>	77
<i>Cálculo de cargas vivas</i>	78
<i>Cálculo carga de frenado</i>	78
<i>Cálculo de carga de aceleración brusca</i>	79
<i>Cálculo de carga de giro</i>	79
Análisis por elementos finitos	80
<i>Creación de malla</i>	80
<i>Creación de sujeciones fijas</i>	81
<i>Adición de cargas</i>	82
<i>Combinación de cargas</i>	87
<i>Resultados del análisis por elementos finitos</i>	88
Capítulo IV Construcción	90
Construcción de la estructura tubular	90
<i>Medición del tubo</i>	90
<i>Corte del tubo</i>	90
<i>Doblado del tubo</i>	91
<i>Soldado del tubo</i>	92

	15
Construcción	92
Capítulo V Resultados y discusión	97
Resultados por elementos finitos.....	97
<i>Obtención de criterio de Von Mises</i>	97
<i>Obtención escala de deformación</i>	99
<i>Obtención de factores de seguridad</i>	101
Ensayos no destructivos aplicados a la soldadura.....	103
<i>Inspección visual</i>	103
<i>Líquidos penetrantes</i>	105
Capítulo VI Marco Administrativo	109
Recursos humanos	109
Recursos tecnológicos	109
Recursos materiales	110
Presupuesto	111
Capítulo VII Conclusiones y recomendaciones.....	113
Conclusiones.....	113
Recomendaciones	116
Bibliografía	117
Anexos	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Árbol de problemas</i>	25
Figura 2 <i>Chasis monocasco de fibra de carbono</i>	32
Figura 3 <i>Chasis tubular</i>	33
Figura 4 <i>Chasis híbrido</i>	34
Figura 5 <i>Triangulación</i>	35
Figura 6 <i>Espacio de cabina</i>	36
Figura 7 <i>Estructura de impacto lateral</i>	37
Figura 8 <i>Distancia al suelo</i>	38
Figura 9 <i>Protección antivuelco</i>	38
Figura 10 <i>Corte abrasivo</i>	46
Figura 11 <i>Corte de sierra de banda</i>	47
Figura 12 <i>Corte con aserrado en frío</i>	48
Figura 13 <i>Doblado por comprensión</i>	49
Figura 14 <i>Doblado por arrastre y con mandril</i>	50
Figura 15 <i>SMAW: La soldadura más popular</i>	51
Figura 16 <i>GMAW: Soldadura en acero al carbón y acero inoxidable</i>	52
Figura 17 <i>GTAW: La soldadura para unir todo tipo de materiales</i>	55
Figura 18 <i>SAW: Soldadura por arco sumergido</i>	56
Figura 19 <i>Proceso FCAW</i>	57
Figura 20 <i>Torsión en viga en voladizo</i>	63
Figura 21 <i>Flexión de viga en voladizo</i>	64
Figura 22 <i>Dimensiones de la cabina</i>	70
Figura 23 <i>Dimensiones de la estructura de impacto lateral</i>	71

Figura 24 <i>Distancia del suelo</i>	71
Figura 25 <i>Vista lateral del diseño</i>	72
Figura 26 <i>Vista lateral de la estructura</i>	73
Figura 27 <i>Vista frontal de la estructura</i>	73
Figura 28 <i>Dimensión de separación del arco principal</i>	74
Figura 29 <i>Triangulación en la estructura de impacto lateral</i>	74
Figura 30 <i>Dimensiones de tubos por colores</i>	76
Figura 31 <i>Creación de análisis de estudio</i>	80
Figura 32 <i>Creación de malla</i>	81
Figura 33 <i>Sujeciones fijas delanteras</i>	81
Figura 34 <i>Sujeciones fijas posterior</i>	82
Figura 35 <i>Carga de motor y transmisión</i>	82
Figura 36 <i>Cargas de asientos y pasajeros</i>	83
Figura 37 <i>Carga del sistema de dirección</i>	83
Figura 38 <i>Carga de la pedalera</i>	84
Figura 39 <i>Cargas del tanque de combustible</i>	84
Figura 40 <i>Cargas de los faros delanteros</i>	85
Figura 41 <i>Carga de los faros posteriores</i>	85
Figura 42 <i>Carga de frenado</i>	86
Figura 43 <i>Carga de aceleración brusca</i>	86
Figura 44 <i>Carga de giro</i>	87
Figura 45 <i>Cargas Muertas + Vivas + Giro</i>	87
Figura 46 <i>Cargas Vivas + Muertas + Cargas de frenado</i>	88
Figura 47 <i>Cargas Vivas+ Muertas + Aceleración brusca</i>	88

Figura 48 <i>Datos obtenidos del análisis por elementos finitos</i>	89
Figura 49 <i>Proceso de cortado</i>	91
Figura 50 <i>Proceso de doblado de tubos</i>	91
Figura 51 <i>Proceso de soldadura</i>	92
Figura 52 <i>Diagrama de procesos para la construcción del prototipo</i>	93
Figura 53 <i>Panel frontal</i>	93
Figura 54 <i>Panel posterior</i>	94
Figura 55 <i>Piso de cabina</i>	94
Figura 56 <i>Estructura lateral</i>	95
Figura 57 <i>Arco principal</i>	95
Figura 58 <i>Arco delantero</i>	96
Figura 59 <i>Soporte de sistemas</i>	96
Figura 60 <i>Criterio de Von Mises cargas M+V+G</i>	97
Figura 61 <i>Criterio de Von Mises cargas V+M+F</i>	98
Figura 62 <i>Criterio de Von Mises cargas V+M+Ab</i>	98
Figura 63 <i>Escala de deformación de cargas M+V+G</i>	99
Figura 64 <i>Escala de deformación de cargas M+V+F</i>	100
Figura 65 <i>Escala de deformación de cargas M+V+Ab</i>	100
Figura 66 <i>Cálculo del largo de la estructura</i>	101
Figura 67 <i>Factor de seguridad cargas V+M+G</i>	102
Figura 68 <i>Factor de seguridad cargas V+M+F</i>	102
Figura 69 <i>Factor de seguridad cargas V+M+Ab</i>	103
Figura 70 <i>Suelda de la estructura</i>	104
Figura 71 <i>Muestra de soldadura para ensayos no destructivos</i>	105

Figura 72 <i>Muestra de soldadura una vez aplicado penetrante</i>	106
Figura 73 <i>Muestra de soldadura una vez aplicado revelador</i>	106
Figura 74 <i>Muestra de soldadura con marcas de discontinuidad reveladas</i>	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Características de tubos estructurales bajo la norma ASTM A500</i>	40
Tabla 2 <i>Especificaciones de materiales</i>	41
Tabla 3 <i>Datos para el cálculo de Carga de giro</i>	44
Tabla 4 <i>Método de examinación en relación con el tipo de juntas</i>	58
Tabla 5 <i>Método de examinación en relación con las discontinuidades</i>	59
Tabla 6 <i>Resumen por aplicación y talla</i>	76
Tabla 7 <i>Datos mecánicos de tubo seleccionado</i>	77
Tabla 8 <i>Cargas muertas</i>	77
Tabla 9 <i>Recursos Humanos</i>	109
Tabla 10 <i>Recursos Tecnológicos</i>	110
Tabla 11 <i>Recursos Materiales</i>	110
Tabla 12 <i>Presupuesto</i>	111

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Cargas muertas del vehículo</i>	42
Ecuación 2 <i>Cargas vivas de la estructura</i>	42
Ecuación 3 <i>Masa total</i>	43
Ecuación 4 <i>Desaceleración media del vehículo</i>	43
Ecuación 5 <i>Carga de frenado</i>	43
Ecuación 6 <i>Carga de aceleración brusca</i>	43
Ecuación 7 <i>Carga de giro</i>	44

Resumen

En el presente proyecto de investigación se realizó el diseño y construcción de la estructura tubular de un prototipo tipo "Tumbler". Para empezar con el modelado se tomó como referencia algunos parámetros existentes en la normativa SAE, que especifica características de dimensionamiento de estructuras de vehículos de esta competición. El primer paso del proyecto fue el modelado en el software CAD posteriormente la selección del tubo, en donde la normativa FIA específicamente en el anexo J, define dimensiones del perfil que se utilizan en armazones de seguridad según la aplicación que vaya a tener el tubo, y se la asignó en el modelado de la estructura, a su vez se investigó acerca de la disponibilidad del perfil en el mercado ecuatoriano, estableciendo así que se trabaja con tubos bajo la normativa de fabricación ASTM A500 de grado A, que, especifica las características del tubo, y el material, que se trata de un acero A53. Las propiedades físicas y de diseño del material fueron añadidas al perfil modelado, para realizar el estudio de elementos finitos, para el cual se calcularon las cargas a las que va a estar sometida la estructura, detalladas en la normativa NTE INEN 1323. Se aplicaron las cargas en la estructura modelada, para el estudio de elementos finitos en el software CAE, donde se estudiaron tres parámetros de diseño que fueron el criterio de Von Mises, desplazamiento y factor de diseño, donde se obtuvieron resultados satisfactorios. Al comprobar la seguridad de la estructura del prototipo, se procedió a la construcción de este, en el que se siguió un procedimiento específico. Para comprobar que las uniones soldadas brinden la seguridad esperada se realizaron dos ensayos no destructivos a la soldadura, los cuales fueron inspección visual y de líquidos penetrantes, dando resultados favorables para el proyecto.

Palabras Clave: estructura tubular, prototipo tipo "Tumbler", ASTM A500, SAE.

Abstract

In this research project, the design and construction of the tubular structure of a "Tumbler" type prototype was carried out. To begin with the modeling, some parameters existing in the SAE regulations were taken as reference, which specifies dimensioning characteristics of vehicle structures for this competition. The first step of the project was the modeling in CAD software, subsequently the selection of the tube, where the FIA regulations specifically in Annex J, defines the dimensions of the profile used in safety frames according to the application that the tube will have, and it was assigned in the modeling of the structure. In turn, research was carried out on the availability of the profile in the Ecuadorian market, establishing that it works with tubes under the ASTM A500 manufacturing standard of grade A, which specifies the characteristics of the tube, and the material, which is an A53 steel. The physical and design properties of the material were added to the modeled profile, to carry out the finite element study, for which the loads to which the structure will be subjected were calculated, detailed in the NTE INEN 1323 standard. The loads were applied to the modeled structure, for the finite element study in the CAE software, where three design parameters were studied: the Von Mises criterion, displacement and design factor, where satisfactory results were obtained. After verifying the safety of the prototype structure, the construction of the prototype was proceeded, following a specific procedure. To verify that the welded joints provide the expected safety, two non-destructive tests were carried out on the weld, which were visual and liquid penetrant inspection, giving favorable results for the project.

Keywords: tubular structure, prototype "Tumbler", ASTM A500, SAE.

Capítulo I

Planteamiento del problema de investigación

Antecedentes

La Ingeniería Automotriz es una disciplina que abarca una amplia gama de campos, uno de los más destacados es el diseño y construcción de vehículos automotores. Este campo es muy importante por su impacto directo en la eficiencia, seguridad y rendimiento de los vehículos.

En este contexto, el propósito de nuestro proyecto es diseñar y construir un vehículo prototipo tipo "Tumbler". La ejecución del proyecto no solo nos permitirá desarrollar y perfeccionar nuestras habilidades en el diseño y construcción de la estructura del prototipo, sino que también nos brindará la oportunidad de aplicar un correcto análisis para la selección del perfil estructural tubular y el uso de programas CAD y CAE, herramientas esenciales en el campo de la ingeniería automotriz.

Además, este proyecto tiene como objetivo explorar un mercado distinto y más profundo, como es la construcción de vehículos de exhibición. Este tipo de vehículos, diseñados para generar un impacto visual significativo, representan una oportunidad única para demostrar las capacidades técnicas y creativas en el diseño y construcción.

Un componente crítico en la construcción de cualquier vehículo es el bastidor, o en este caso la estructura. Este componente, construido usando perfiles tubulares por su resistencia, durabilidad y capacidad para soportar cargas dinámicas y estáticas, es crucial en la integridad estructural y el rendimiento de los vehículos.

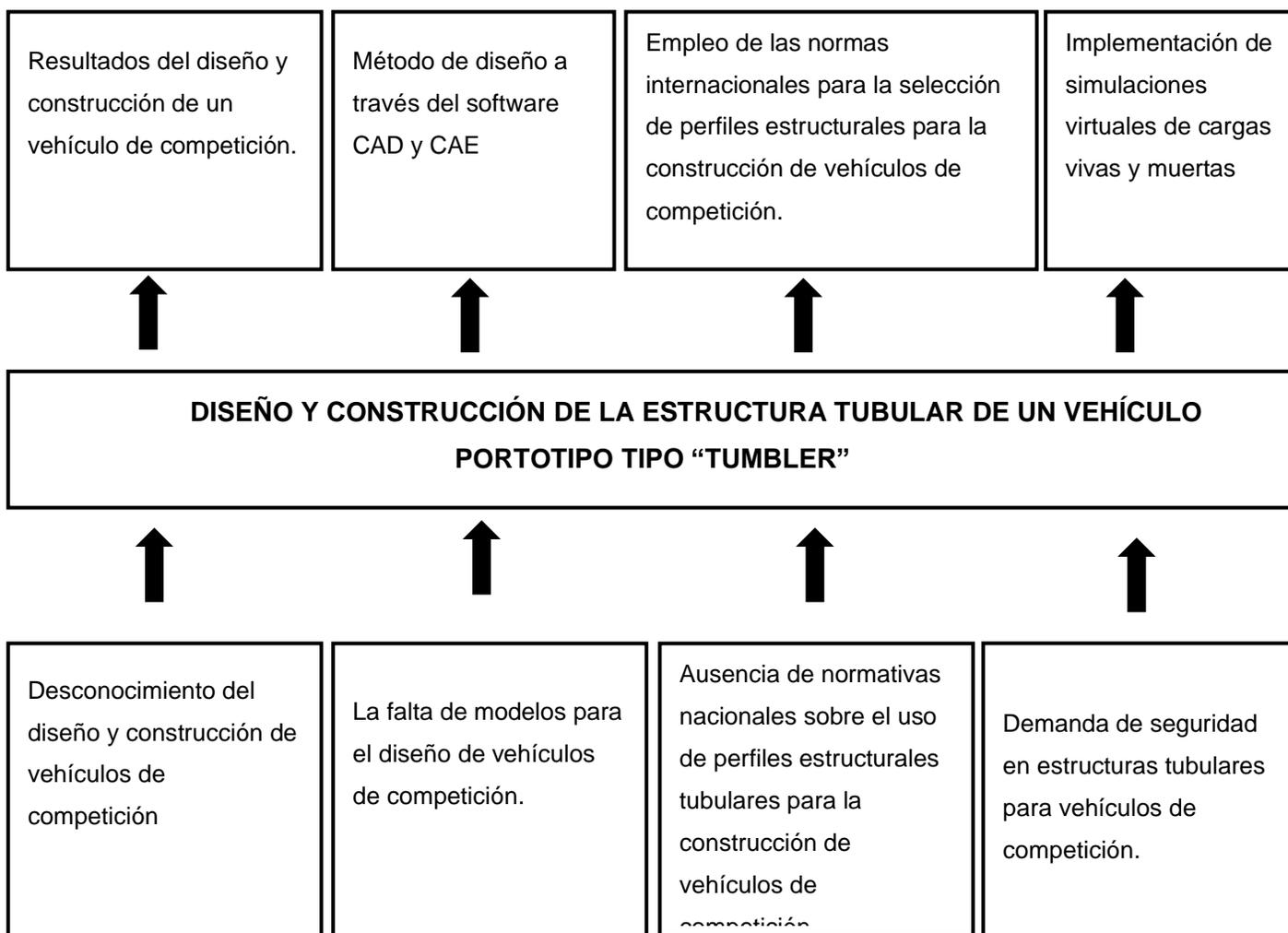
El diseño y dimensionamiento adecuados de estos perfiles tubulares son esenciales para garantizar la seguridad de los ocupantes del vehículo. Además, un diseño eficiente puede optimizar el uso del espacio dentro del chasis, lo que puede tener un impacto significativo en la comodidad y funcionalidad del vehículo.

Las estructuras automotrices están sometidos a diversas cargas durante el funcionamiento normal. Estas cargas incluyen las fuerzas transmitidas por las ruedas durante la conducción, las tensiones generadas por impactos y colisiones, así como las cargas dinámicas inducidas por las irregularidades del terreno. Por tanto, es esencial que los bastidores puedan soportar estas cargas sin comprometer la integridad estructural del vehículo.

Planteamiento del problema

Figura 1

Árbol de problemas



Nota. Árbol de problemas sobre el diseño y construcción de la estructura tubular del vehículo prototipo tipo "Tumbler".

A lo largo de la historia la evolución de los vehículos automotores ha dependido de la utilización y demanda que la sociedad ha tenido sobre estos. El desarrollo de los modelos e implementación de sistemas; es seguido y aplicado con gran rapidez gracias a la ayuda de software CAD y CAE que permiten realizar diseños futuristas que ayudan a tener una visualización de diferentes modelos los cuales no se encuentran en el mercado, dando así una necesidad de crearlos para la exposición de estos, por eso la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" Sede Latacunga ha realizado diferentes modelos los cuales se han destacado por su funcionalidad operativa, sin embargo el impacto que generan los vehículos de exposición no ha sido priorizado, por ende es importante utilizar herramientas que permiten la mejora del diseño y confiabilidad de estos automóviles.

Descripción detallada del proyecto

Se seleccionó un perfil estructural existente en el mercado nacional a través de una consulta bibliográfica, acerca de las propiedades y características que debía presentar el mismo, tomando en cuenta los parámetros presentados para la construcción de vehículos de competición con este tipo de estructura en normativas internacionales.

Se modeló la estructura del vehículo prototipo tipo "Tumbler" en un software CAD y CAE, en el cual se integró el perfil seleccionado, para obtener un diseño que brinde seguridad, mismo que fue probado mediante el análisis de elementos finitos, los cuales nos corroboraron que el modelo de estructura es eficiente y seguro.

Se seleccionó el tipo de soldadura adecuado para el material de nuestro perfil estructural tubular, mediante una investigación bibliográfica en la cual se tomaban en cuenta los tipos de soldadura, la resistencia de esta y las propiedades de los diversos materiales, la elección de la soldadura fue crucial para garantizar la integridad estructural del vehículo, resistencia a vibraciones y durabilidad.

Se construyó el prototipo siguiendo rigurosamente el diseño desarrollado, con especial atención a los detalles y tolerancias específicas, aplicando los procesos requeridos para la fabricación de la estructura vehicular.

Se realizaron inspecciones visuales en la soldadura aplicada en la estructura vehicular, así como la prueba de líquidos penetrantes los cuales verificaron la integridad obtenida en la estructura. Estos procedimientos garantizaron que cada soldadura cumpliera con los estándares, asegurando la seguridad del vehículo.

Justificación e importancia

El diseño de una estructura de un vehículo prototipo tipo “Tumbler”, implica dimensionar y seleccionar cuidadosamente los componentes estructurales que componen la estructura del vehículo para que el diseño se ajuste al prototipo.

Se debe realizar un análisis detallado de las especificaciones técnicas de los materiales y componentes que se ocuparan en la construcción de la estructura del prototipo para asegurarse de que cumplan con los requisitos de resistencia y durabilidad necesario para operar de manera segura.

El vehículo tiene como funcionalidad ser de exhibiciones, pero debe poseer un alto rendimiento en la estructura debido a que debe ser capaz de soportar de manera eficiente las demandas estructurales que conlleva el uso de este. Esto implica evaluar y ajustar el diseño del chasis para garantizar su robustez y seguridad.

La importancia del diseño y construcción de la estructura del prototipo tipo “Tumbler” es el impacto visual que generaran para que obtenga el atractivo debido para que se considere una pieza de exhibición.

La funcionalidad del prototipo tipo “Tumbler” principalmente es para la exhibición por ende la estructura debe ser completamente funcional, que proporcione la estabilidad y seguridad necesarias.

Alcance

En el proceso de desarrollo de la estructura, se llevará a cabo una selección meticulosa del perfil que se utilizará como base estructural. Este procedimiento comprenderá una fase de investigación exhaustiva, evaluación de características estructurales y consideración de la ergonomía necesaria para el chasis. La implementación seguirá las especificaciones de diseño preestablecidas y los procedimientos definidos, asegurando la construcción de la estructura con soluciones aplicadas y verificaciones para garantizar su funcionalidad estructural y la seguridad inherente.

Posteriormente, se llevará a cabo una comprobación detallada de la estructura en funcionamiento, con el objetivo de recopilar datos y corregir posibles defectos, asegurando así su correcto desempeño estructural.

Un aspecto clave del diseño será la versatilidad de la estructura, que se planificará de manera que pueda adaptarse a diversas aplicaciones, con un enfoque particular en su funcionalidad en el ámbito de la exhibición y presentación. Este enfoque holístico, desde la selección hasta la versatilidad, garantizará la excelencia en el diseño y el rendimiento del chasis en distintos contextos.

Objetivos del proyecto

Objetivo General

Diseñar y construir la estructura vehicular del prototipo tipo “Tumbler” a partir de la selección del perfil estructural tubular.

Objetivos específicos

- Seleccionar un perfil tubular adecuado para la estructura vehicular del prototipo tipo “Tumbler”, considerando la disponibilidad dimensional en el mercado ecuatoriano, con el propósito de proporcionar seguridad y funcionamiento del vehículo.

- Diseñar mediante un software CAD y CAE la estructura vehicular del prototipo, con el fin de obtener una representación detallada y precisa, para realizar un análisis de elementos finitos, asegurando un diseño eficiente y seguro.
- Construir la estructura vehicular del prototipo a partir de la selección de la soldadura adecuada para el ensamblaje del perfil estructural tubular, con el fin de realizar una inspección visual y la prueba de líquidos penetrantes a la misma, cumpliendo así los estándares de seguridad y rendimiento.

Metas

- Desarrollar conceptos de diseño para la estructura del prototipo, considerando distribuciones de peso, cargas vivas y cargas muertas.
- Seleccionar un perfil estructural tubular óptimo para la estructura, considerando sus propiedades mecánicas, formas de sección transversal y los materiales disponibles del mercado.
- Obtener una estructura de perfil estructural tubular funcional y segura para el vehículo prototipo tipo "Tumbler".

Hipótesis

La implementación de normativas específicas para la selección de perfiles estructurales tubulares y la construcción de vehículos de competencias contribuirá significativamente a la eficiencia y efectividad en la construcción vehículo prototipo tipo "Tumbler".

Variables de investigación

Variables dependientes

- Resistencia estructural
- Peso total del prototipo

Variable independiente

- Implementación de normativas específicas

Metodología de desarrollo del proyecto

Método documental-bibliográfico

El uso de fuentes bibliográficas facilitará el acceso a información acerca de las normativas de construcción de vehículos de competición, que brindarán parámetros referenciales para la selección del perfil, el diseño y la construcción de las estructuras vehiculares de los mismos.

Método experimental

Admite dilucidar los datos e información que brindará el software CAD y CAE en base al diseño para el análisis de elementos finitos de cargas vivas y cargas muertas de la estructura.

Metodología de investigación

La metodología de investigación empleada se basa en enfoques científicos y contempla diferentes etapas, desde la revisión de literatura relacionada con perfiles estructurales tubulares, diseño de estructuras vehiculares y tipos de soldadura hasta la definición de parámetros óptimos para el funcionamiento integral de la estructura.

Método analítico

En la presente indagación se analizará parámetros presentes en perfiles estructurales tubulares y de soldadura, que puedan ser sometidas a ensayos para verificar la calidad del material y la integridad de las uniones soldadas.

Método sintético

Se presentará información recopilada sobre la selección del perfil estructural tubular y el material, además se comprenderá los procesos de corte y doblado de los tubos para obtener un buen desempeño de la construcción.

Capítulo II

Fundamento teórico

Chasis

Es fácil confundir entre chasis y carrocería, en cuanto al primero mencionado es la estructura que sirve de soporte para los diferentes componentes mecánicos presentes en el automóvil, aportando rigidez y forma al vehículo.

El chasis está fabricado con piezas de acero unidas por soldadura. Su misión es la soportar el motor, la carrocería y otros elementos. (Crouse, 1996).

Tomando en cuenta lo dicho por Crouse, para la construcción de un chasis se pueden emplear distintos materiales, lo cual es permitido por distintas normativas de vehículos de competición, la selección de estos es muy importante para definir el tipo de chasis que se vaya a utilizar o diseñar.

Tipos de chasis

En los vehículos de competencia que son los que servirán como ejemplo para el diseño de este prototipo existen tres tipos de chasis que son los más comunes, a los cuales se los denomina de la siguiente manera: el chasis híbrido, chasis monocasco y chasis tubular.

Chasis monocasco

El chasis monocasco está constituido de un material compuesto en el cual interviene el empleo de fibras de carbono en conjunto con fibras de kevlar o honeycomb de kevlar. El chasis monocasco de fibra de carbono es una superficie continua de láminas encargadas de absorber y resistir los esfuerzos. Este diseño permite el desarrollo de un chasis extremadamente rápido y ligero. (Alvarez Salazar, 2018).

Figura 2

Chasis monocasco de fibra de carbono



Nota. La figura muestra el primer chasis monocasco de fibra de carbono fabricado por McLaren. Tomado de (Álvarez, 2016).

Chasis tubular

Consiste en una estructura de tubos huecos soldados entre sí distribuidos en el espacio de forma que sean capaces de soportar las masas suspendidas del vehículo, así como de proteger al piloto en caso de accidente. Este tipo de chasis es el más sencillo de fabricar, pero generalmente es más pesado que el tipo monocasco. Otra ventaja que tiene es la fácil accesibilidad debido al espacio entre tubos, aunque las rigideces conseguidas son normalmente inferiores (Redondo, 2017).

Consiste en una estructura de tubos huecos soldados entre sí distribuidos en el espacio de forma que sean capaces de soportar las masas suspendidas del vehículo, así como de proteger al piloto en caso de accidente. Este tipo de chasis es el más sencillo de fabricar, pero generalmente es más pesado que el tipo monocasco. Otra ventaja que tiene es la fácil accesibilidad debido al espacio entre tubos, aunque las rigideces conseguidas son normalmente inferiores (Redondo, 2017).

Consiste en una estructura de tubos huecos soldados entre sí distribuidos en el espacio de forma que sean capaces de soportar las masas suspendidas del vehículo, así como de proteger al piloto en caso de accidente. Este tipo de chasis es el más sencillo de fabricar, pero generalmente es más pesado que el tipo monocasco. Otra ventaja que tiene es la fácil accesibilidad debido al espacio entre tubos, aunque las rigideces conseguidas son normalmente inferiores (Redondo, 2017).

Figura 3

Chasis tubular



Nota. Chasis tubular para raid tipo baja. Tomado de (DOCTOR, 2014).

A pesar de ser un tipo de chasis más pesado que el monocasco, este es mayormente utilizado en vehículos de competencia, debido a que su peso compensa con la seguridad que puede brindar al conductor, si bien en las competencias lo esencial es la reducción del peso del automóvil, la seguridad del conductor es un factor muy importante que está en juego en este tipo de situaciones.

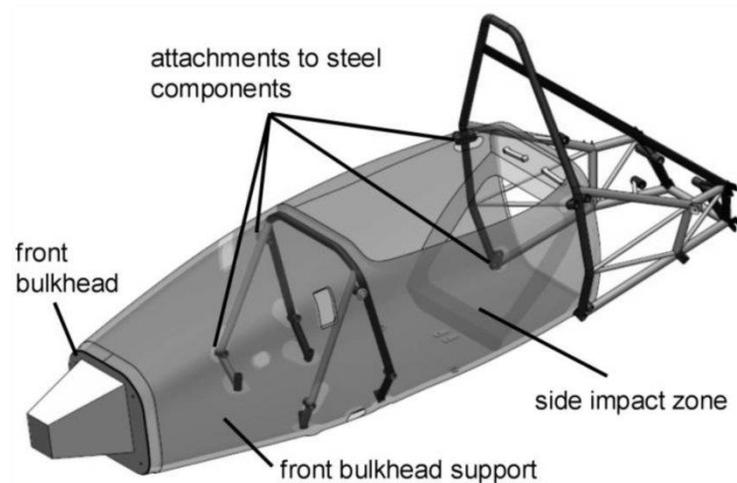
Chasis híbrido

Esto significa que el diseño podría tener partes monocasco y partes tubulares. Muchos equipos escogen esta opción ya que aporta ventajas de un tipo y de otro. Por ejemplo, disminuye muy fuertemente la dificultad de trabajo de la fibra al efectuarse solo en una zona del vehículo y permite una buena accesibilidad a la parte trasera del coche en caso de un vehículo

con delantera monocasco y trasera tubular, características interesantes pues esta zona es donde se encuentra la transmisión y otros elementos que deben ser fácilmente accesibles. (Redondo, 2017)

Figura 4

Chasis híbrido



Nota. Estructura híbrida de un Fórmula SAE. Tomado de (Josyce, Hamilton, Forero, & McDonald, 2013)

Normativas

Existen varias normativas que delimitan los criterios importantes que se enfocan en el desarrollo del chasis tubular, una de estas normativas que da a conocer de forma precisa la construcción de vehículos de competencia es la Formula SAE; además, de enfocarse al diseño del chasis tubular, menciona la reglamentación que deben cumplir los miembros estructurales.

Fórmula SAE

La competición Fórmula SAE, que se originó en Estados Unidos en 1982 con el respaldo de la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE), establece pautas específicas para el diseño de vehículos tipo fórmula, con el objetivo fundamental de involucrar a estudiantes universitarios de todo el mundo en un desafiante proceso de desarrollo. Estas

pautas abarcan diversos aspectos del diseño y construcción del prototipo, simulando así una situación real en la que los ingenieros son contratados por una empresa de competición.

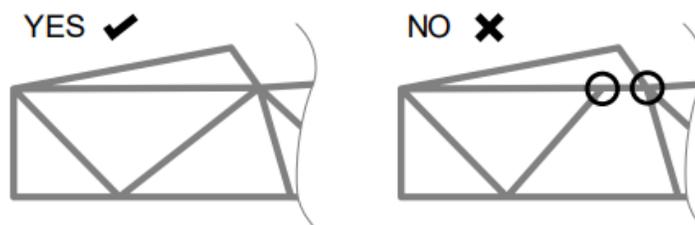
En el contexto del diseño, los participantes de la Fórmula SAE deben cumplir con criterios rigurosos que abarcan desde la aerodinámica hasta la eficiencia del chasis y la utilización de materiales específicos. La fórmula SAE tiene como objetivo evaluar el proceso de diseño del vehículo de competición. Se dispone de varias pruebas como: costos y fabricación, inspección técnica, presentación y diseño. Estas pruebas ayudan analizar la fiabilidad de los vehículos que se construyen siguiendo esta normativa, además tiene algunas pruebas de aceleración, skid pad, autocroos, eficiencia y endurance.

Los requerimientos estructurales serán tomados como guía para la construcción del vehículo prototipo tipo “Tumbler” a partir de la normativa de la Formula SAE reglas del 2022 versión 1.0 publicada el 20 de agosto del 2021. Tomando en cuenta que algunos de los requerimientos serán omitidos debido a que el fin del diseño y la construcción del prototipo no es el de competir.

Triangulación. La Formula SAE, establece pautas claras para la triangulación, que hace referencia a formar patrones geométricos en la estructura que ayuda a la rigidez y minimiza el peso innecesario.

Figura 5

Triangulación

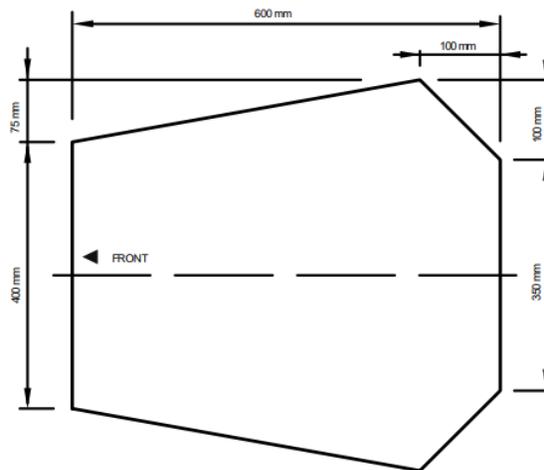


Nota. La figura izquierda muestra la forma correcta para la triangulación, y la de la derecha la forma incorrecta. Tomado de (SAE INTERNACIONAL , 2021)

Cabina. La cabina desempeña un papel crítico en la seguridad y experiencia de los ocupantes, por ende, el diseño de este se debe guiar de la Fórmula SAE que especifica las dimensiones adecuadas o las más recomendadas para la cabina.

Figura 6

Espacio de cabina

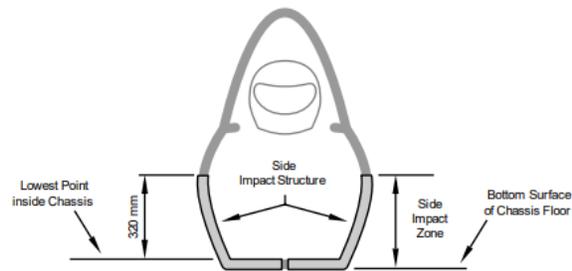


Nota. La figura muestra las medidas recomendadas para la cabina. Tomado de (SAE INTERNACIONAL , 2021)

Estructura de impacto lateral. La seguridad de los prototipos es un tema de importancia. Los impactos laterales son las más comunes y esto le hace que sea un aspecto crítico en el diseño. Para asegurar la máxima protección se debe guiar u orientarse en normativas de regulen la estructura de impacto lateral.

Figura 7

Estructura de impacto lateral



Nota. La figura muestra las medidas recomendadas de la estructura lateral. Tomado de (SAE INTERNACIONAL , 2021)

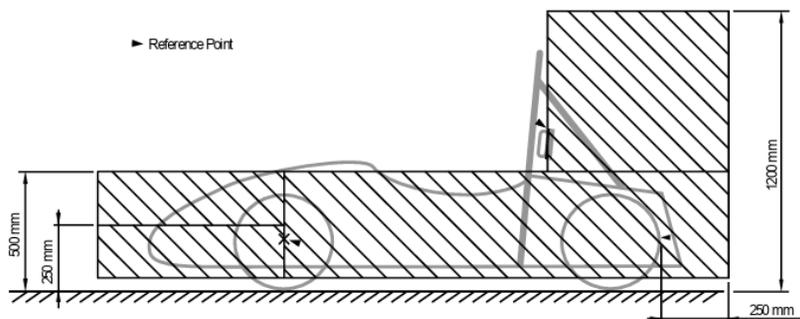
Carrocería y condición. El prototipo debe tener las ruedas descubiertas y el cockpit (lugar donde se ubica el piloto en un vehículo de competición) abierto. Tomando en cuenta que en los 180° superiores de los neumáticos no deben tener ningún recubrimiento ni obstrucción al momento en el que se vea verticalmente por encima de la rueda.

Distancia entre ejes. En la normativa se especifica un número mínimo de distancia entre ejes, la cual indica el trecho que existe entre el centro del punto de contacto de los neumáticos, delanteros y posteriores, siendo no menor que 1525mm.

Distancia al suelo. La distancia al suelo debe ser suficientemente alto para evitar que cualquier parte del vehículo golpee con la calzada, la normativa menciona que la altura de los cubos no debe ser superior a 250 mm por encima del suelo, además la parte delantera del plano del reposacabezas no debe estar a más de 500 mm del suelo. (SAE INTERNACIONAL , 2021).

Figura 8

Distancia al suelo

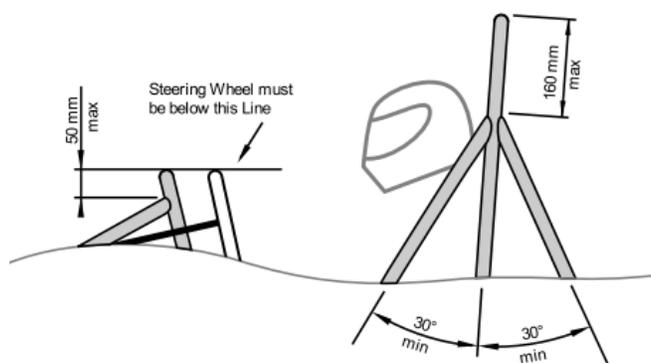


Nota. Dimensiones recomendadas referentes a las dimensiones de la distancia al suelo con los componentes. Tomado de (SAE INTERNACIONAL , 2021)

Protección antivuelco. El chasis debe incluir una barra antivuelco, esta debe tener la posición lateral o justo detrás del torso del conductor, adicionalmente una barra antivuelco que se encuentra situada en la parte delantera del piloto, justo situada por encima de las piernas ubicada próxima al volante.

Figura 9

Protección antivuelco



Nota. Reglamento de arco delantero y arco principal establecido en la FSAE 2022. Tomado de (SAE INTERNACIONAL , 2021).

En la Figura 9 se puede apreciar los dos arcos esenciales que brindaran la seguridad necesaria de la estructura del vehículo prototipo tipo “Tumbler”, detrás de la ilustración del casco está ubicada el arco principal, que va a ser el que va a brindar protección a la cabeza del conductor en caso de vuelco, y por delante del volante se ubica el arco delantero, el mismo que previene el rose o golpe de las extremidades superiores del piloto.

Arco delantero. Este arco debe estar construido con una triangulación propia y adecuada, también se puede incluir más de un perfil estructural tubular, tomando en cuenta que este debe tener la extensión desde los componentes más bajos de ambos lados de la estructura.

Para cumplir con este requerimiento también es importante tomar en cuenta que el arco no puede ser más bajo que la parte superior del volante del conductor, por seguridad del conductor el mismo no puede estar separado más de 250mm por delante del volante.

Arco principal. El arco principal debe estar constituido por una sola pieza continua de perfil estructural tubular, al igual que el arco delantero debe tener una extensión desde el miembro más bajo de un lado hacia el otro, desde la vista frontal del vehículo, los componentes que se encuentren verticales la normativa específica que, deben tener un mínimo de 380 mm de separación de donde el arco principal está unido a los tubos inferiores de la estructura mayor del chasis.

ASTM A500

El acero A500 de la ASTM es ampliamente empleado en aplicaciones estructurales y abarca tuberías de acero al carbono soldadas y sin costura conformadas en frío, destinadas a propósitos constructivos. Dentro de la clasificación A500, el Grado A se destaca como el nivel más básico y comúnmente utilizado en aplicaciones estructurales. Este grado ofrece notables características de soldabilidad y formabilidad, además de poseer propiedades de resistencia

excepcionales. No solo es idóneo para condiciones ambientales estándar, sino que también demuestra ser adecuado para situaciones de alta temperatura.

El Grado A de ASTM A500 es particularmente apreciado por sus propiedades versátiles, lo que lo convierte en la elección preferida para diversas aplicaciones estructurales. Además de su rendimiento en términos de fabricación y resistencia, este grado de acero también exhibe una notable capacidad para adaptarse a entornos de temperaturas elevadas, aumentando su versatilidad. En resumen, el Grado A de ASTM A500 se destaca como una opción confiable y eficiente en el diseño y construcción de estructuras diversas. (ASTM INTERNATIONAL, 2019).

Tabla 1

Características de tubos estructurales bajo la norma ASTM A500

Tubos estructurales bajo ASTM A 500	
Grado	Grado A
Resistencia a la tracción (MPa)	310
Límite elástico (MPa)	228
Densidad (kg/m ³)	7800
Elongación máxima (mm)	54.8

Nota. Se especifican características mecánicas de tubos estructurales que cumplen con la normativa ASTM A500 de grado A. Recuperado de (Union Steel Industry, 2023).

FIA

La federación internacional del automóvil o FIA, es la institución que establece parámetros para el desarrollo de competiciones de automovilismo, esta organización es la encargada de regular las medias que deben tener los circuitos, automóviles y los pilotos. (FIA, 2012)

Especificaciones de los materiales. Al seleccionar el acero, debe prestarse atención a la obtención de buenas propiedades de elongación y adecuadas características de soldabilidad.

El curvado del tubo debe hacerse en frío con un radio de curvatura (medido en el eje del tubo) de, al menos, tres veces el diámetro del tubo.

Tabla 2

Especificaciones de materiales

Material	Resistencia mínima a la tracción	Dimensiones mínimas (mm)	Utilización
Acero al carbono no aleado conformado en frío conteniendo un máximo de 0.3% de carbono	350 N/mm^2	42 x 2,5 (1,75" x 0,095") o 50 x 2,2 (2,0 "x 0,083") 38 x 2,5 (2.0" x 0,0095") o 40 x 2,0 (1,6"x0,0382")	Arco principal arco laterales y tirantes transversales Semiarcos laterales y otras partes de la estructura de seguridad

Nota. Tablas de diámetros recomendados para la estructura. Recuperado de (FIA, 2012)

INEN

La INEN es el Instituto Ecuatoriano de normalización, en donde su principal objetivo es el reconocimiento de fabricación mediante un sistema que puntúa la calidad y establece los requerimientos en cada normativa de referencia

NTE INEN 1323: Vehículos automotores. Carrocerías de buses.

Carga muerta. El término de cargas muertas hace referencia al peso constante que la estructura debe soportar en condiciones estáticas, el mismo que viene determinado por los componentes fijos del vehículo, así como el mismo peso del chasis.

Las cargas muertas se calcularán sumando las masas de todos los componentes fijos del automóvil incluyendo el chasis y multiplicándolos por el valor nominal de la gravedad.

Ecuación 1

Cargas muertas del vehículo

$$M = m_t \cdot 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

Donde:

- M = Cargas muertas [N]
- m_t = Masa total de los componentes fijos [kg]

Carga viva. Las cargas vivas hacen referencia al peso que aportan los pasajeros a la estructura, la ecuación para el cálculo de esta carga viene dada por el factor entre la masa de las personas y el valor nominal de la gravedad, establecida con un valor nominal de 70kg.

Ecuación 2

Cargas vivas de la estructura

$$V = m_p \cdot 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

Donde:

- V = Cargas vivas [N]
- m_p = Masa total de los ocupantes [kg]

Carga de frenado. La carga de frenado es crucial para al diseño y análisis de las estructuras vehiculares, hace referencia a la fuerza ejercida por un vehículo al reducir su velocidad o detenerse por completo, durante el frenado se generan fuerzas que actúan en sentido contrario al movimiento del vehículo, y estas se transmiten al chasis.

Ecuación 3*Masa total*

$$m_T = m_p + m_t$$

Donde:

- m_T = Masa total de las cargas vivas y muertas [kg]

Ecuación 4*Desaceleración media del vehículo*

$$dm = \frac{v^2}{2 \cdot s}$$

Donde:

- v = Velocidad del vehículo [m/s²]
- s = Distancia de frenado [m]

Ecuación 5*Carga de frenado*

$$F = m_T * dm$$

Donde:

- dm = desaceleración media [m/s²]
- F = Carga de frenado [N]

Carga de aceleración brusca. Esta carga se mide bajo el mismo criterio que el de carga de frenado son la particularidad de que calcula en sentido contrario

Ecuación 6*Carga de aceleración brusca*

$$Ab = -F$$

Donde:

- A_b = Carga de aceleración brusca [N]

Carga de giro. Debe calcularse en función de la fuerza centrífuga que se genera al ingresar el vehículo en una curva de determinado giro y a cierta velocidad. La velocidad crítica deberá ser considerada de al menos 90 km/h.

El cálculo de esta carga viene dado por la siguiente ecuación:

Ecuación 7

Carga de giro

$$G = m_T \cdot \frac{v^2}{r} + m_T \cdot 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \cdot \text{Sen}(\alpha_{\text{peralte}})$$

Donde:

- G = Carga de giro [N]
- r = Radio de curvatura de la carretera [m]
- α_{peralte} = Ángulo de peralte [°]

Tabla 3

Datos para el cálculo de Carga de giro

Velocidad (del vehículo) (km/h)	Radio de curvatura de la carretera (m)	Peralte (%)
80	250	8
85	300	
90	350	
95	400	
100	450	
105	500	

Velocidad (del vehículo) (km/h)	Radio de curvatura de la carretera (m)	Peralte (%)
110	550	
115	600	
120	700	
125	800	7.51
130	900	6.97
135	1050	6.25
140	1250	5.49
145	1475	4.84
150	1725	4.29

Nota. Velocidad, radios mínimos y peraltes en carretera. Tomado de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

Combinación de cargas básicas. Las estructuras deben ser diseñadas para resistir los esfuerzos a diferentes condiciones, se determina mediante las siguientes combinaciones de carga básicas (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009).

Según el método ASD

1. M
2. M+V
3. M+V+G
4. M+V+F
5. M+V+Ab

Donde

M: Cargas muertas

V: Cargas vías

F: Fuerza de frenado

Ab: Aceleración brusca

G: Fuerza de giro

Procesos de corte de tubos

Corte abrasivo

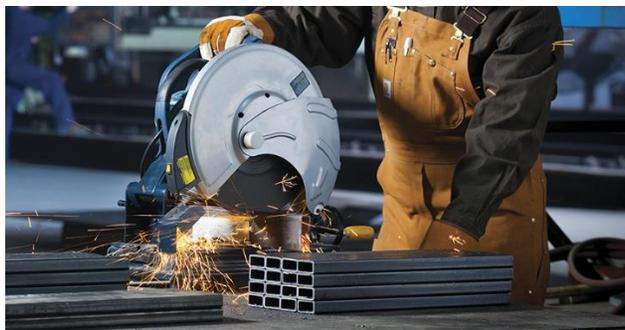
El aserrado abrasivo se presenta como un método manual y fundamental para realizar cortes personalizados en productos de diversas aleaciones. Este proceso implica el uso de una sierra abrasiva con una cuchilla circular o rueda de composición de resina, ya sea en condiciones mojadas o secas.

Las capacidades de corte varían según la máquina, algunas pudiendo manejar rondas sólidas de hasta 4 pulgadas de diámetro exterior. Este método es apropiado para aplicaciones de carga manual y pequeñas ejecuciones de productos que no exigen condiciones finales críticas.

A pesar de su facilidad de uso y mínima necesidad de configuración, la sierra abrasiva no logra proporcionar cortes cuadrados ni tolerancias ajustadas debido a su proceso de corte o abrasión. No es eficiente para materiales con paredes gruesas.

Figura 10

Corte abrasivo



Nota. Corte de tubos por el método abrasivo. Tomado de (ABRACOM, 2016)

Corte de sierra de banda

El corte mediante sierra de cinta representa un proceso totalmente automatizado y es la técnica más prevalente para cortar varillas, barras, tuberías y tubos, especialmente eficaz en situaciones de alto volumen. La cuchilla utilizada es una banda continua de metal que gira alrededor de dos ruedas, ofreciendo diversas configuraciones de dientes. La orientación de la cuchilla puede ser horizontal o vertical, dependiendo del diseño del modelo, con cada configuración presentando ventajas específicas para productos o aplicaciones particulares.

El corte por sierra de cinta demuestra ser un enfoque efectivo para cortar diversas formas, como cuadrados, rectángulos, canales, vigas I y extrusiones. A pesar de las numerosas ventajas del corte por sierra de cinta, no resulta eficiente para productos con paredes delgadas. Además, este método produce rebabas y no alcanza tolerancias ajustadas en los cortes realizados.

Figura 11

Corte de sierra de banda



Nota. Corte de tubos por el método sierra de banda. Tomado de (THE FABRICATOR , 2016)

Aserrado en frío

El aserrado en frío de alta precisión es una opción adecuada para cortar materiales de menor diámetro o paredes delgadas que demandan tolerancias ajustadas. Este método utiliza una sierra circular fría equipada con una cuchilla y un fluido de corte, generalmente aplicado

mediante un lubricante en forma de neblina. Aunque algunas unidades pueden manejar tubos redondos de hasta 3.5 pulgadas y superficies redondas de hasta 2 pulgadas, su eficacia es mayor en productos con un diámetro externo máximo de 1.75 pulgadas.

Figura 12

Corte con aserrado en frío



Nota. Corte de tubos por el método aserrado en frío. Tomado de (Truckly, 2010)

Proceso de doblado de tubos

Los tubos pueden unirse y obtener varios ángulos entre sí, por eso el doblado es una técnica que utiliza varias técnicas que evitan el colapso y la distorsión. Existen herramientas cuya función es doblar tubos puede ser una herramienta compleja accionada por sistemas hidráulicos o hasta una herramienta manual. (Eulogio Santos De la Cruz, 2010). Para realizar un correcto doblado de tubos hay que tener varios puntos como:

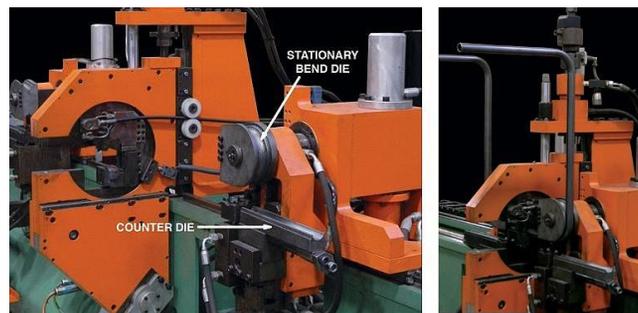
- Radio de curvatura que se refiere al radio mínimo de curvado.
- Ductilidad del material: Es la propiedad mecánica que se refiere a la capacidad de deformación que un material soporta sin romperse
- Elongación: Se refiere al porcentaje de alargamiento, es decir la distancia máxima que se estira un material sin romperse.

Doblado por comprensión

En el proceso de doblado de tubos por comprensión, una máquina dobladora utiliza un contra dado para aplicar fuerza y doblar el material alrededor de un dado de doblez estacionario. Es esencial que el radio del dado coincida con el radio deseado para la pieza. A diferencia de otros métodos, este enfoque no requiere la inserción de un mandril en el tubo, lo que puede comprometer la redondez y limitar la capacidad para doblar radios estrechos.

Figura 13

Doblado por comprensión



Nota. Máquina dobladora de tubos por comprensión. Tomado de (Webmaster, 2019)

Doblado por arrastre y con mandril

El doblado por arrastre se destaca como el método más común y versátil para crear dobleces de alta calidad, especialmente adecuado para radios estrechos de hasta 1 o 2 veces el diámetro exterior de la pieza de trabajo. Es reconocido por su precisión excepcional.

Este método es único por ser el único capaz de realizar doblado con mandril. Al emplear un mandril, una herramienta de metal sólido insertada en el tubo antes del doblado, se brinda soporte interno crucial. El mandril previene defectos como rizado, aplanado y colapso del tubo, ofreciendo un control máximo para mantener la redondez del tubo, especialmente en tubos de pared delgada. Además, posibilita la obtención de radio de curvatura más estrechos. Este enfoque es esencial para garantizar la calidad y precisión en aplicaciones que requieren control detallado sobre la forma y la integridad del tubo.

Figura 14

Doblado por arrastre y con mandril

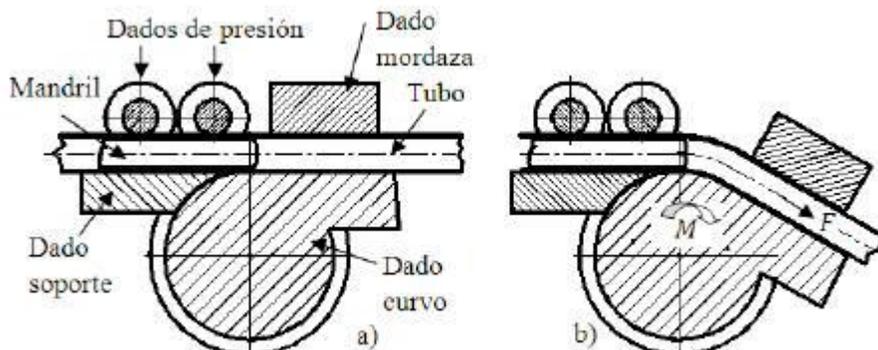


Figura 1. Herramientas que intervienen en doblado de tubos por arrastre. Fuente: Strano [1].

Nota. Diagrama de proceso de doblado de tubos por arrastre con mandril. Tomado de (Webmaster, 2019)

Tipo de soldadura

La soldadura es el proceso de unir piezas metálicas, como acero o aluminio, mediante la aplicación de calor extremo. En este método, las piezas se fusionan al calentarse, ya sea fundiendo parte de ellas o añadiendo un material de aporte. La conexión se logra mediante la fusión y solidificación durante el enfriamiento. Es un proceso que combina calor y presión para formar una unión resistente entre los metales, proporcionando una conexión duradera. En resumen, la soldadura es la fusión y conexión de piezas metálicas utilizando calor y, en algunos casos, presión.

Proceso SMAW

La Soldadura de Arco con Electrodo Revestido (SMAW), también llamada Shielded Metal Arc Welding, es un método de unión de metales que involucra la fusión localizada a través de un arco eléctrico entre un electrodo metálico y el metal base que se desea unir. Este proceso tiene sus orígenes desde el final del siglo pasado, inicialmente utilizando varillas metálicas expuestas como material de aporte. Sin embargo, se identificó que la presencia de

oxígeno y nitrógeno en la atmósfera causaba problemas como fragilidad y porosidad en la soldadura. Para abordar esto, se introdujo un revestimiento en el electrodo, que al quemarse proporciona una atmósfera protectora y mejora varios aspectos del proceso. La experiencia práctica con este tipo de procesos de manufactura es fundamental para la formación de ingenieros, ya que les brinda un conocimiento más profundo de los procedimientos comúnmente utilizados en la producción industrial. (Granados Delgado, 2018).

Figura 15

SMAW: La soldadura más popular



Nota. La SMAW recibe muchos nombres, entre ellos: soldadura por arco con electrodo revestido, soldadura con electrodo recubierto, soldadura manual de arco metálico y soldadura de varilla. Tomado de (Grupo Acura, 2023)

La Asociación Americana de Soldadura (AWS) emplea un sistema de codificación estandarizado para identificar los electrodos de soldadura manual con arco eléctrico (SMAW) para acero suave. Estos códigos, impresos en el lateral de cada electrodo, ofrecen información específica sobre sus propiedades. La codificación sigue ciertos principios:

- La letra E indica que se trata de un electrodo.
- Los dos primeros dígitos reflejan la resistencia a la tracción mínima de la soldadura, medida en libras por pulgada cuadrada (PSI). Por ejemplo, un electrodo E7018 con el número 70 indica una resistencia mínima a la tracción de 70,000 PSI.

- El tercer dígito indica las posiciones de soldadura permitidas, siendo 1 para todas las posiciones y 2 para posición plana y horizontal.
- El cuarto dígito especifica el tipo de recubrimiento y la corriente de soldadura (CA, CD, o ambas) que se puede utilizar con el electrodo.

Proceso GMAW

La Soldadura GMAW, conocida como MIG, se destaca como uno de los procesos de soldadura por arco más populares y ampliamente utilizados. Este método implica la unión de dos metales mediante un arco eléctrico y la alimentación continua de material de relleno. La denominación MIG proviene de Metal Inert Gas, subrayando la importancia del gas inerte externo utilizado en el proceso. La característica clave de la Soldadura GMAW es la alimentación automática de un electrodo protegido por gas, lo que no solo asegura la protección del arco eléctrico, sino que también facilita eficazmente la unión de los metales.

Figura 16

GMAW: Soldadura en acero al carbón y acero inoxidable



Nota. La GMAW es una soldadura que se caracteriza por tener un sistema autorregulado de potencial constante. Tomado de (Grupo Acura, 2022)

Los alambres sólidos utilizados en la soldadura por arco de gas metal (GMAW) comparten una composición similar al metal base que se va a unir, pero incorporan desoxidantes en diferentes proporciones según la aplicación y el gas protector utilizado. El silicio es el desoxidante más común, al que se añaden pequeñas cantidades de diversos

metales para mejorar propiedades mecánicas o la resistencia a la corrosión. Los alambres con mayores niveles de desoxidantes suelen ser más adecuados para la soldadura con CO₂, ya que ayudan a prevenir la formación de poros en la unión soldada. (demaquinasyherramientas, 2012) .

Los alambres más utilizados en la industria son:

Alambre ER70S-2. Este tipo de alambre, caracterizado por contener titanio, zirconio y aluminio además de desoxidantes comunes, demuestra eficacia al soldar con gas C-25 (75% argón + 25% CO₂), incluso en acero oxidado. Aunque presenta la ventaja de evitar la formación de poros, su principal inconveniente radica en su falta de fluidez, lo que puede afectar la adherencia en materiales pesados al no propiciar el desplazamiento lateral del charco de metal fundido.

Alambre ER70S-3. Este alambre MIG, ampliamente utilizado y más económico, destaca por su mayor contenido de desoxidantes. Su charco de metal fundido es más fluido, generando cordones de soldadura más anchos. Ha demostrado ser exitoso en diversas aplicaciones a lo largo de los años, incluyendo la soldadura en automóviles, maquinaria agrícola y electrodomésticos.

Alambre ER70S-4. El alambre ER70S-4 es versátil y adecuado para una amplia gama de aplicaciones en soldaduras de acero. Destaca por su buena fluidez y características de arco superiores en comparación con el ER70S-3. Sin embargo, tiende a generar más salpicaduras. Se utiliza comúnmente en la soldadura de acero estructural, embarcaciones, tuberías y recipientes de calderas.

Alambre ER70S-6 y ER70S-7. Son los alambres de mejor rendimiento y mayor costo, y los que tienen los mayores niveles de silicio y manganeso como desoxidantes. Son adecuados para la soldadura de casi todos los aceros, desde acero al carbono fino hasta placas de 1/2 pulgada (con el diámetro apropiado de alambre), funciona con las mezclas de gases más

usadas y el charco posee una buena fluidez. Sus aplicaciones incluyen la fabricación de carrocerías, muebles, extinguidores, recipientes a presión y soldadura de cañerías, entre otras.

Alambres para metales no ferrosos. Para la soldadura de metales no ferrosos como el aluminio, se requieren alambres específicos. Entre ellos, los alambres ER-1100 y ER-4043 son destacados, siendo utilizados con argón, helio y otras mezclas gaseosas comerciales. Estos alambres son especialmente eficaces para soldar planchas y piezas fundidas de gran espesor. Las principales industrias que aprovechan estos alambres pertenecen a sectores como alimentos, lácteos y refrigeración. (demaquinasyherramientas, 2012)

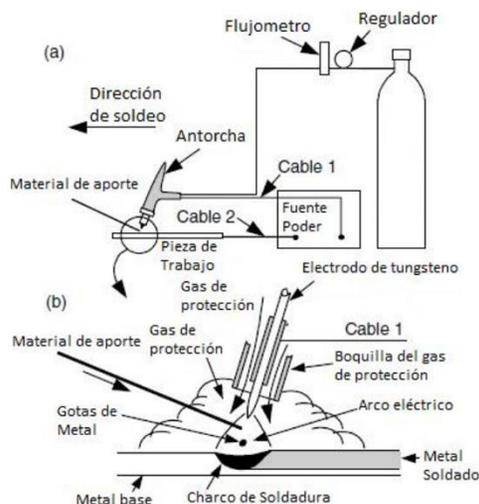
Por otro lado, el alambre ER-5356, que contiene un 5% de magnesio, destaca por su versatilidad, siendo adecuado para una variedad de situaciones. Su elevada resistencia a la tracción lo convierte en una elección idónea para la fabricación y reparación de tanques de combustible tipo rodante.

Proceso GTAW

La Soldadura por Arco de Gas Tungsteno, también conocida como GTAW o TIG, establece una conexión entre dos materiales mediante una pistola o maneral. Dentro de este dispositivo, un electrodo de tungsteno no consumible genera el arco eléctrico necesario para fundir el material de aporte. Este proceso, que se destaca por su precisión y control, utiliza un electrodo que no se consume durante la soldadura, y el término "Tungsten Inert Gas" subraya la importancia del tungsteno no consumible y del gas inerte para la protección del arco y el material fundido.

Figura 17

GTAW: La soldadura para unir todo tipo de materiales



Nota. Los resultados obtenidos con GTAW son los mismos si se utiliza una corriente alterna o una corriente continua. La elección de una u otra depende del material a soldar. Tomado de (Grupo Acura, 2022)

Proceso SAW

La Soldadura por Arco Sumergido (SAW) representa un método que tiene el potencial de mejorar significativamente los ritmos de deposición y la productividad, al tiempo que ofrece una calidad de soldadura consistente. Sin embargo, su idoneidad varía según las aplicaciones específicas. Factores como el espesor del material, el diseño de la unión, la preparación y la longitud deben evaluarse cuidadosamente al considerar la implementación de SAW.

En el proceso de soldadura por arco sumergido, se utiliza un arco para soldar las piezas, y la peculiaridad radica en la alimentación automática de polvo de grano grueso en el proceso. El arco funde este polvo, y la escoria líquida resultante forma una capa protectora sobre el metal líquido, resguardándolo de los efectos ambientales adversos. Este enfoque demuestra ser eficaz no solo en términos de rendimiento, sino también en la protección del metal durante la soldadura.

Figura 18

SAW: Soldadura por arco sumergido



Nota. La producción de tubos es una aplicación donde cobra sentido la soldadura por arco sumergido. Tomado de (THE FABRICATOR, 2018)

En el proceso de arco sumergido (SAW), la clasificación de los alambres y fundentes es esencial para garantizar resultados óptimos en la soldadura. Los alambres se clasifican según su composición química, resistencia a la tracción y características de deposición. Por otro lado, los fundentes se clasifican en base a su alcalinidad, contenido de silicato y la presencia de elementos desoxidantes. Estas clasificaciones se rigen por normas internacionales como AWS A5.17 y AWS A5.23 para alambres y AWS A5.17M/A5.23M para fundentes, proporcionando directrices específicas que permiten a los soldadores seleccionar los materiales adecuados para satisfacer los requisitos de la aplicación y lograr uniones soldadas de alta calidad.

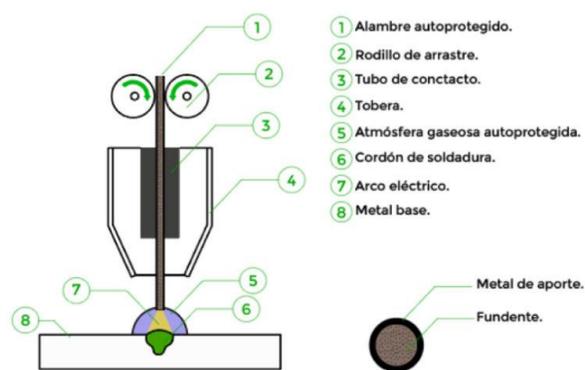
Proceso FCAW

La Soldadura FCAW, que implica un arco entre un electrodo tubular continuo y la pieza a soldar, destaca por la descomposición de materias primas en el tubo, proporcionando protección sin gas o presión. Su singularidad radica en el alambre tubular continuo relleno, con funciones similares al revestimiento de electrodos manuales y al fundente de la soldadura por arco sumergido. Es esencial para chapas gruesas debido a su excelente penetración de arco,

requiriendo velocidad uniforme para evitar la generación excesiva de escoria. La soldadura FCAW utiliza un electrodo con materiales fundentes y puede incluir gas protector, distinguiéndola de otras técnicas. La unión de metales se logra mediante el movimiento del electrodo, y el alambre con flux interno estabiliza el arco ajustando componentes químicos en el charco de soldadura.

Figura 19

Proceso FCAW



Nota. Depende del tipo de alambre para el proceso de la soldadura FCAW. Tomado de (Máquinas Bustamante, 2022)

Los materiales que usan los alambres tubulares son acero al carbono, acero de baja aleación, aceros inoxidable y fundición. Los alambres para acero se clasifican por una serie de números y letras, esto depende de las propiedades mecánicas que se requiere para la soldadura, E 7 1 T – 1 C/M los dígitos representan lo siguiente:

- E: Electrodo
- 7: Resistencia mínima a la tracción depositada, multiplicada por 10000 psi.
- 1: posición de soldadura, puede ser 0 o 1, donde 0 es una posición plana, horizontal y 1 todas las posiciones
- T: Tubular

- 1: Indicado del uso adecuado del electrodo, en características generales o la polaridad. Este valor puede variar entre 1 y 14 o letras como G o GS, en este caso la letra G indica la polaridad y características. La letra S con la G indica que el electrodo es adecuado para una pasada.
- C/M: indica el gas de protección que requiere. La letra C indica 100% de CO₂ y la letra M indica una mezcla de argón y CO₂. Algunos alambres no vienen con esta codificación quiere decir que están autoprotegido.

Ensayos no destructivos de soldadura

Los ensayos no destructivos que se aplican a elementos soldados juegan un papel muy importante en la determinación de uniones defectuosas, debido a que dependiendo de la aplicación que vaya a tomar la estructura o unidad soldada, se aplica un grado de exigencia para su soldadura.

Tabla 4

Método de examinación en relación con el tipo de juntas

Tipo de juntas	Radiografía	Ultrasonido	Líquidos Penetrantes	Partículas magnéticas	Inspección Visual
Junta a tope	A	A	A	A	A
Junta en esquina	M	A	A	A	A
Junta en "T"	M	A	A	A	A
Juntas a traslape	M	M	A	A	A

Tipo de juntas	Radiografía	Ultrasonido	Líquidos Penetrantes	Partículas magnéticas	Inspección Visual
Juntas de borde	M	M	A	A	A

Nota. A: Método aplicable, M: Método marginalmente aplicable (depende de otros factores como espesor del material, tamaño, orientación, y ubicación de la discontinuidad) Tomado de: (American Welding Society (AWS B1. 10), 2009)

Debido a esto se han generado herramientas y equipos a lo largo de los años que han facilitado el desarrollo de los ensayos no destructivos aplicados a las uniones por soldadura, las mismas que van a brindar seguridad en cuanto a confiabilidad y calidad refiere.

Tabla 5

Método de examinación en relación con las discontinuidades

Discontinuidad	Radiografía	Ultrasonido	Líquidos penetrantes	Partículas Magnéticas	Inspección Visual
Porosidad	A	M	A (1)	M (2)	A (1)
Inclusiones de escoria	A	M	A	M (2)	A (1)
Falta de fusión	M	A	U	M (2)	O (1)
Falta de penetración	A	A	U	M (2)	O (1)
Mordeduras	A	M	A	M	A
Solapado	U	M	A	A	M
Fisuras	M	A	A (1)	A (2)	A (1)
Laminaciones	U	A	A (3)	A (3)	A (3)

Nota. (1) Superficial, (2) Superficial y ligeramente subsuperficial, (3) Requiere preparación de la soldadura o borde del material base, A: Método aplicable, M: Método marginalmente aplicable (depende de otros factores del material, tamaño, orientación y ubicación de las discontinuidades), U: Usualmente no usado. Tomado de: (American Welding Society (AWS B1. 10), 2009)

Inspección visual

La primera evaluación no destructiva que se debe llevar a cabo en cualquier unión soldada es la inspección visual, siendo la más utilizada. Este método, económico y sencillo, se aplica comúnmente a todas las soldaduras y permite examinar múltiples áreas simultáneamente. Consiste en observar la apariencia externa del cordón de soldadura, evaluando su ancho, espesor y la presencia de posibles defectos como mordeduras, traslapes, solapado, fisuras, golpes de arco, inclusiones de escoria y porosidad superficial, así como asegurarse de la alineación adecuada de las juntas y la necesidad de garganta en el cordón. (Zambrano, 2015)

Para este tipo de ensayo no destructivo existen dos tipos de inspección:

- Inspección visual indirecta.

Este tipo de inspección está determinada debido a que requiere de instrumentos externos o auxiliares para la determinación de irregularidades en la soldadura, estas herramientas pueden ser: telescopios, fibroscopios, cámaras, etc.

- Inspección visual directa.

Este tipo de inspección está determinada a una distancia en la que no se requiera ningún tipo de accesorio necesario para la apreciación de la soldadura, si no solo con la capacidad visual de la persona lo realiza, sin embargo, lo recomendable es realizarlo alrededor de 150 mm hasta 600mm de distancia, agregado que se debe mantener un ángulo descrito no menor a 30°.

Inspección por líquidos penetrantes

El método de inspección superficial mediante líquidos penetrantes se basa en el principio de capilaridad. Esto permite que, incluso las discontinuidades más pequeñas en la superficie de los cordones de soldadura sean detectadas. Tras la aplicación del líquido penetrante y la eliminación del exceso superficial, se aplica un talco fino, conocido como revelador, que amplifica cualquier indicación de discontinuidad, haciéndola claramente visible. Este proceso es especialmente útil para detectar defectos abiertos a la superficie, como grietas, fisuras y poros, siendo aplicable en una variedad de materiales, incluyendo metales (ferrosos y no ferrosos), cerámicas, plásticos y vidrios no porosos ni excesivamente rugosos o escamados.

Etapas de la inspección por líquidos penetrantes

- Limpieza previa

Antes de realizar la aplicación de cualquier penetrante, se debe considerar y verificar que la superficie de estudio no presente ningún tipo de impureza como óxidos, grasas, contaminantes, etc. Ya que pueden ser un factor limitante para la penetración del líquido.

- Aplicación del penetrante

En esta etapa hay varios factores que se deben considerar, principalmente la temperatura, que, esta no puede estar fuera del rango entre 10 °C a los 32 °C, otro aspecto importante a tomar en cuenta es la duración de aplicación del penetrante que por lo general se lo realiza de 5 a 10 minutos.

Una vez conocidos los factores de aplicación del penetrante, se emplea el mismo sobre la superficie, que depende del líquido y la presentación de este, debido a que puede ser mediante broche, inmersión, rociado, etc.

- Limpieza del exceso de penetrante

Se deben limpiar el exceso de líquido penetrante que se haya esparcido por la superficie de la pieza, sin eliminar la cantidad que pudo haber entrado en las cavidades.

- Aplicación del revelador

Para la aplicación del revelador se debe tomar en cuenta que debe ser utilizado en el mismo intervalo de tiempo que se mantuvo el líquido penetrante. Este debe ser aplicado en una capa fina, en la misma área de trabajo, a fin de que la mezcla de estos cree un contraste y aumente el tamaño de las imperfecciones y discontinuidades.

- Interpretación y evaluación

Esta es la penúltima etapa de este método de inspección de soldadura, en el que se debe tomar en cuenta el tipo de líquido que se utilizó en el proceso, puesto a que, si se habla de un penetrante visible, se puede hacer la evaluación a la luz del sol, mientras que si este es fluorescente la valoración se la debe realizar con luz ultravioleta.

Criterio de rigidez

El criterio de rigidez viene dado en una medida cuantitativa que se la al parámetro de oposición a la deformación que se puede producir en un material, estas deformaciones generalmente son elásticas, que son provocadas por un esfuerzo, este puede de torsión o de flexión. Es decir que se puede definir como la disposición que tiene los elementos estructurales como lo es el chasis de un vehículo para admitir y soportar esfuerzos sin percibir deformaciones.

La resistencia de un objeto a deformarse bajo la influencia de una fuerza externa se conoce como "rigidez". Asimismo, la habilidad del objeto para recuperar su forma original una vez que la fuerza externa se retira recibe el nombre de "deformación elástica". La proporción entre la fuerza externa aplicada y la deformación elástica resultante se denomina "módulo de Young". (Keyence, 2023).

Gracias a la rigidez que existe en la estructura de los vehículos, existe una adecuada y optima transferencia de las cargas que sufre el chasis en la dinámica del automóvil, de igual manera este factor brinda una mejor sensación a la hora de conducir cuando se trata de

vehículos de competencia, brindando mayor sensibilidad debido a que existe una transmisión de fuerzas más precisa.

La rigidez en los chasis tubulares es fundamental, para minimizar la deformación elástica y así garantizar el correcto y óptimo funcionamiento del prototipo.

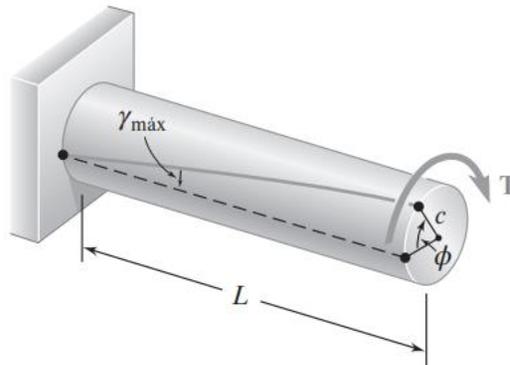
Rigidez torsional

La rigidez a torsión define el comportamiento y la deformación de la estructura delante de solicitaciones asimétricas, como por ejemplo cuando una de las ruedas de no está en contacto con el suelo y el resto sí. (Fernández & Latorre, 2017)

La rigidez torsional de cualquier estructura está dada por el cociente entre el momento torsor aplicado y el ángulo de rotación medido ante la aplicación de dicha carga (Pezzo, Cavallin, & Actis, 2013).

Figura 20

Torsión en viga en voladizo



Nota. Par de torsión aplicado al eje con un extremo fijo, que resulta en el ángulo de torsión.

Tomado de (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2017)

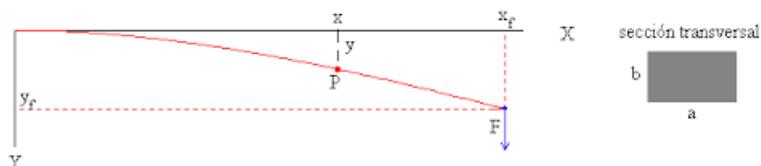
Rigidez a flexión

La rigidez a la flexión se caracteriza como el momento necesario para inducir la curvatura unitaria en una estructura inamovible pero no inflexible, o como la capacidad de

resistencia que muestra una estructura al someterse a flexión. Aunque tanto el momento como el desplazamiento pueden experimentar variaciones a lo largo de la viga o barra, la rigidez a la flexión constituye una propiedad intrínseca de la viga misma y tiende a ser constante. Existe una interrelación entre la rigidez a la flexión, el momento y el desplazamiento transversal.

Figura 21

Flexión de viga en voladizo



Nota. Representación exagerada de deformación a flexión de una viga en voladizo. Tomado de (García, 2010)

Rigidez en la estructura de un automóvil

En la estructura del automóvil existen maneras para brindar rigidez, sin embargo, en las estructuras tubulares las cuales son las que mayormente tiene acogida en los vehículos de competición, el método que más se utiliza para brindar esta característica al chasis es realizar una correcta triangulación, debido a que es capaz de minimizar de manera notoria un efecto que sufren este tipo de estructuras que es su deformación máxima.

Cuando no se tiene la estructura arriostrada mediante elementos diagonales gran parte de los esfuerzos son absorbidos por los nudos en forma de momentos flexores, al arriostrarla conseguimos que este nuevo elemento de fijación esté sometido a esfuerzos axiales de manera que los nudos trabajan con un momento flexor más reducido. (Fernández & Latorre, 2017).

Se debe tomar en cuenta que una estructura vehicular también presenta esfuerzos axiales, los cuales también afectan en la deformación máxima, sin embargo, estos son bastante menores a la producida por los momentos torsionales y de flexión, añadiendo que es preferible

obtener un esfuerzo axial de tracción, debido a que los de compresión son los que genera pandeo en las estructuras.

Cargas en la estructura de un automóvil

La estructura es de los componentes del vehículo que más cargas percibe, por lo que están expuestos a deformaciones, sin embargo, teniendo en cuenta cuales son las fuerzas que sufre la misma, facilita la simulación y obtención de datos en el software CAE, para certificar la eficiencia y seguridad del chasis tubular del prototipo.

Software CAD

El Diseño Asistido por Computadora (CAD) es un componente esencial en el ámbito de la ingeniería y el diseño de productos. Este programa implica el uso de sistemas computacionales para crear, modificar y optimizar diseños, mejorando la productividad y la calidad del proceso de ingeniería. Los programas CAD generan representaciones 2D o 3D que pueden ser visualizadas desde diversos ángulos, facilitando la comunicación y documentación del diseño. (Leño, 2020)

Estos programas pueden exportar archivos para impresión y manufactura, contribuyendo a la creación de una base de datos para este fin. En proyectos mecánicos, se utilizan gráficas basadas en vectores o imágenes para representar objetos de diseño, transmitiendo información detallada como materiales, procesos, dimensiones y tolerancias.

El CAD se aplica en diversas industrias, como la automotriz, la construcción naval y la aeroespacial. Además, el CAD ha sido fundamental para la investigación en geometría computacional y geometría discreta.

Software CAE

Los sistemas CAE (Computer-Aided Engineering) desempeñan un papel crucial en el método de elementos finitos. Este sistema se utiliza para prever el rendimiento del modelo ante

diferentes condiciones del mundo real, mediante la introducción de parámetros como temperatura, presión, interacciones de componentes y fuerzas aplicadas. (Leão, 2020)

Estos parámetros, comunes en la ingeniería mecánica, se incorporan en programas CAE para evaluar la capacidad teórica de la pieza examinada para manejar las limitaciones de diseño. Las áreas abarcadas por CAE incluyen análisis de estrés y dinámica, análisis térmico y de fluidos, sistemas multicuerpo (MBD) y cinemática, herramientas de análisis para simulación de procesos y fabricación, optimización del proceso de documentación, optimización del desarrollo del producto, y verificación inteligente de inconformidades.

Los datos que presentan en análisis de elementos finitos son:

Estrés de Von Mises

El criterio de Von Mises es un concepto importante en el análisis de elementos finitos (CAE, por sus siglas en inglés: Computer-Aided Engineering). Este criterio se utiliza para predecir el fallo o la deformación plástica en materiales dúctiles bajo cargas complejas.

En el análisis de elementos finitos, se modelan estructuras y componentes mediante elementos discretos que representan la geometría y las propiedades del material. Al aplicar cargas a estas estructuras, se calculan las tensiones y deformaciones resultantes. El criterio de Von Mises es una fórmula matemática que evalúa estas tensiones para determinar si el material alcanza o supera su límite de fluencia y entra en la región plástica.

Cargas Estáticas

Se asume que todas las cargas y restricciones en el análisis de elementos finitos son estáticas, lo que implica que no cambian con el tiempo y se aplican lentamente para ignorar los efectos de la inercia. Aunque en la realidad las cargas varían con el tiempo, modelarlas como estáticas suele ser aceptable para el análisis de diseño, excepto en situaciones donde las cargas cambian rápidamente, como en análisis dinámicos, caídas o vibraciones, donde se requiere considerar cargas dinámicas.

Tensión

Las fuerzas internas de un sólido variarán de un punto al otro. A través de toda pequeña área interna de un plano, las cargas son ejercidas por la parte del sólido en un lado del área sobre la parte del otro lado. La tensión denota la intensidad de estas fuerzas internas (fuerza por unidad de superficie).

Deformación unitaria

Deformación unitaria es la proporción de cambio de longitud ΔL a la longitud original. La deformación unitaria es una cantidad sin dimensión.

Cargas dinámicas

El análisis de elementos finitos, los estudios estáticos presuponen la aplicación lenta o constante de cargas, desestimando las fuerzas de inercia y amortiguación al considerar nula la velocidad y aceleración en el modelo. En situaciones prácticas donde las cargas no se aplican lentamente y no cambian con el tiempo o frecuencia, se aconseja recurrir a estudios dinámicos. Como regla general, se sugiere emplear estudios dinámicos cuando la frecuencia de una carga excede un tercio de la frecuencia fundamental más baja. Estos estudios lineales dinámicos se fundamentan en los estudios de frecuencia, calculando la respuesta del modelo al considerar la contribución de cada modo al entorno de carga, siendo los modos más bajos los que usualmente tienen una contribución significativa. La magnitud de la contribución de un modo depende de diversos factores, como el contenido, la magnitud, la dirección, la duración y la ubicación de la frecuencia de la carga.

Factor de seguridad

El factor de seguridad en el contexto del análisis y diseño en software CAE (Computer-Aided Engineering) se refiere a la aplicación de márgenes adicionales o coeficientes de seguridad para garantizar que la solución obtenida sea lo suficientemente robusta y confiable frente a las condiciones de carga y otros factores variables. Este enfoque se utiliza para mitigar

la incertidumbre y las variaciones inherentes a los datos de entrada y al modelo matemático utilizado en el software CAE.

Es importante tomar en cuenta que, para estructuras, que no van a ser sometidas a condiciones de carga (levantamiento o arrastre de objetos) y cargas ambientales no severas, pero el peso que va a soportar es una consideración importante como lo son las estructuras automotrices, el factor de seguridad óptimo va desde 1 a 1,5.

Capítulo III

Diseño

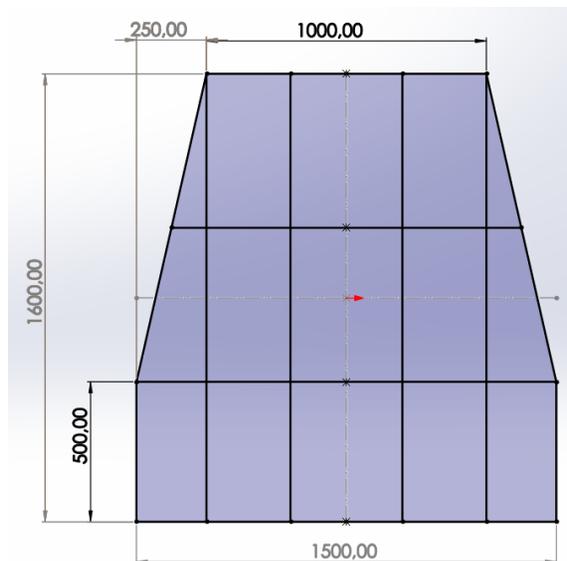
Diseño detallado

En esta sección del capítulo se detallan las características más importantes del diseño como las distancias que se debe tomar en cuenta para el diseño del chasis, con referente a la formula SAE.

Cabina

El habitáculo es una zona esencial diseñada para el confort del piloto y su copiloto. La reglamentación de la Formula SAE establece especificaciones de dimensiones para vehículos de monoplace, ilustradas en la Figura 6. Dichas dimensiones, recomendadas por la SAE, fueron el punto de referencia inicial para delimitar el espacio en nuestro modelo para dos personas.

Al determinar las dimensiones del habitáculo, es crucial recordar que las medidas de la Formula SAE no contemplan el espacio extra necesario para la palanca de cambios y la comodidad de los ocupantes. Asimismo, se deben emplear asientos concebidos para competiciones de la SAE, lo cual significa que no es viable replicar la dimensión estándar de 400 + 150 mm. Considerando diversos aspectos que la normativa para un biplace no abarca, hemos modificado las medidas para el vehículo de dos asientos, como se evidencia en la siguiente figura.

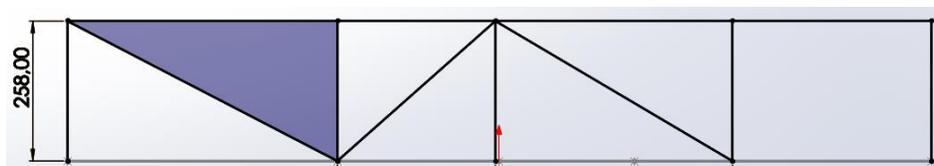
Figura 22*Dimensiones de la cabina***Estructura de impacto lateral**

La estructura lateral hace referencia a los componentes que se extienden a lo largo del vehículo, desde el extremo frontal hasta el trasero, y desempeña un papel fundamental en la protección de los ocupantes. La Formula SAE especifica la dimensión máxima y mínima de la estructura lateral, tal como se muestra en la Figura 7.

Durante la fase de diseño, se ha adoptado como punto de partida las medidas proporcionadas por la Formula SAE, dado que las medidas tomadas para el diseño se encuentran en el rango que menciona la normativa con la finalidad de garantizar la seguridad. La dimensión ajustada de la estructura lateral se detalla en la siguiente figura.

Figura 23

Dimensiones de la estructura de impacto lateral



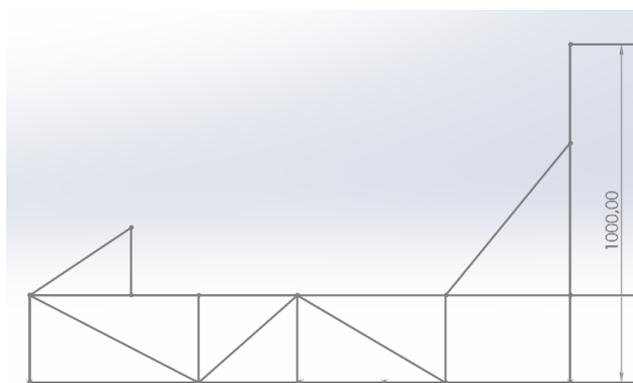
Distancia al suelo

La distancia al suelo es la medida que separa el punto más bajo del vehículo y el asfalto. Una distancia entre el suelo y el vehículo reducida baja el centro de gravedad, mejorando así la maniobrabilidad. La Fórmula SAE dicta la altura máxima entre el arco principal y el suelo, sirviendo de referencia para establecer la altura libre del vehículo.

En el diseño vigente, esta normativa no es aplicable de forma directa porque la suspensión de las ruedas es regulable, por ende, va a depender directamente de la regulación a la que se encuentre. Por eso la fase de diseño se tomó como altura 1000mm, para que pueda variar con las ruedas 200 mm y así obtener la altura que delimita la normativa SAE.

Figura 24

Distancia del suelo

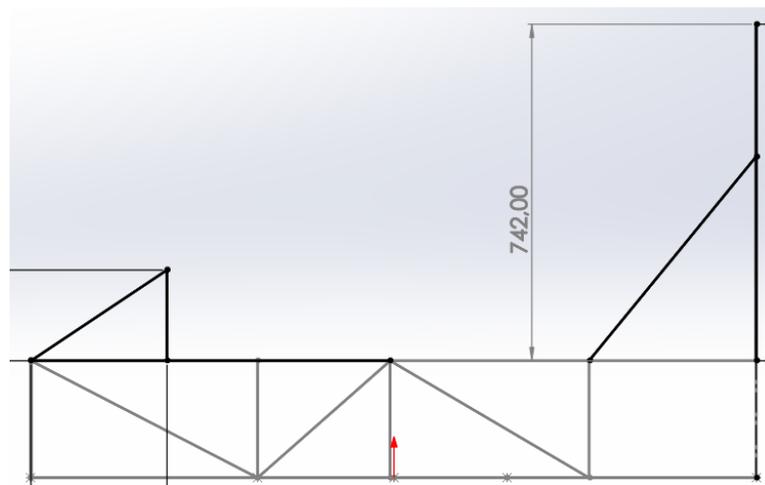


Protección antivuelco

La protección antivuelco es la estructura metálica construida para proporcionar un entorno seguro al ocupante en caso de vuelco, en este caso la Formula SAE nos menciona que la distancia que debe tomar los tirantes del aro principal, en este caso por el diseño no se pudo cumplir con la normativa, por eso las dimensiones del diseño de la protección antivuelco es el que se muestra la figura

Figura 25

Vista lateral del diseño



Arco delantero

El arco delantero es el que se encuentra en la parte delantera, ubicada con el volante, la Formula SAE menciona la distancia del arco con el volante, la cual es para la seguridad del conductor.

El arco puede estar compuesto por una combinación de perfiles estructurales, y en el diseño actual se han considerado las directrices de la Fórmula SAE en relación con esta característica. Además, se tomará en cuenta la distancia entre el volante y el arco para asegurar una ubicación óptima del volante. La configuración detallada del arco frontal se muestra en la siguiente figura.

Figura 26

Vista lateral de la estructura

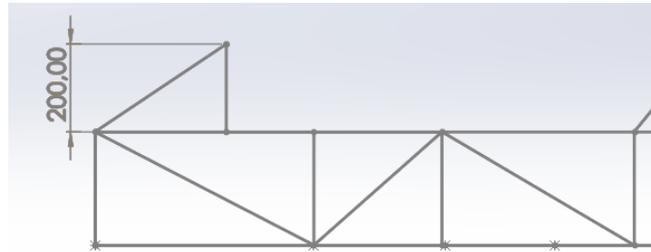
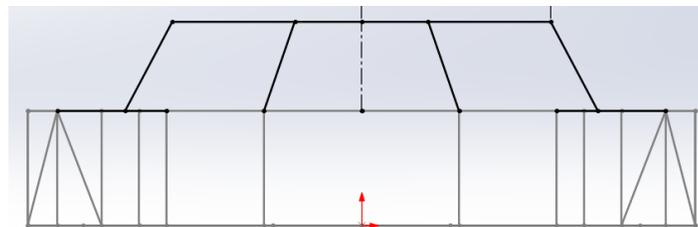


Figura 27

Vista frontal de la estructura



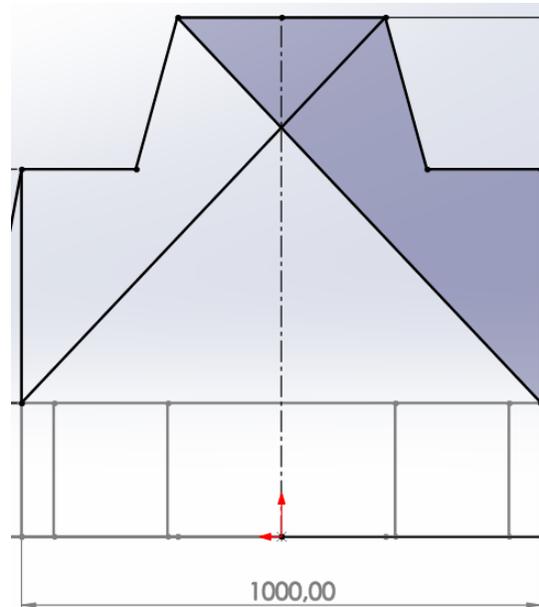
Arco principal

El arco principal es una estructura esencial de metal cuya función es asegurar la protección del ocupante. La normativa de la Fórmula SAE establece que el arco principal debe consistir en un solo elemento, lo cual implica que no puede haber soldaduras. Sin embargo, durante la fase de diseño del modelo, fue necesario apartarse de estas especificaciones debido a que la configuración del modelo incluía diferentes ángulos, lo cual requirió la implementación de soldaduras para su correcta ejecución.

A pesar de que se tomaron las dimensiones proporcionadas por la Fórmula SAE como punto de partida, las características específicas del diseño en cuestión hicieron que no se ajustara completamente a dichos parámetros. En consecuencia, el arco principal del diseño resultante tiene las dimensiones detalladas en la siguiente figura

Figura 28

Dimensión de separación del arco principal

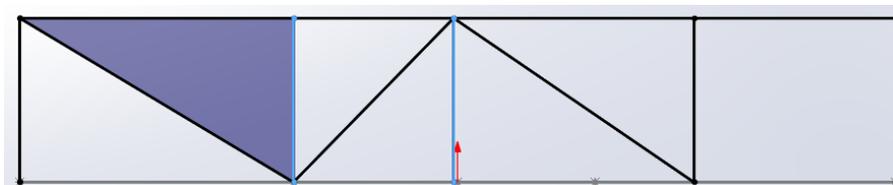


Triangulación

La triangulación consiste en buscar que el diseño geométrico este basado en la unión de triángulos, dado que así se forma una estructura geométrica indeformable. En la Formula SAE, menciona que toda la estructura debe cumplir con triangulación como se muestra en la figura 5. En la fase de diseño se intentó realizar la triangulación en todo el diseño, así cumpliendo con la normativa que menciona la formula SAE, así como se muestra en la siguiente figura

Figura 29

Triangulación en la estructura de impacto lateral



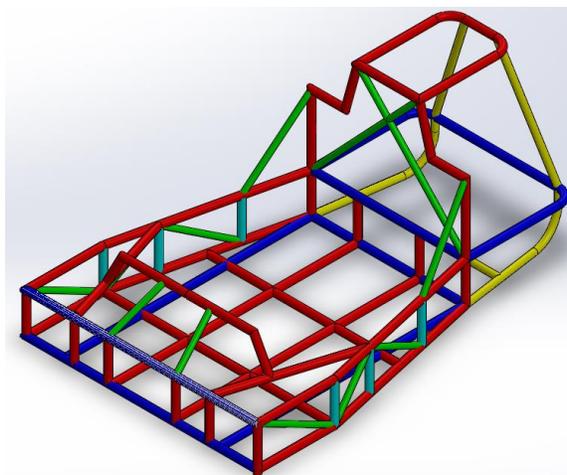
Selección de tubos

Para la selección de diámetros de tubos para la estructura del prototipo se ha seguido las recomendaciones de la Federación Internacional del Automóvil. Estas son útiles para construir habitáculos de seguridad y proveen un estándar para la integridad y protección en chasis tubulares.

La FIA recomienda tubos de acero al carbono laminado en frío, en el mercado ecuatoriano obtenemos el tubo ASTM A53 que cumple con las normativas establecida por la ASTM A500 de grado A. Esta normativa regula diámetros para arcos principales con una medida de 42 x 2.5 mm, en este caso son los puntos destinados a tener mayor resistencia a esfuerzos de deformación, y en el mercado ecuatoriano se encuentra el tubo de 42 x 3 mm que satisface los estándares requeridos.

En la estructura ese tubo se ocupa para las partes principales del prototipo, además el tubo de diámetro 42 x 2 mm y 42 x 1.5 mm, brinda un apoyo al esqueleto principal, conformando el armazón lateral.

Los semiarcos laterales y otras partes de la estructura la FIA menciona la dimensión de 38 x 2.5 mm este tipo de tubo es usado en donde existe un esfuerzo de deformación menor. En el diseño se usa utiliza tubo de 38 x 1.5 mm en la parte posterior del boceto el cual sirve como apoyo para la base de motor, ya establecidos los tubos de mayor esfuerzo estructural en la estructura se puede optar por tubos de menos diámetros como 32 x 1.5 mm que ayuda a realizar la triangulación en todo el diseño. La distribución de diámetros de tubos se puede observar en la siguiente figura.

Figura 30*Dimensiones de tubos por colores***Tabla 6***Resumen por aplicación y talla*

Dimensiones	Color
42 x 3 mm	Azul
42 x 2 mm	Rojo
42 x 1.5 mm	Celeste
38 x 1.5 mm	Amarillo
32 x 1.5 mm	Verde

Nota. Resumen de dimensiones para la construcción del prototipo. Elaboración propia.

Creación del material

Como se mencionó anteriormente se trabaja con un tubo de material ASTM A53, el cuál es producido bajo la norma ASTM A 500 grado A, para lo cual se tomaron se valores de la Tabla 1 para la creación del material en el software.

Tabla 7*Datos mecánicos de tubo seleccionado*

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	210000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.28	N/D
Módulo cortante	79000	N/mm ²
Densidad de masa	7800	kg/m ³
Límite de tracción	310	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	228	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K

Una vez creado el material con sus respectivas propiedades mecánicas, se aplica el material a la estructura modelada, para proceder al análisis de elementos finitos.

Cálculo de cargas

Antes de realizar el análisis por elementos finitos, necesitamos delimitar ciertos parámetros, que son las cargas que sufre la estructura.

Cálculo de cargas muertas

Para el cálculo de cargas muertas se debe tomar en cuenta las masas de los elementos que se encuentran suspendidas en la estructura del prototipo, las cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 8*Cargas muertas*

Elementos	m_t [Kg]	CM [N]
Motor	80	784,532
Transmisión	60	588,399
Asientos	18,144	177,932
Dirección	11,1	108,854
Pedalera	10	98,067

Elementos	m_t [Kg]	CM [N]
Depósito de combustible (lleno)	20,52	201,232
Faros delanteros	0,49	4,805
Faros posteriores	0,22	2,157
Total	200,474	1965,978

$$M = 1965,978 \text{ N}$$

Cálculo de cargas vivas

Para el cálculo de cargas vivas se utiliza los parámetros expuestos anteriormente, tomando en cuenta que el vehículo está diseñado para dos pasajeros, por lo que se utiliza la ecuación descrita para este tipo de cargas, tomando en cuenta que el valor nominal es de 70 kg por ocupante.

$$V = m_p \cdot 9.80665 \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

$$V = 140 \text{ kg} \cdot 9.80665 \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

$$V = 1372,931 \text{ N}$$

Cálculo carga de frenado

Para la carga de frenado primeramente se debe realizar la adición entre la masa de los componentes fijos y la masa de los ocupantes como se desarrolla a continuación.

$$m_T = m_p + m_t$$

$$m_T = 200,474 \text{ kg} + 140 \text{ kg}$$

$$m_T = 340,474 \text{ kg}$$

Para el cálculo de la desaceleración media se establece una velocidad promedio de 90 km/h que es la velocidad crítica que establece el Instituto Ecuatoriano de Normalización, donde

se estima una distancia de frenado ideal de 45m que se obtiene de la multiplicación del primer dígito de la velocidad por 5.

$$dm = \frac{v^2}{2 \cdot s}$$

$$dm = \frac{\left(90 \frac{km}{h} \cdot \frac{1000m}{1km} \cdot \frac{1h}{3600s}\right)^2}{2 \cdot 45m}$$

$$dm = 6,944 \frac{m}{s^2}$$

Finalmente se remplazan los datos en la siguiente Ecuación:

$$F = m_T \cdot dm$$

$$F = 340,474 \text{ kg} \cdot 6,944 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 2364,251 \text{ N}$$

Cálculo de carga de aceleración brusca

Para el cálculo de carga de aceleración brusca se toma el mismo valor que se obtuvo en el cálculo de carga de frenado, pero en este caso con el sentido contrario.

$$Ab = -F$$

$$Ab = -2364,251 \text{ N}$$

Cálculo de carga de giro

En el cálculo de carga de giro, el Instituto Ecuatoriano de Normalización, establece una velocidad crítica de 90 km/h, dando así un peralte del 8% estableciendo un ángulo de 7,2° y un radio de giro de 350m.

$$G = m_T \cdot \frac{v^2}{r} + m_T \cdot 9.80665 \left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot \text{Sen}(\alpha_{\text{peralte}})$$

$$G = 340,474 \text{ kg} \cdot \frac{\left(90 \frac{km}{h} \cdot \frac{1000m}{1km} \cdot \frac{1h}{3600s}\right)^2}{350m} + 340,474 \text{ kg} \cdot 9.80665 \left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot \text{Sen}(7,2^\circ)$$

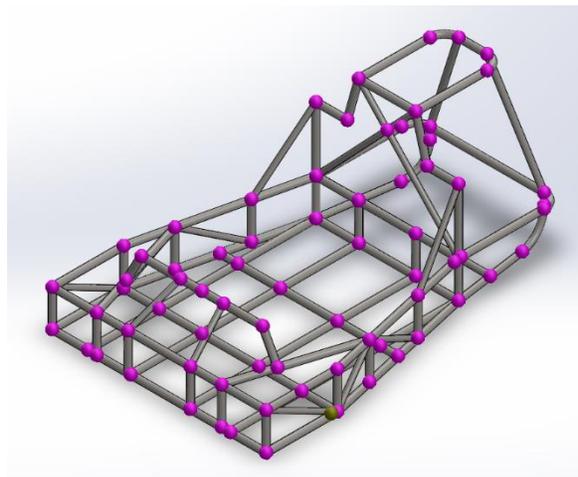
$$G = 1026,459 \text{ N}$$

Análisis por elementos finitos

Se realiza un análisis estático detallado con el fin de aplicar cargas específicas a la estructura. Este proceso permite evaluar la resistencia de esta, y determinar las posibles deformaciones que podrían presentarse bajo dichas condiciones. La importancia de este análisis radica en la capacidad de prever el comportamiento de la estructura ante esfuerzos aplicados y garantizar su integridad y seguridad a largo plazo.

Figura 31

Creación de análisis de estudio

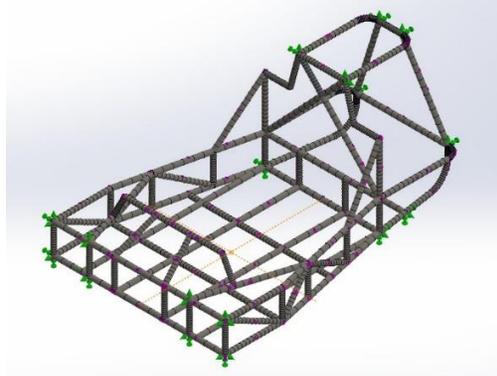


Creación de malla

Se creó una malla para llevar a cabo el análisis por el Método de Elementos Finitos (FEM) de una estructura. La malla fina permite refinar el tamaño de los elementos en componentes críticos, caras, aristas y vértices, asegurando así una precisión del comportamiento estructural ante diversas cargas y condiciones.

Figura 32

Creación de malla

**Creación de sujeciones fijas**

Las sujeciones fijas resultan esenciales para imponer restricciones inamovibles en un análisis estructural. Respecto a esta estructura, se determina que las bases de los neumáticos funcionan como puntos de sujeción fija, dado que es en estas áreas donde se concentra el peso total, abarcando tanto componentes como la estructura completa. La adecuada aplicación de estas sujeciones es vital, ya que reproduce con exactitud la condición estática de la estructura y garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos en la evaluación de su respuesta ante cargas.

Figura 33

Sujeciones fijas delanteras

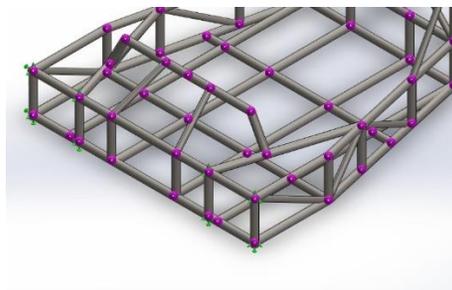
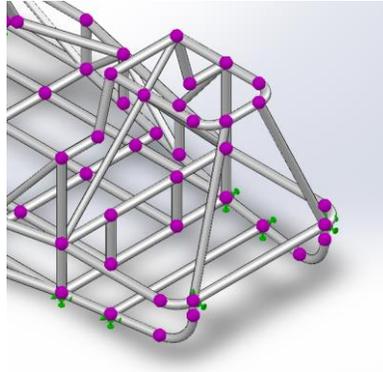


Figura 34

Sujeciones fijas posterior

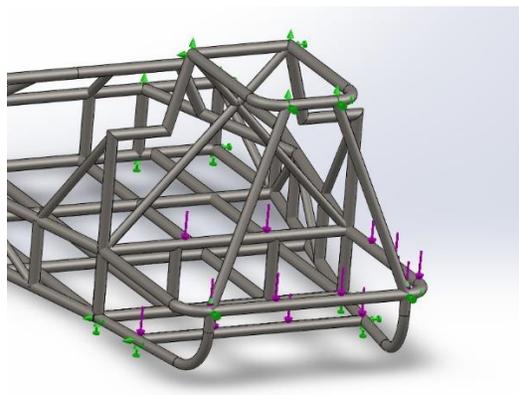
**Adición de cargas**

La implementación de fuerzas distribuidas de manera ordenada, conforme a las cargas impuestas por el peso de los componentes, que se especifican en la Tabla 8 y de los cálculos anteriormente resueltos. Este enfoque permitió evaluar la integridad del vehículo bajo condiciones que simulan el uso real, asegurando así su fiabilidad y seguridad.

Se agrega la carga de del motor y de la transmisión en los perfiles en donde se encuentran las bases donde estos se asientan en la estructura.

Figura 35

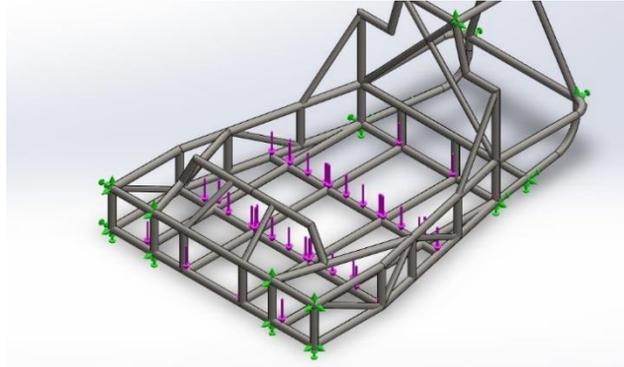
Carga de motor y transmisión



Seguidamente, se ubican las cargas en los perfiles en donde se van a distribuir la carga de los pasajeros de los asientos, a pesar de que son dos cargas diferentes, son solidarias debido al apoyo de los asientos.

Figura 36

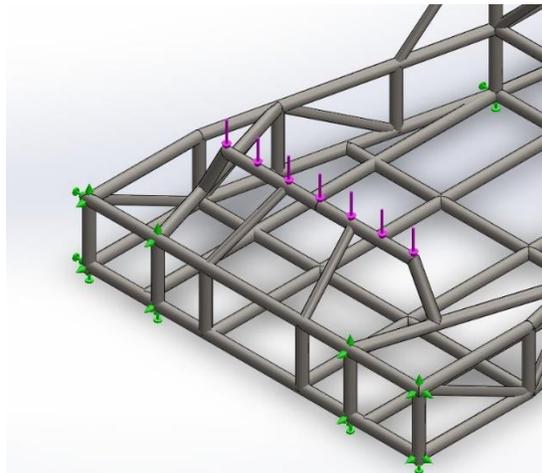
Carga de asientos y pasajeros



Se ha integrado la carga del sistema de dirección teniendo en cuenta la posición de la columna de dirección en los perfiles en donde tiene las bases en la estructura.

Figura 37

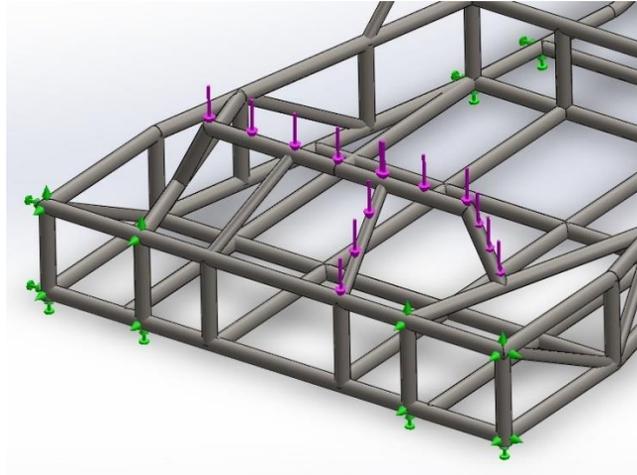
Carga del sistema de dirección



A continuación, se ubican las cargas en los perfiles en donde se encuentra los soportes de la pedalera, en las cuales se incluye el peso del servofreno, que está ubicada en el transversal del arco delantero, y en los dos adyacentes que se puede ver en la siguiente figura.

Figura 38

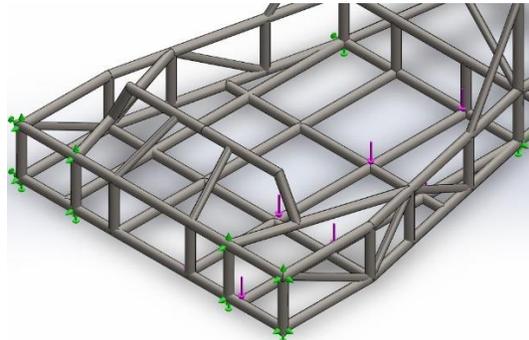
Carga de la pedalera



A continuación, se ubican las cargas en los perfiles en donde se posiciona el tanque de combustible completamente lleno, este se encontrará, ubicado detrás de los asientos.

Figura 39

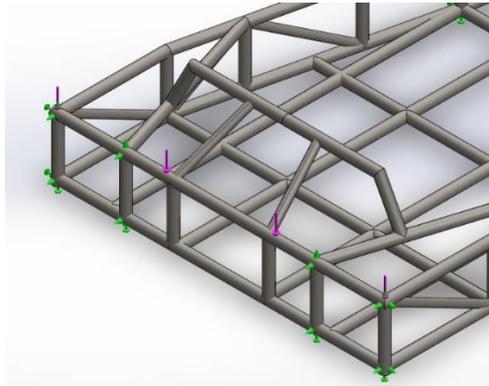
Cargas del tanque de combustible



Posteriormente, se ubican las cargas que provocan los faros delanteros en la estructura que como se puede visualizar en la figura a continuación, se ubica en el perfil horizontal delantero superior.

Figura 40

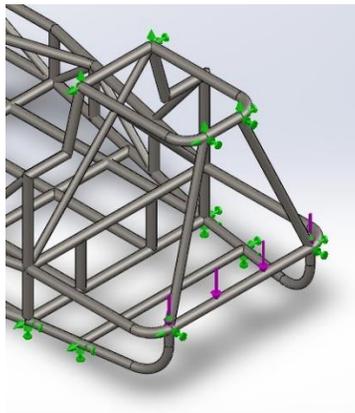
Cargas de los faros delanteros



Seguidamente, de la misma manera se ubica la carga que ejercen los faros posteriores, que están ubicados en el perfil horizontal posterior, cabe mencionar, que tanto los faros delanteros.

Figura 41

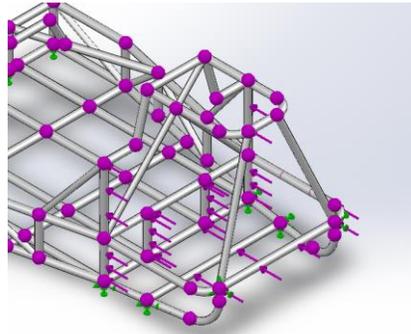
Carga de los faros posteriores



En la siguiente figura se presenta la distribución de carga de frenado en los perfiles donde la estructura se ve mayormente sometida a esta al momento en el que el vehículo empieza a su desaceleración.

Figura 42

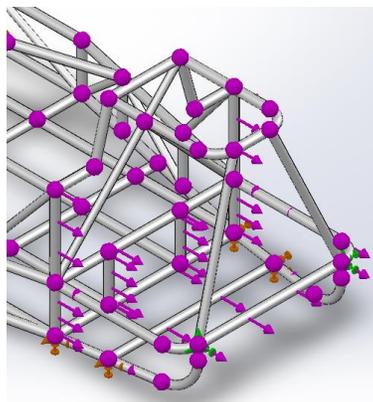
Carga de frenado



La carga de la aceleración está ubicada en los mismos perfiles que la de frenado, pero en sentido contrario, sin embargo, genera tensiones diferentes debido a la estructura del vehículo.

Figura 43

Carga de aceleración brusca

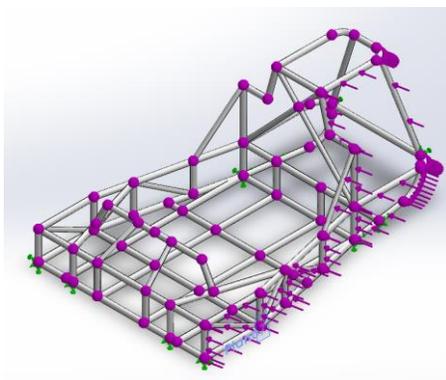


Finalmente, se añade la carga que se genera en un giro a una velocidad de 90 km/h, que va a sufrir la estructura, hay que tomar en cuenta que se especifica que existe un ángulo

de peralte en la calzada de $7,2^\circ$, por lo cual este esfuerzo se encuentra aplicado en todo el lateral de la estructura al ángulo mencionado, respecto a un plano horizontal.

Figura 44

Carga de giro



Combinación de cargas

Se procedió a realizar la combinación de cargas que propone la INEN NTE 1323 según el método ASD, dado que estos son esfuerzos básicos que están sometidos las estructuras y se puede apreciar la seguridad de estas. A continuación, se presenta las pruebas con las cargas muertas, vivas, de giro, frenado y aceleración brusca.

Figura 45

Cargas Muertas + Vivas + Giro

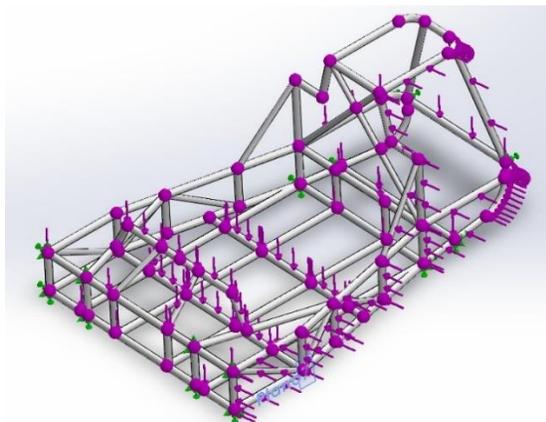
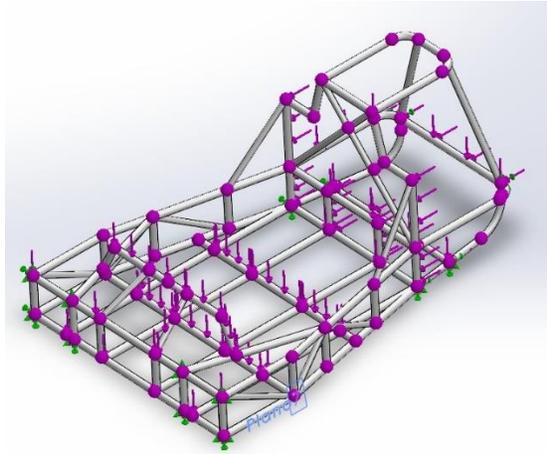
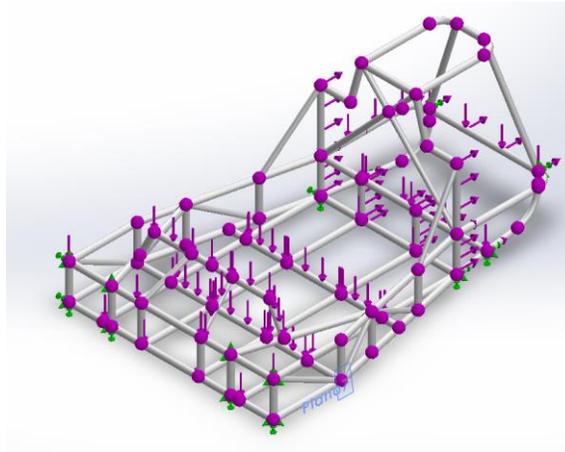


Figura 46

Cargas Vivas + Muertas + Cargas de frenado

**Figura 47**

Cargas Vivas+ Muertas + Aceleración brusca

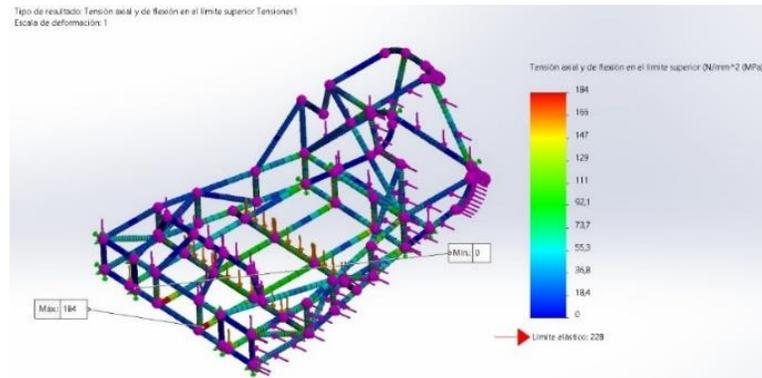


Resultados del análisis por elementos finitos

Concluida la adición de las cargas que sufre la estructura, se procede realizar el análisis por elementos finitos que facilitara la causa y efecto de las fuerzas aplicadas, así con este análisis se puede predecir cuándo y cómo fallara el sistema, en este caso se obtiene datos como el criterio de Von mises, deformación y factor de seguridad.

Figura 48

Datos obtenidos del análisis por elementos finitos



Capítulo IV

Construcción

Construcción de la estructura tubular

El proceso de construcción abarca desde un diseño minucioso hasta la selección de materiales que se ajustan a las condiciones de uso del vehículo. Cada fase de la construcción es crucial, desde el diseño, selección de tubos y los procesos de manufactura para garantizar tanto el rendimiento como la seguridad.

Medición del tubo

La precisión en la medición de los tubos es fundamental para garantizar que la estructura del vehículo cumpla con las especificaciones de diseño. Se utilizan instrumentos para determinar las longitudes exactas requeridas, teniendo en cuenta las tolerancias necesarias para los procesos de corte y ensamblaje. Cada segmento de tubo se mide antes de proceder a la siguiente etapa, asegurando que las piezas encajen perfectamente en la estructura general del vehículo.

Corte del tubo

El proceso de corte se lleva a cabo con herramientas especializadas que permiten cortes limpios y precisos, esenciales para mantener la integridad estructural del material. El corte se realiza siguiendo las líneas de medida marcadas previamente, y cada corte es inspeccionado para confirmar que cumple con las dimensiones establecidas.

Figura 49

Proceso de cortado

**Doblado del tubo**

El proceso de doblado de los tubos es un proceso se realiza con maquinaria específica, capaz de crear ángulos sin comprometer la fortaleza del material. Se siguen los ángulos de diseño requeridos y se efectúan comprobaciones periódicas para asegurar que el doblado cumpla con los parámetros de diseño.

Figura 50

Proceso de doblado de tubos



Soldado del tubo

El proceso de soldadura se efectúa con cuidado y técnica. Se emplean técnicas de soldadura que aseguran uniones fuertes y duraderas, manteniendo la seguridad como prioridad.

Figura 51

Proceso de soldadura



Construcción

El primer paso en cuanto a la construcción del prototipo fue la fabricación del panel frontal del vehículo, debido a que esta delimita el ancho que tiene el espacio donde se ubica el tablero de instrumentos, volante, palanca de cambios, etc. Lo cual facilitaría la disposición del siguiente alzamiento que sería el panel posterior, que ofrecerá el espacio de los asientos de conductor y pasajero.

Posterior a esto se realizó el piso de la cabina, el cual servirá como unión entre las dos primeras estructuras.

Una vez incorporadas las tres partes anteriores se procede a realizar la estructura lateral que tiene el vehículo que es primordial en cuanto a impactos refiere, seguido de esto se realiza la triangulación de las uniones.

Posteriormente se incorporan el arco principal y después el arco delantero, delimitan las alturas establecidas para protección del conductor, pasajero y la ubicación de los instrumentos mencionados en el paso uno respectivamente.

Finalmente se construye los soportes en donde se incorporarán los demás sistemas esenciales para el funcionamiento del vehículo.

Figura 52

Diagrama de procesos para la construcción del prototipo

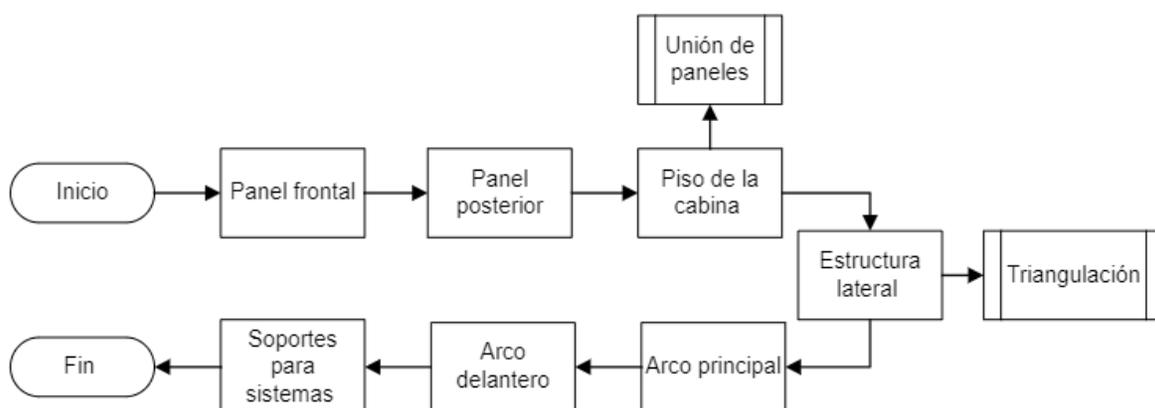


Figura 53

Panel frontal



Figura 54

Panel posterior

**Figura 55**

Piso de cabina

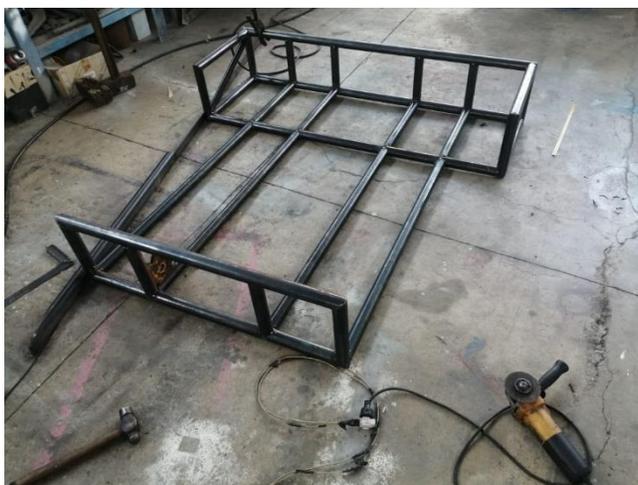


Figura 56*Estructura lateral***Figura 57***Arco principal*

Figura 58

Arco delantero

**Figura 59**

Soporte de sistemas



Capítulo V

Resultados y discusión

Resultados por elementos finitos

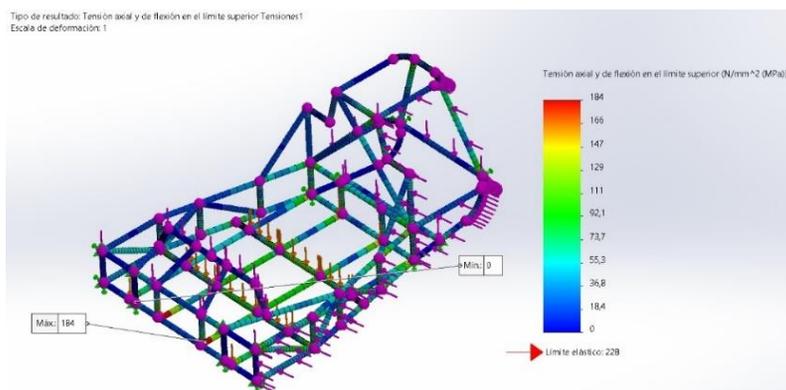
Obtención de criterio de Von Mises

El criterio de Von Mises representa la característica de ductilidad del material cuando este comienza a ceder, para la obtención de este dato se realizó el análisis de posición de esfuerzos mediante la ubicación de los componentes y el emplazamiento de la carga de giro, aplicando las fuerzas que generan los mismo en la estructura, y a través del análisis de elementos finitos se obtiene un valor máximo de 184 MPa.

Mediante el valor máximo reflejado en el análisis y el valor de la tensión de fluencia del material que es 228 MPa, se comprendió que el criterio de Von Mises no debe ser mayor al valor del límite elástico del material, por ende, la estructura no tiende a ceder de manera abrupta con los esfuerzos aplicados, a pesar de aplicación de la carga dinámica más representativa que es la fuerza de giro ya que esta se genera en todo la parte lateral de la estructura.

Figura 60

Criterio de Von Mises cargas M+V+G

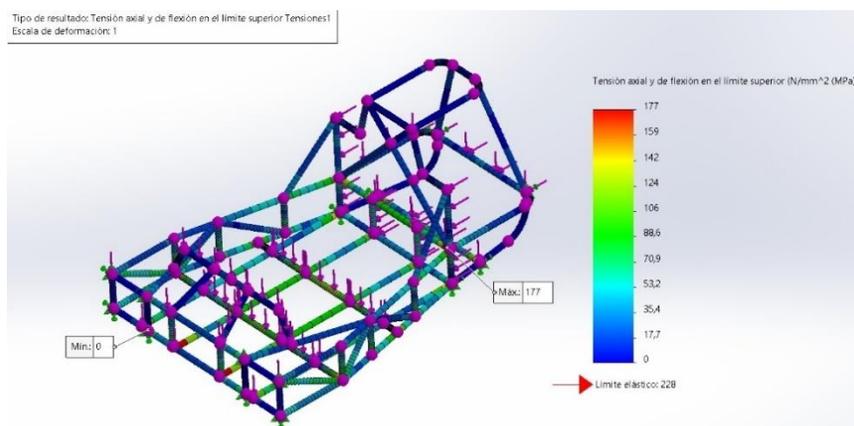


En cuanto al criterio de Von Mises en la combinación de cargas vivas, muertas y de frenado, se tiene un valor máximo de 177 MPa como se puede apreciar en la figura a

continuación, que, con lo mencionado anteriormente acerca de la tensión de fluencia de nuestro material, se puede asegurar que el perfil tubular se encuentra en una deformación elástica, lo cual es un criterio aceptable, debido a que no genera fatigas en la estructura, ni el perfil tiene cambios en sus propiedades.

Figura 61

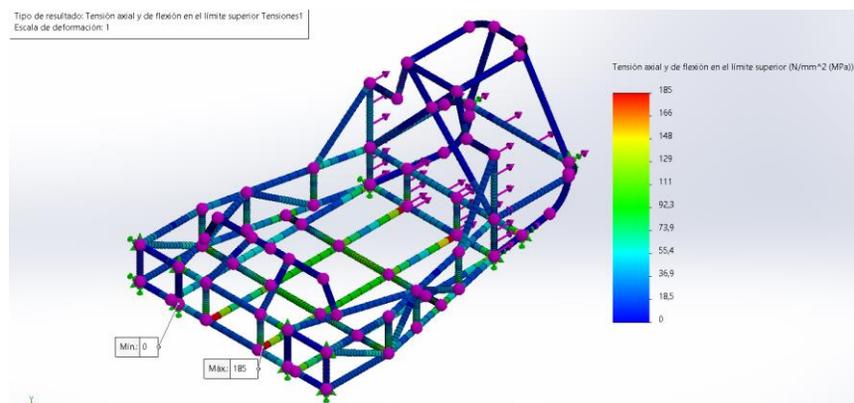
Criterio de Von Mises cargas V+M+F



En la combinación de cargas vivas, muertas y de aceleración brusca tenemos un análisis similar a los dos anteriores, en donde en el estudio se obtiene un valor de tensión máxima de 185 MPa, siendo menor al valor de fluencia de la materia, asegurando que el último análisis de este criterio tampoco generaría problemas en la estructura.

Figura 62

Criterio de Von Mises cargas V+M+Ab



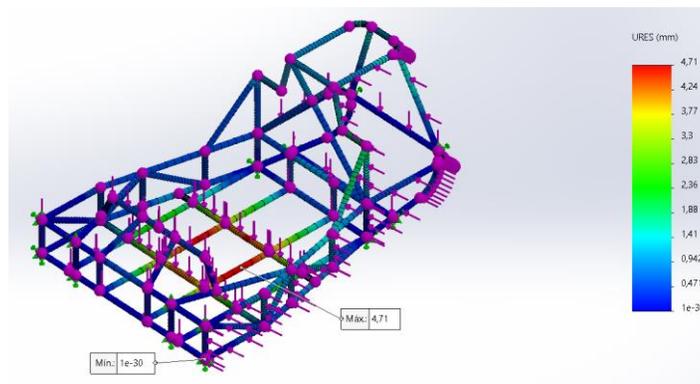
Obtención escala de deformación

La escala de deformación analiza la distancia de desplazamiento de los sectores más afectados con las cargas, la posición del esfuerzo es crucial para la determinación de la distancia de deformación, dado que afectara a la estructura con puntos más débiles.

En el caso de la estructura el punto más débil es en la mitad de la cabina dado que el piso no posee la triangulación necesaria para evitar deformación, aun así, mediante análisis por elementos de finitos se determina que la máxima escala de deformación que va a obtener la estructura es 4,71mm que pertenece a la combinación de cargas muertas, vivas y de giro que se puede visualizar en la figura a continuación, este dato se relaciona con la elongación máxima del material que es 50,8mm, esto quiere decir que el desplazamiento que se genera, está dentro del criterio normal presentado en las características del material.

Figura 63

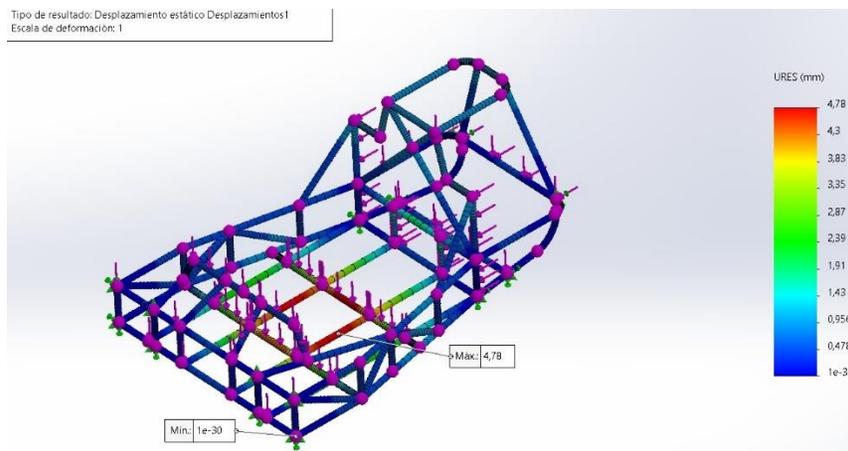
Escala de deformación de cargas M+V+G



Reiterando lo mencionado anteriormente, en la figura a continuación se puede visualizar que la deformación máxima en la estructura de 4,78mm se da en la parte central del piso de la cabina, con la combinación de cargas muertas, vivas y de frenado.

Figura 64

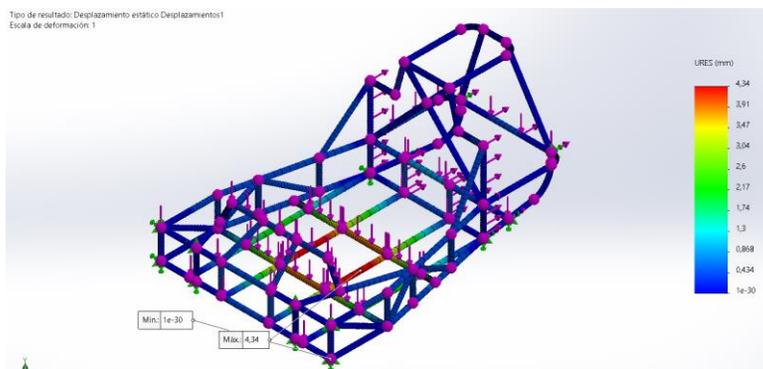
Escala de deformación de cargas $M+V+F$



En este último estudio de deformaciones, que incluye las cargas vivas, muertas y de aceleración brusca, se obtiene nuevamente la mayor deformación en la parte central de la cabina con un valor de 4,34mm, sin embargo, no es un desplazamiento crítico debido a que el desplazamiento es similar al primer mencionado de 4,74mm.

Figura 65

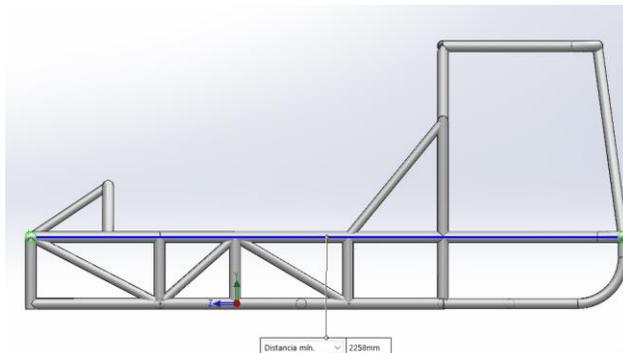
Escala de deformación de cargas $M+V+Ab$



En la normativa NTE INEN 1323 se especifica que las deformaciones presenciadas en cualquiera de los elementos de la estructura deben ser igual o menor $1/240$ veces el largo de esta.

Figura 66

Cálculo del largo de la estructura



Dado que el largo de la estructura del prototipo está dado en los 2258mm, se obtiene un valor máximo de deformación de 9,408mm, por lo que cumpliría con el requisito establecido en la normativa.

Obtención de factores de seguridad

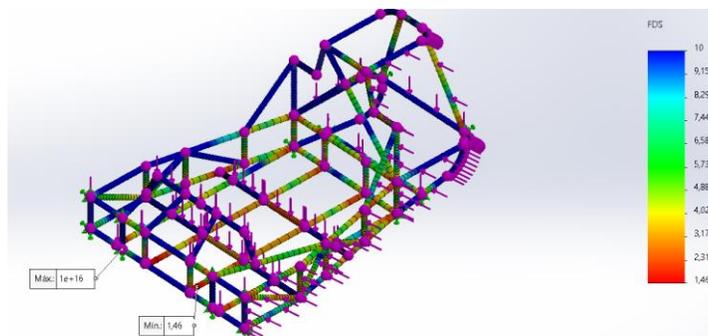
El factor de seguridad es la medida que se utiliza en el diseño de estructuras para analizar la capacidad que tiene de soportar cargas y fuerzas aplicadas en ella. Este está denominado mediante la aplicación o uso que va a tener el componente, dado que eso determina el valor de dicho factor.

La estructura posee fuerzas de menor impacto en referencia a condiciones de carga y ambientales, además que es un componente que debe cumplir la funcionalidad de movilizar a pasajeros, por ende, existen factores de importancia como es el peso que va a soportar la estructura, que en este caso son las cargas vivas haciendo referencia a los ocupantes y las cargas muertas, que refieren a los elementos no suspendidos del vehículo.

Mediante el análisis por elementos finitos con las cargas vivas, muertas y de giro se obtuvo un factor de seguridad de 1,46, que quiere decir que mantiene la funcionalidad al pasar del tiempo, además protege a los pilotos y copilotos. Entonces para la aplicación de la estructura y las fuerzas aplicadas está dentro del rango establecidos el factor de seguridad.

Figura 67

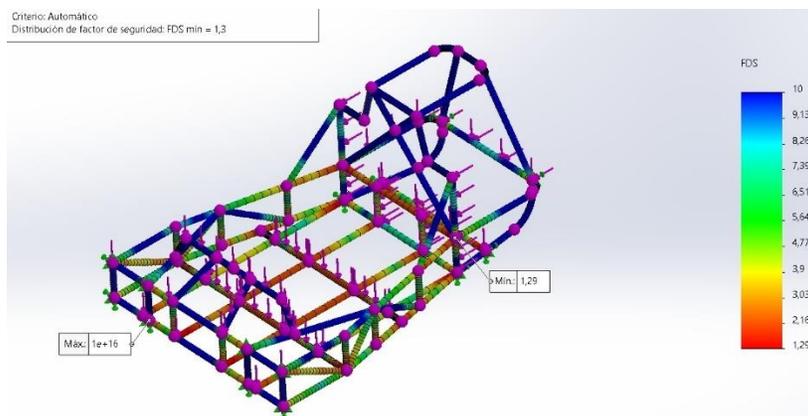
Factor de seguridad cargas V+M+G



En cuanto a la obtención del factor de seguridad cuando la estructura se encuentra sometida a la combinación de cargas vivas, muertas y de frenado, se obtiene un valor mínimo de 1,29, el cual se encuentra en el rango establecido para este diseño, asegurándonos que, al estar dentro de este intervalo aceptable, no existe un desperdicio innecesario de material.

Figura 68

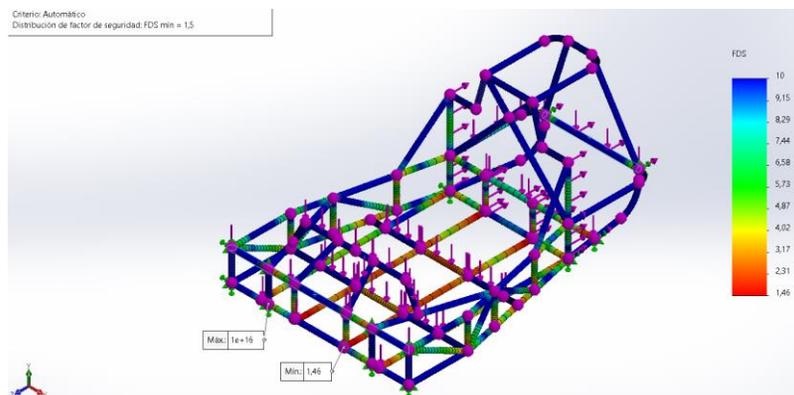
Factor de seguridad cargas V+M+F



En la combinación de cargas de vivas, muertas y de aceleración brusca el factor de seguridad se encuentra dentro del intervalo mínimo óptimo para estructuras, con un valor de 1,46, dando, asegurando así que la estructura brinda seguridad y es eficiente en su diseño.

Figura 69

Factor de seguridad cargas V+M+Ab



Ensayos no destructivos aplicados a la soldadura

Culminada la construcción de la estructura, es importante realizar la comprobación de las uniones soldadas de la misma, para garantizar que la soldadura sea de calidad y no vaya a afectar o generar problemas con el paso del tiempo o con la aplicación de esfuerzos.

En base a la Tabla 4 y considerando que en la estructura se encuentran, distintos tipos de juntas como: juntas a tope, juntas en esquina, y juntas en “T”, se ha decidido realizar dos ensayos no destructivos que nos sugiere que son aplicables para todo este tipo de juntas mencionadas, los cuales son el de líquidos penetrantes e inspección visual.

La decisión de realizar estos dos ensayos respecto a los demás existentes, es que, con la inspección visual y la prueba de líquidos penetrantes, se logra determinar la mayoría de los aspectos de discontinuidad de soldadura descritos en la Tabla 5.

Inspección visual

Para la ejecución del ensayo no destructivo conocido como inspección visual se lo realizó de una manera directa e indirecta, esto debido a que, se inspeccionó la soldadura de la estructura sin ningún instrumento y para la obtención de evidencias se utilizó un teléfono para

sacar fotos con mayor definición y lograr inspeccionar de mejor manera como se ve en la figura a continuación.

Figura 70

Suelda de la estructura



En la figura anterior, se logra visualizar la unión soldada de una de las partes de la estructura del vehículo prototipo tipo “Tumbler”, misma que es evidente que se trata de un cordón de soldadura conocido como “punto punto” o “soldadura por puntos”.

Este tipo de soldadura que se puede apreciar en la estructura del prototipo es un punto a favor, debido a que es muy utilizada en la industria automotriz, en comparación con otros cordones, este produce menos deformaciones térmicas, y tomando en cuenta que trabajamos con espesores relativamente pequeños de 1.5 mm a 3 mm, se puede concluir que el método utilizado es el correcto para la construcción del esqueleto.

Por otra parte, se puede ver que existe uniformidad en el cordón de suelda lo cual es otro punto favorable, puesto que, con la inspección visual se podría descartar discontinuidades críticas de soldadura, sin embargo, se logra visualizar enmarcado de color verde pequeños residuos de metal en forma de esferas, también conocidos como “escoria” las cuales son un subproducto inevitable de la soldadura, y muy común en la suelda por puntos, se puede concluir que no afecta significativamente la integridad estructural de la soldadura.

Líquidos penetrantes

Para la ejecución de la prueba de líquidos penetrantes se tomó una muestra de soldadura la cual se muestra en la figura a continuación, puesto a que facilita la ejecución del procedimiento.

Figura 71

Muestra de soldadura para ensayos no destructivos



Para el procedimiento del ensayo no destructivo de soldadura mediante líquidos penetrantes se siguió el método anteriormente descrito, por lo que, inicialmente, se procedió a limpiar la muestra a examinar. Esta no es una limpieza exhaustiva, por lo cual se lo hizo con un trapo limpio y un poco de agua.

Una vez limpiada la muestra a estudiar, se aplica el penetrante que se puede visualizar en la figura a continuación, el cual es de un color verde fosforescente, es importante tomar en cuenta que el líquido que se utilizó para este ensayo es un líquido penetrante visible y removible con agua.

Figura 72

Muestra de soldadura una vez aplicado penetrante



A partir de la aplicación del penetrante se esperó un intervalo de tiempo de 5 minutos, tomando en cuenta que la temperatura ambiente.

Pasados los 5 minutos de la aplicación del penetrante, se realizó una limpieza de los excesos de este existentes en los alrededores de la muestra, con el fin de verter el revelador como se muestra en la a continuación.

Figura 73

Muestra de soldadura una vez aplicado revelador



Al momento que se hecha el revelador en la muestra, se debe dejar pasar la misma cantidad de tiempo que se dejó puesto el penetrante, por lo que se esperaron 5 minutos con dicho líquido puesto en la muestra.

Concluido los 5 minutos de aplicación del líquido revelador, se procede a limpiar la muestra, a fin de visualizar las discontinuidades que serán “tintadas” debido a la reacción entre el líquido penetrante y el revelador, éstas se logran visualizar en la figura a continuación.

Figura 74

Muestra de soldadura con marcas de discontinuidad reveladas



Como se logra visualizar en la figura anterior, no existe presencia de mordeduras, ni de fisuras en la soldadura, esto debido a que no existe la presencia de marcas lineales, que son las que indican este tipo de discontinuidades, sin embargo, se logra visualizar, encerrados en color rojo, dos discontinuidades circulares o elípticas, que debido a la forma circular de la mancha se puede asumir que son porosidades, las cuales pueden ser causadas generalmente por la existencia de contaminantes o de humedad, que son las que hacen que el arco eléctrico se descomponga y estas surjan.

Los poros presentes en la soldadura son una discontinuidad muy común y de las menos riesgosas, por lo que, se puede concluir que la soldadura aplicada en la estructura del prototipo es confiable y segura.

Capítulo VI

Marco Administrativo

En este proyecto de integración curricular se detalla los recursos utilizados para realizar de forma metódica y minuciosa los procedimientos de modelado, simulación y construcción del vehículo prototipo tipo “Tumbler”, en donde el objetivo es lograr resultados confiables en los análisis de cargas y en la fabricación de este.

Recursos humanos

En el presente proyecto de integración curricular con el tema “Diseño y construcción de la estructura vehicular tubular del vehículo prototipo tipo "Tumbler"” intervienen los recursos humanos que se detallan en la tabla a continuación.

Tabla 9

Recursos Humanos

Orden	Personal	Función
1	Dueñas Narváez, José Esteban	Investigador
2	Tello Torres, Carlos Daniel	Investigador
3	Cruz Arcos, Guillermo Mauricio	Colaborador científico

Nota. Detalle de los recursos humanos empleados en el desarrollo del presente proyecto de integración curricular.

Recursos tecnológicos

En el presente proyecto de integración curricular, se utilizaron diferentes recursos tecnológicos, para el modelado y simulación de la estructura y las cargas que este sufre, detalladas en la siguiente tabla.

Tabla 10*Recursos Tecnológicos*

Orden	Nombre
1	Laptop Asus y Dell
2	Dispositivos móviles
3	Internet
4	Software CAD
5	Software CAE

Nota. Detalle de los recursos tecnológicos empleados en el desarrollo del presente proyecto de integración curricular.

Recursos materiales

Los recursos materiales fueron empleados para la construcción de la estructura vehicular tubular del vehículo prototipo tipo “Tumbler”.

Tabla 11*Recursos Materiales*

Orden	Nombre
1	Tubo 42 x 3 mm
2	Tubo 42 x 2 mm
3	Tubo 42 x 1,5 mm
4	Tubo 38 x 1,5 mm
5	Tubo 32 x 1,2 mm
6	Soldadora MIG
7	Electrodo ER70S-6
8	Amoladora

Orden	Nombre
9	Disco de corte
10	Dobladora de tubos
11	Flexómetro
12	Marcadores
13	Angulo Magnético
14	Nivel

Nota. Se detallan los recursos materiales empleados en el desarrollo del presente proyecto de integración curricular.

Presupuesto

A continuación, se detalla, el presupuesto que fue necesario para la construcción de la estructura tubular del vehículo prototipo tipo “Tumbler”,

Tabla 12

Presupuesto

Nombre	Cantidad	Valor Unitario (USD)	Valor total (USD)
Tubo 42 x 3 mm	3	35	105
Tubo 42 x 2 mm	8	30	240
Tubo 42 x 1,5 mm	1	28	28
Tubo 38 x 1,5 mm	1	25	25
Tubo 32 x 1,2 mm	1	22	22
Soldadora MIG	1	250	250
Electrodo ER70S-6	1	30	30
Amoladora	1	90	90
Disco de corte	5	10	50

Nombre	Cantidad	Valor Unitario (USD)	Valor total (USD)
Dobladora de tubos	1	60	20
Flexómetro	1	5	5
Marcadores	2	5	10
Angulo Magnético	2	15	30
Nivel	1	8	8
Total	29	613	913

Nota. Se detalla el presupuesto empleado en el desarrollo del presente proyecto de integración curricular.

Capítulo VII

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La elección del perfil estructural tubular para la construcción del vehículo prototipo tipo “Tumbler” fue de gran importancia dado que se requirió un análisis de la normativa FIA referente a la construcción de estructuras de seguridad en automóviles de competición y se consideró la disponibilidad dimensional del tubo del mercado Ecuatoriano, dando así los tubos de las siguientes dimensiones: 42 x 3mm, 42 x 2mm, 42 x 1,5mm, 38 x 1,5mm y 32 x 1,5mm, que su distribución, depende de la aplicación que ocupe en la estructura.

La implementación de los softwares CAD y CAE ha sido de gran ayuda para el diseño, proporcionando una vista detallada de la estructura, el uso de la normativa de la Fórmula SAE como guía ayudó a determinar parámetros importantes para el diseño de la estructura como las dimensiones de impacto lateral, el arco principal, el arco delantero, altura al suelo, esta normativa ayudó a obtener un diseño con las medidas de seguridad que presenta la SAE. Además, que el empleo del software permitió realizar el análisis de elementos finitos, el cual sirvió de ayuda para garantizar la eficiencia y seguridad de la estructura.

En el estudio de elementos finitos se obtuvieron tres criterios de diseño importantes, los cuales establecen la seguridad esperada de la estructura vehicular tubular del prototipo tipo “Tumbler”, previo a la realización del análisis, es necesario calcular las cargas y la combinación de las mismas mediante el método ASD, que son las fuerzas que va a soportar la estructura, estas se encuentran mencionadas en la Normativa NTE INEN 1323.

El criterio de Von Mises que es la ductilidad de un material para ceder cuando es mayor o igual al esfuerzo de tensión de un determinado material, en el caso de la estructura el material era un acero al carbono ASTM A53, el cual presenta un límite de fluencia de 228 MPa, de esta forma se puede considerar que el estudio es satisfactorio, debido a que la estructura se

encuentra dentro de la zona elástica del material, puesto a que, en ninguno de los estudios arrojó valores superiores al mencionado, los cuales fueron de 184 MPa, 117 MPa y 185 MPa correspondientes a la combinación de cargas vivas, muertas con carga de giro, frenado y aceleración bruscas, respectivamente.

La escala de deformación determina en medida de longitud cuanto ha cambiado o se ha desplazado el tubo por la aplicación de las cargas, este criterio se relaciona con la elongación del material que establece un mínimo de 50,8 mm según la normativa ASTM A 500 de grado A, por tanto, se considera que la deformación obtenida en la estructura vehicular tubular del prototipo tipo "Tumbler" no se considera crítica dado que, los valores obtenidos fueron de 4,71mm; 4,78mm y 4,34mm, así mismo cumpliendo con lo establecido en la normativa NTE INEN 1323 dando una deformación menor a 9,408mm.

El factor de seguridad, que es la capacidad que presenta un componente para resistir cargas sin fallar suele presentar un intervalo para ciertas aplicaciones en diferentes industrias, en este caso, que se trata de una estructura vehicular, establece que este rango debe ser de 1 a 1,5; por lo que, se puede concluir que el diseño de la estructura cumple con todos los requisitos para su funcionamiento seguro, debido a que en los estudios de elementos finitos con esfuerzos combinados se obtuvieron valores de: 1,46, 1,29 y 1,46 en cargas vivas, muertas, en su combinación con carga de giro, frenado y aceleración brusca, respectivamente.

La construcción de la estructura ha requerido la correcta selección del tipo de soldadura, dado que esta es la encargada de asegurar la integridad de la estructura. El tipo de proceso de soldadura escogido es GMAW debido a la alta calidad que proporciona y además un cordón de soldadura limpia el cual ayuda a la realización de la prueba de inspección visual y la de líquidos penetrantes.

Los acabados de este tipo de soldadura son bastantes agradables estéticamente el cual facilitó la prueba de inspección visual del cordón de soldadura, además el tipo de cordón es

“punto a punto” que es un método que no genera discontinuidades, solo se generan escorias que parte del proceso.

Mediante la prueba de líquidos penetrantes se presenciaron discontinuidades circulares que representan porosidades en la soldadura que son generados por factores como las impurezas y la humedad, pero la cantidad de poros que se encontraron en el cordón de soldadura son completamente comunes, lo que el tipo de soldadura escogido cumple con los estándares de seguridad y rendimiento que debe poseer la estructura.

Recomendaciones

La importancia de la selección las dimensiones de los componentes estructurales garantizan la fiabilidad dl diseño, tras el proceso de construcción y el análisis se recomienda considerar diferentes posibilidades para usar tubos de menor diámetro, realizando análisis que permitan comprender las cargas y normativas aplicadas en este tipo de vehículo, facilitando así a la elección de dimensiones optimas de los componentes estructurales.

En el mercado ecuatoriano el material predominante para la fabricación de estructuras automotrices como es las jaulas de seguridad para vehículos de competencia usa el acero al carbono soldado en frio A53 que está regulado por la ASTM A500 grado A y es el ocupado en la construcción del prototipo. Mediante análisis de elementos finitos se podrían proponer alternativas de materiales de fabricación que posean propiedades mecánicas iguales o mejores con respecto a la usada.

Finalizado el análisis de elementos finitos a la estructura se observó la falta de triangulación en la parte central del piso de la cabina debido a las deformaciones que se presentaban en ese punto, por ende, se recomienda realizar triangulación en cualquier parte de la estructura la finalidad de evitar deformaciones.

Adherirse a normativas específicas para este tipo de estructuras que son prototipos, es esencial proporcionar seguridad en la fase de diseño y fabricación. Sin embargo, se presenta inconvenientes dado que ninguna normativa vigente normaliza a los prototipos. Por tanto, es imperativo buscar y analizar diferentes regulaciones que facilitará el diseño y preverá un éxito en la fabricación.

Bibliografía

- ABRACOM. (2019 de Junio de 2016). *Discos abrasivos: tipos, clases y materiales*. Obtenido de ABRACOM : <https://www.abracom.es/es/blog/post/27-discos-abrasivos-tipos-clases-y-materiales.html>
- Aguirre, J. M. (s.f.). *Diseño Automotriz*.
- Alvarez Salazar, V. R. (2018). *Diseño y construcción de un chasis tubular de un vehículo de competencia formula SAE eléctrico*. Cuenca, Ecuador.
- Álvarez, S. (3 de Mayo de 2016). *DIARIOMOTOR*. Obtenido de <https://www.diariomotor.com/2016/05/03/monocasco-fibra-carbono-historia-mclaren/>
- American Welding Society (AWS B1. 10). (2009). *Guide for the Nondestructive Examination of Welds*.
- ASTM INTERNATIONAL. (25 de Noviembre de 2019). *Normas internacionales de ASTM*. Obtenido de ASTM INTERNATIONAL: <https://la.astm.org/es/standards/>
- Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2017). *MECANICA DE MATERIALES*. México: McGraw Hill.
- Crouse, W. H. (1996). *MOTORES DE AUTOMOVIL*. México: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. DE C.V.
- demaquinasyherramientas. (02 de Julio de 2012). *TIPOS DE ALAMBRES UTILIZADOS CON SOLDADURA MIG*. Obtenido de De maquinas y herrmientas : <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/tipos-de-alambres-utilizados-con-soldadura-mig>
- DOCTOR. (21 de Enero de 2014). *Mercado Racing*. Obtenido de Especial 4x4 y Offroad: <https://mercadoracing.com/chasis-buggy-raid-baja-ad-599360>
- Eulogio Santos De la Cruz, V. P. (2010). Dobladora de tubos. *INDUSTRIAL DATA*, 31-36.

Fernández, M. I., & Latorre, J. I. (2017). *Diseño de un chasis tubular para un carCross*.

Obtenido de Academia.edu.

FIA. (10 de 08 de 2012). *LA FIA*. Obtenido de FIA: <https://www.fia.com/es/la->

[fia#:~:text=Fundada%20en%201904%2C%20con%20sede,de%20automovilistas%20y%20a%20sus%20familias.](https://www.fia.com/es/la-fia#:~:text=Fundada%20en%201904%2C%20con%20sede,de%20automovilistas%20y%20a%20sus%20familias.)

García, A. F. (2010). *Sc.ehu*. Obtenido de Física con ordenador:

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din_rotacion/viga/viga.htm

Granados Delgado, O. E. (11 de Noviembre de 2018). *Soldadura con electrodo revestido*

(*SMAW*). Obtenido de Universidad San Tomás :

[https://repository.usta.edu.co/handle/11634/14740#:~:text=Resumen-,El%20sistema%20de%20soldadura%20SMAW%20\(Shielded%20Metal%20Arc%20Welding%20%E2%80%93%20Soldadura,base%20que%20se%20desea%20unir.](https://repository.usta.edu.co/handle/11634/14740#:~:text=Resumen-,El%20sistema%20de%20soldadura%20SMAW%20(Shielded%20Metal%20Arc%20Welding%20%E2%80%93%20Soldadura,base%20que%20se%20desea%20unir.)

Grupo Acura. (05 de Junio de 2022). *GMAW: Soldadura en acero al carbón y acero inoxidable*.

Obtenido de Grupo Acura: <https://grupoacura.com/es/blog/gmaw/#que>

Grupo Acura. (10 de Junio de 2022). *GTAW: La soldadura para unir todo tipo de materiales*.

Obtenido de Grupo Acura: <https://grupoacura.com/es/blog/gtaw/#que>

Grupo Acura. (26 de Junio de 2023). *SMAW: La soldadura más popular*. Obtenido de GRUPO

ACURA: <https://grupoacura.com/es/blog/smaw/>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (Febrero de 2009). *Repositorio UISEK*. Obtenido de

<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2671/3/001%20ANEXO%2001%20-%20norma%20tecnica%20ecuatoriana%20nte%20inen%201%20323%20-%202009.pdf>

Josyce, P. J., Hamilton, L., Forero, C., & McDonald, M. (8 de Abril de 2013). *ResearchGate*.

Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Monocoque-with-rear-space-frame-and-front-impact-attenuator-attached_fig5_296642077

Keyence. (2023). *KEYENCE CORPORATION*. Obtenido de Keyence Corporation Web Site:

<https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/measurement-selection/environment/rigidity.jsp>

Leão, L. (09 de Julio de 2020). *CAD vs CAE vs CAM*. Obtenido de E3 series :

<https://www.e3seriescenters.com/es/blog-de-ingenieria-electrica-moderna/cad-vs-cae-vs-cam-diferencias>

Máquinas Bustamante. (01 de Abril de 2022). *Descripción del proceso FCAW*. Obtenido de

Máquinas Bustamante: <https://www.maquinasbustamante.com/post/descripci%C3%B3n-del-proceso-fcaw>

Pezzo, A. M., Cavallin, B., & Actis, M. D. (2013). *Simulación y ensayo de rigidez torsional de un chasis de un vehículo todo terreno*. Recuperado el 28 de 12 de 2023, de

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/37707/documento_completo.pdf?sequence=1

Planes, F. (06 de Agosto de 2017). *El corte industrial del tubo*. Obtenido de PLANES:

<https://ferrosplanes.com/corte-industrial-tubo/>

Redondo, M. R. (2017). *Diseño y simulación de un chasis tubular para un vehículo tipo fórmula*.

Recuperado el 27 de 12 de 2023, de <http://oa.upm.es/45306>

SAE INTERNACIONAL . (20 de Septiembre de 2021). *Reglas 2022*. Obtenido de Formla SAE:

<https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=25e8885c-7397-4b2d-93b3-fc404960bab1>

TECNOCURVE. (16 de Marzo de 2020). *Corte láser* . Obtenido de TECNOCURVE:

<https://www.tecnocurve.es/laser-tubo-es/importancia-del-corte-laser-en-el-mecanizado-curvado-y-rolado-de-tubos/>

THE FABRICATOR . (16 de Diciembre de 2016). *Fundamentos de la sierra de cinta*. Obtenido

de THE FABRICATOR :

<https://www.thefabricator.com/thefabricatorenespanol/article/shopmanagement/fundamentos-de-la-sierra-de-cinta-5-claves-para-un-buen-corte>

THE FABRICATOR. (18 de Abril de 2018). *¿La soldadura por arco sumergido (SAW) es el proceso adecuado para usted?* Obtenido de FABRICATOR:

<https://www.thefabricator.com/thefabricatorenespanol/article/arcwelding/-la-soldadura-por-arco-sumergido-saw-es-el-proceso-adecuado-para-usted->

Truckly, F. (26 de Abril de 2010). *Sierra circular de corte en frío*. Obtenido de THE FABRICATOR :

<https://www.thefabricator.com/thefabricatorenespanol/article/sawing/sierra-de-cinta-o-sierra-circular-de-corte-en-frío>

Union Steel Industry. (2023). *ASTM Grado A*. Obtenido de Union Steel Industry Co.:

https://www.union-steels.com/es/standards_detail/astm-a500-grade-a.html#:~:text=ASTM%20A500%20Grado%20A%20es,como%20excelentes%20propiedades%20de%20resistencia

Webmaster. (24 de Julio de 2019). *Métodos básicos de doblado de tubos* . Obtenido de CENSA INDUSTRIAL: <https://censaindustrial.com/metodos-basicos-de-doblado-de-tubos/>

Zambrano, J. (Abril de 2015). *Elaboración de una guía de inspección de soldadura y calificación de soldadores aplicado a las normas ASME BPVC y API 1104*. Quito, Ecuador.

ANEXOS