UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL BASTIDOR DE UN VEHÍCULO PROTOTIPO FÓRMULA LONCIN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: BRANDON JOEL CARRERA ROBLES
EDGAR PAÚL SÁNCHEZ GALLO

TUTOR: CARLOS DAVID ÁLVAREZ BASANTES

Quito - Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Brandon Joel Carrera Robles con documento de identificación N° 1718906314 y Edgar Paúl Sánchez Gallo con número de identificación N°1716208630 manifestamos que:

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

Quito, 21 de febrero del año 2025

Atentamente,

Brandon Joel Carrera Robles
1718906314

Edgar Paúl Sánchez Gallo
1716208630

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

Nosotros, Brandon Joel Carrera Robles con documento de identificación N° 1718906314 y yo Edgar Paúl Sánchez Gallo con número de identificación N°1716208630, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: "Optimización estructural del bastidor de un vehículo prototipo Fórmula Loncin mediante el método de elementos finitos ", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Automotrices, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 21 de febrero del año 2025

Atentamente,

Brandon Joel Carrera Robles
1718906314

Edgar Paúl Sánchez Gallo
1716208630

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos David Álvarez Basantes con documento de identificación N°0604240796, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL BASTIDOR DE UN VEHÍCULO PROTOTIPO FÓRMULA LONCIN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, realizado por Brandon Joel Carrera Robles con documento de identificación N°1718906314 y por Edgar Paúl Sánchez Gallo con número de identificación N°1716208630, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción: Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 21 de febrero del año 2025

Atentamente,

_____

Ing. Carlos David Álvarez Basantes, MI.
0604240796

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mi hija Kailani, por ser mi motivación para levantarme todos los días y el querer salir adelante pese a cada obstáculo.
A mis padres por haberme guiado a lo largo de mi vida, por haberme motivado a seguir adelante con todo proyecto que me he planteado y sobre todo por nunca dejarme solo.
A mi amigo José porque pese a la distancia y al tiempo sin vernos, me ha demostrado ser un amigo leal y siempre estar pendiente de mí.
Pero sobre todo a mi hermano por ser mi mejor amigo y ser mi modelo a seguir, quien cuido de mi desde que era un niño y cuida de mí aún en mi adultez.

Brandon Carrera

Dedico este proyecto a mis padres Juan y Carmen, quienes me han inculcado a lo largo de mi vida los valores necesarios para seguir adelante, los mismo que han sido fundamentales para que pueda llevar a cabo este proceso formativo con éxito.

A mi novia Dra. Danela Coral quien con su apoyo incondicional me enseñó que aún en las peores batallas siempre existe un buen motivo para salir adelante y ser siempre mejor.

Mis hermanas Doris y Sylvia que siempre creyeron en mí y me apoyaron con sus detalles; mi mejor amigo Ing. David Cevallos, quien me entregó la pauta para poder asumir este reto que mejoró mi perfil profesional y mi vida en general.

Paúl Sánchez

AGRADECIMIENTO

Mis sinceros agradecimientos a mis padres y a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida y darme la fortaleza de seguir adelante.

A los ingenieros de la carrera de Ingeniería Automotriz por brindarme el conocimiento necesario para culminar esta etapa profesional.

A mi hermano por motivarme cada día a realizar mis tareas y cumplir con mis obligaciones como estudiante, hijo y hermano.

A mis compañeros que me acompañaron a lo largo de toda la carrera y me han sabido obsequiar su tiempo con risas a pesar de los buenos y malos momentos.

Gracias.

Brandon Carrera

En primer lugar, doy gracias a Dios que me ha permitido llegar a esta etapa, y me dio la fuerza para poder culminar mi carrera.

A mi novia Dra. Danela Coral, quien ha sido incondicional, la motivación para alcanzar este sueño donde siempre anhelado verme en lo más alto.

A mis padres y hermanas que siempre estuvieron para mí; los ingenieros quienes se tomaron el tiempo y nos brindaron el asesoramiento para garantizar que este proyecto se ejecutara con precisión y profesionalismo, quienes se esfuerzan continuamente para garantizar que el programa de Ingeniería Automotriz mantenga un alto nivel de excelencia y calidad entre sus alumnos.

A mis amigos y hoy colegas que siempre nos supimos brindar apoyo para seguir adelante a través de risas, buenos y malos momentos, aportaron una perspectiva diferente a los problemas.

Al resto de personas que siempre me desearon lo mejor y que me supieron dar su apoyo para que siga adelante.

Gracias.

Paúl Sánchez.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN 1
ABSTRACT 2
INTRODUCCIÓN 3
PROBLEMA 5
OBJETIVOS 6
Objetivo General 6
Objetivos Específicos. 6
MARCO TEÓRICO 7
DISTRIBUCIÓN DE PESO 11
Distribución de peso 50/50 11
Distribución de peso 40/60 11
ÁNGULO DE ATAQUE O RAKE. 12
Límite elástico 12
Límite plástico 12
Esfuerzo de Von Misses 13
Deformación Total 13
Factor de seguridad 13
CAPÍTULO 1 14
1. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS SOBRE BASTIDORES EN COMPETENCIAS AUTOMOVILÍSTICAS. 14
1.1. Diseño y optimización de bastidores en competencias SAE. 14
Bastidores para competición SAE 14
Materiales utilizados 14
Rigidez torsional y distribución de cargas. 14
Seguridad estructural 15
Validación de modelo 15
CAPÍTULO 2: 16
2. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES ESTRUCTURALES DEL BASTIDOR TIPO FÓRMULA LONCIN (METODOLOGÍA) 16
2.1. Materiales 16
2.2. Determinación del material. 18
CAPÍTULO 3 21
3. DIBUJO Y DISEÑO DEL BASTIDOR TIPO FÓRMULA LONCIN APOYADO EN SOFTWARE DAC. .. 21
3.1. Generación del plano 21

Creación de perfiles de tubería. 21
Selección de materiales y perfiles: 22
Corrección de uniones 22
Ajustes de geometría: 22
Uniones soldadas: 23
Validación de Modelo 23
Visualización y ajustes 24
4. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE FUERZAS SOBRE EL BASTIDOR 25
4.1. Cálculos de esfuerzos y Fuerzas 25
Condiciones iniciales 25
Resolución 26
Cálculo de fuerzas dinámicas en condición de aceleración. 29
5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL BASTIDOR 31
5.1. Agregar material a librería 31
Material 31
Editar material 32
Material Personalizado 32
Nueva categoría 32
Acero para uso 33
Introducir propiedades de material 33
Material agregado 34
5.2. Establecer cargas 35
5.3. Convergencia de malla 35
5.4. Análisis de Esfuerzo en los dos ejes 36
6. Análisis de Desplazamiento en los dos ejes (Deformación) 38
Factor de Seguridad en ambos ejes 39
..... 39
7. Análisis de resultados 40
6. REDISEÑO DE BASTIDOR 43
6.1. Análisis de deficiencias del bastidor 43
Soldaduras defectuosas 43
Juntas mal colocadas 43
Diferentes diámetros de tuberías 44
6.2. Justificación de Cambio de Material 45

6.3. Proceso de rediseño 46
Objetivos del rediseño 46
6.4. Resultados esperados: 46
7. SIMULACIÓN DE CARGAS Y ESFUERZOS EN BASTIDOR REDISEÑADO. 47
7.1. Especificaciones de material 47
7.2. Cargas aplicadas y Condiciones de Frontera 47
Eje delantero 47
Eje trasero 47
7.3. Modelado DAC y preparación del análisis en SolidWorks. 48
7.4. Aplicación de cargas 48
7.5. Restricciones y Resultados de carga. 48
7.7. Resultados del análisis de elementos finitos 49
Eje delantero 50
Eje trasero 51
Análisis torsional 52
7.8. Comparación de resultados frente al bastidor original 55
CONCLUSIONES 57
RECOMENDACIONES 59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60
ANEXOS. 7-2

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Materiales y equipos utilizados 16
Tabla 2.2: Resultados de pruebas 17
Tabla 2.3: Medidas de los perfiles de las tuberías en el bastidor 19
Tabla 2.4: Propiedades mecánicas del Acero AISI-4000 20
Tabla 2.5: Lista de masas aproximadas de los componentes y piloto. 20
Tabla 5.1: Convergencia de malla. 35
Tabla 5.2: Propiedades de malla de SolidWorks 36
Tabla 5.3: Resultados de simulación de bastidor. 41
Tabla 7.1: Análisis de convergencia de malla 48
Tabla 7.2: Resultados de simulación en bastidor rediseñado. 54
Tabla 7.3: Tabla comparativa entre bastidor rediseñado y bastidor original. 56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Espectrómetro metalúrgico. 17
Figura 3.1: Uniones sobrepasadas 22

Figura 3.2: Corrección de uniones 23
Figura 3.3: Uniones soldadas del bastidor 23
Figura 3.4: Masa del bastidor en SolidWorks 24
Figura 4.1: Datos de entrada para cálculo 25
Figura 4.2: Cálculo de radio efectivo de neumáticos 26
Figura 4.3: Cálculo de la velocidad máxima limitada por el motor 27
Figura 4.4: Cálculo de fuerzas totales 28
Figura 4.5: Cálculo de fuerzas estáticas en eje delantero y trasero 29
Figura 4.6: Cálculo de fuerzas dinámicas de tracción debido a aceleración 29
Figura 4.7: Cálculo de fuerza estática en eje delantero con factor de seguridad 30
Figura 4.8: Cálculo de fuerza dinámica en el eje trasero con factor de seguridad 30
Figura 5.1: Material en barra de tareas de SolidWorks 31
Figura 5.2: Edición de material en SolidWorks 32
Figura 5.3: Personalizar material en SolidWorks 32
Figura 5.4: Agregar nueva categoría en SolidWorks 32
Figura 5.5: Acero AISI 4000 para uso en SolidWorks 33
Figura 5.6: Introducción de propiedades mecánicas de material en SolidWorks 33
Figura 5.7: Material creado en SolidWorks 34
Figura 5.8: Gráfico de convergencia de malla 35
Figura 5.9: Resultados de Tensión en el eje delantero con carga estática de 893N 36
Figura 5.10: Resultados de Tensión en el eje trasero con carga dinámica de 1655N 37
Figura 5.11: Resultados de torsión con cargas diagonales en eje delantero de 893N y eje trasero de 1655N 37
Figura 5.12: Resultados de desplazamiento en el eje delantero con carga estática de 893N 38
Figura 5.13: Resultados de desplazamiento del eje trasero con carga dinámica de 1655N 38
Figura 5.14: Resultados de desplazamiento con cargas diagonales. 39
Figura 5.15: Resultados de Factor de Seguridad con carga en el eje delantero 39
Figura 5.16: Resultados de factor de seguridad en eje trasero con carga dinámica 40
Figura 5.17: Resultados de Factor de Seguridad con cargas diagonales. 40
Figura 6.1: Ejemplo de junta que no cumple triangulación. 44
Figura 6.2: Corrección de junta con triangulación. 44
Figura 6.3: Ejemplo de tuberías de diferentes diámetros 45
Figura 6.4: Tubería de los mismos diámetros 45
Figura 7.1: Convergencia de malla 49
Figura 7.2: Masa total del bastidor rediseñado 49
Figura 7.3: Resultado de simulación de torsión en eje delantero de 893N 50
Figura 7.4: Resultados de Desplazamiento en el eje delantero con fuerza de 893N 50
Figura 7.5: Resultados de Factor de seguridad en el eje delantero con fuerza de 893N 51
Figura 7.6: Resultados de tensión en el eje trasero con fuerza de 1655N 51
Figura 7.7: Resultados de Desplazamiento en el eje trasero con fuerza de 1655N 52
Figura 7.8: Resultados de Factor de Seguridad en el eje trasero con fuerza de 1655N 52
Figura 7.9: Resultados de tensión con cargas diagonales 52
Figura 7.10: Resultados de desplazamiento con cargas diagonales 53
Figura 7.11: Resultados de Factor de Seguridad con cargas diagonales 54

RESUMEN

El presente proyecto está centrado en la optimización estructural de un bastidor prototipo Fórmula Loncin, mediante el análisis y rediseño enfocado en la reducción de peso y mejora del desempeño estructural.

La metodología para usar inicia con el Modelado DAC (Diseño asistido por computadora), del bastidor original, replicando con precisión su geometría. Posteriormente, se realizarán análisis estáticos en el software SolidWorks para evaluar las distribuciones de esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad bajo condiciones de carga reales.

Con base en resultados obtenidos, se procederá a un rediseño, se identificarán áreas del bastidor que son susceptibles a reducción de material, así como otras que sin comprometer su rigidez ni resistencia pueden ser mejoradas. Este nuevo diseño será sometido a las mismas pruebas en software para evaluar el impacto de la optimización en términos de peso reducido, desempeño estructural y ventajas operativas.

El trabajo concluye con un análisis comparativo entre el bastidor original y el optimizado, demostrando la viabilidad del rediseño en términos de eficiencia, seguridad y cumplimiento de requisitos funcionales.

Palabras Claves: Optimización estructural, Bastidor, Fórmula Loncin, DAC, Análisis estático, Rigidez, Desempeño, Factor de seguridad.

ABSTRACT

The present project focuses on the structural optimization of a Formula Loncin prototype frame through analysis and redesign aimed at reducing weight and improving structural performance.

The methodology begins with CAD modeling (Computer Aided Design), of the original frame, accurately replicating its geometry. Subsequently, static analyses will be conducted using SolidWorks software to evaluate stress distributions, deformations, and safety factor under real load conditions.

Based on the results obtained, a redesign will be conducted to identify areas of the frame that are susceptible to material reduction without compromising rigidity or strength. This new design will be subjected to the same computational tests to assess the impact of optimization in terms of reduced weight, structural performance, and operational advantages.

The study concludes with a comparative analysis between the original frame and the optimized one, demonstrating the feasibility of the redesign in terms of efficiency, safety, and compliance with functional requirements.

Keywords: Structural Optimization, Frame, Formula Loncin, CAD, Static analysis, Rigidity, Performance, Safety Factor.

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo la Fórmula 1 se ha establecido como el deporte de la categoría máxima en el ámbito automotriz, y para llegar tan alto los procesos de entrenamiento y calificación de pilotos como de sus vehículos deben cumplir con los más altos estándares de preparación y calidad. En el transcurso de este proceso e ingreso a este fascinante mundo existen varias alternativas de formación y entre ellas en el ámbito amateur se encuentra la Fórmula Loncin que buscaba fomentar la conducción temprana de pilotos en monoplazas, la innovación, aprendizaje práctico y el desarrollo de nuevas competencias técnicas en ingeniería automotriz que centra sus esfuerzos y dedicación en el diseño, la optimización y fabricación de monoplazas con motores mono cilíndricos de combustión interna de la marca Loncin del cual proviene su nombre así como la fabricación de bastidores tubulares.

Al ser una categoría abierta de preparación no cuenta con una amplia documentación de reglamento estandarizada, pero se tomará como base los principios generales de categorías similares como la Fórmula SAE.

La optimización del bastidor de un vehículo prototipo fórmula Loncin busca usar la menor cantidad de material y que ofrezca una resistencia igual o superior, sin comprometer la seguridad del piloto, de tal manera el proyecto se estructurará en tres fases:

Primero con la línea de investigación abarcando una revisión exhaustiva del bastidor original tomando medidas, analizando su geometría y material del que está compuesto. La segunda fase se centrará en el modelado mediante un software de simulación de modelado asistido por computadora (DAC), para una representación del bastidor en 3D. Finalmente, la tercera fase consiste en la simulación mediante elementos finitos, para esto se usará el software SolidWorks, para la posterior evaluación de resultados.

El presente trabajo se lleva a cabo debido a que el bastidor usado en el vehículo presenta un peso excesivo, lo que impacta negativamente en el desempeño dinámico al comprometer parámetros claves como la potencia, torque y la eficiencia en el consumo de combustible.

Se observa que el bastidor no está sujeto al cumplimiento de un reglamento específico, dado a que la Fórmula Loncin carece de una normativa técnica regulada. Sin embargo,

su diseño se fundamentará en el análisis de proyectos existentes que emplean diferentes configuraciones de triangulación en bastidores tubulares.

Se realizará un análisis detallado de las solicitaciones mecánicas y las ineficiencias estructurales inherentes en el diseño del bastidor usado. Posteriormente, se procederá a un rediseño mediante herramientas de modelado asistido por computadora (DAC), orientado a una mejora de configuración geométrica óptima que maximice su rigidez específica y minimice su masa. El modelo optimizado al igual que el bastidor usado serán sometidos a un análisis avanzado mediante el método de elementos finitos, con el fin de evaluar la distribución de tensiones y deformaciones con el propósito de asegurar que el modelo optimizado cumpla con requisitos estructurales y operacionales.

PROBLEMA

En el mundo de la competencia en monoplaza, el peso del vehículo es uno de los factores más importantes, por lo tanto, una optimización en el bastidor representa un desplazamiento en su masa inercial, debido a las nuevas tecnologías se llevará a cabo el modelado y simulación para una optimización en el bastidor.

La propuesta de optimización del bastidor, teniendo en cuenta que el peso actual del bastidor es de **(52.15kg),** se presenta un desafío para lograr reducir el peso en un porcentaje significativo. Un exceso de peso impacta negativamente a diversas variables de rendimiento como la maniobrabilidad, la velocidad punta y la eficiencia de consumo de combustible (Monge Francés, 2017). Se plantea corregir fallas en el diseño anterior, que provocan un desgaste mayor en componentes mecánicos y por ende estos tienen menor vida útil debido a la fricción y a las cargas aplicadas sobre la superficie de contacto, y afecta a elementos críticos como los rodamientos, bujes, engranajes y ejes.(Baltasar, 2016a)

El exceso del peso reduce capacidad de aceleración y velocidad máxima, aumenta el consumo de combustible y esto afecta el tiempo en pista antes de requerir repostaje. Estudios requieren que una reducción del 10% en el peso del vehículo puede resultar en un ahorro de combustible del 5% al 7%. (Manso Agundez, 2019).

Se ha desarrollado un enfoque sobre la eficiencia de la simulación tratando de llevar la eficiencia al máximo posible, con la finalidad de que el bastidor sea más eficiente con su nuevo peso y material y aprovechando que no se rige a un reglamento debido a su inexistencia.

OBJETIVOS

Objetivo General.

Optimización estructural del bastidor de un vehículo prototipo Fórmula Loncin mediante el método de elementos finitos.

Objetivos Específicos.

- Caracterizar las condiciones estructurales del bastidor tipo formula Loncin, para obtener las dimensiones reales de partida y permita relacionar prototipos futuros.
- Dibujar y rediseñar el bastidor tipo Formula Loncin apoyado en software DAC, para visualizar el prototipo en 3D y con alta precisión.
- Analizar y simular mediante el método de elementos finitos los resultados estructurales bajo condiciones de trabajo, impacto y volcamiento.
- Proponer alternativas de diseño optimizadas mejorando la resistencia y el peso de la estructura.

MARCO TEÓRICO

El CHASIS

El chasis constituye el núcleo estructural de un vehículo, proporcionando una base sobre la que es ensamblada y se fijan todos los componentes, esto incluye la suspensión, el tren motriz y carrocería. La función del chasis es soportar y distribuir uniformemente cargas y esfuerzos dinámicos y estáticos que son generados durante la conducción y más en un vehículo de competencia. (Cagigas Quintana, 2023).

Según (SAE INTERNATIONAL, 2024), un chasis diseñado correctamente mejora el rendimiento del vehículo y juega un papel importante en la seguridad del piloto, debido a que absorbe y disipa la energía en caso de colisión. El chasis monoplaza absorbe hasta 30% de la energía en caso de impacto.

Según la normativa SAE, para la creación de un chasis se debe tener en cuenta los siguientes criterios:

- La elección de un material correcto para la resistencia, rigidez y la capacidad de absorción de energía, comúnmente SAE recomienda aleaciones de aluminio y aceros de alta resistencia
- Materiales livianos que contribuyan a la eficiencia energética y al rendimiento dinámico del vehículo.

Para la fabricación de un chasis se lo realiza mediante técnicas de unión, las más comunes son la soldadura y el remachado, la calidad de estas uniones, que al igual que los pasos anteriores se rigen mediante la Fórmula SAE, la cual dicta que las soldaduras no deben tener defectos de porosidad, grietas y quien realice el proceso de soldadura se encuentre certificado.

Un chasis en competición se habla de un elemento esencial que mantiene al piloto seguro, en su mayoría se debe a su diseño en cuanto a materiales y perfiles. En la competición se busca lograr una deformación programada en zonas de impacto, de esta manera cuando ocurra un accidente o impacto, la energía que llegue al piloto sea la mínima.

Para la competición han surgido dos tipos de chasis, los monocasco y los tubulares:

- Los monocasco son aquellos que integran el chasis a la carrocería.

- Los chasis tubulares, generalmente son construidos por secciones rectangulares, que permite una fabricación más sencilla y se usan de manera habitual en la competición debido a su resistencia a la torsión.

Un chasis óptimo considera la rigidez, el peso y el espacio, que en competiciones inferiores a la Fórmula 1 se utiliza mayormente bastidores convencionales, reforzadas con estructuras convencionales internas.

Con la ayuda de software de diseño asistido por computadora y la simulación por elementos finitos los bastidores buscan amortiguar impactos en colisiones frontales, buscando que la mayoría de la energía en un choque sea absorbida por el bastidor y no vaya al piloto. (Valenzuela et al., 2013)

FÓRMULA LONCIN

La competición Loncin es un concurso entre universidades de todo el mundo que se realiza anualmente en distintos países de América latina como: México, Colombia, Argentina y Perú. Siendo México el pionero de esta competición al tener gran actividad.

Esta competencia lleva a un desafío a los ingenieros automotrices, debido a que los vehículos que se construyen son de bajo costo y con un motor de motocicleta Loncin de 150cc como versión estándar.

La fórmula Loncin no dispone de una fecha específica de su creación, pero surgió en América latina en búsqueda de una alternativa más económica en comparación a la Fórmula SAE. No existe un registro oficial a acerca de cuando fue la primera competencia de Fórmula Loncin, pero ha ganado popularidad en la última década, sobre todo en México y Colombia. (Vicente Álvarez, 2018)

El motor que se utiliza en esta competición es fabricado por Loncin Motor Corporation, que es una empresa de origen chino fundada en 1993 que produce motores, motocicletas, entre otros.

Esta categoría no consta de reglamento oficial que sea regido internacionalmente, este reglamento es establecido por los organizadores de la competencia en cada país o región. A diferencia de la Formula SAE que si cuenta con un reglamento estandarizado internacionalmente. (Tejada Castillo, 2019)

A demás no se encuentra administrada por una entidad, lo que permite una mayor flexibilidad en comparación a la Fórmula SAE, permite a los organizadores ser menos estrictos debido a que el objetivo es fomentar la participación con recursos limitados y hacer que la competición sea accesible, ya que si se compara a la Fórmula SAE, la Fórmula Loncin fomenta el interés automotriz en regiones donde la SAE es económicamente inalcanzable; Aunque es una competencia económica, se mantienen normas básicas de seguridad y criterios técnicos que aseguren que los vehículos sean funcionales y seguros para el piloto. Esta competición habla sobre las habilidades y conocimiento que los estudiantes adquieren como el diseño, simulación, fabricación, gestión de proyectos y muy importante el trabajo en equipo.

MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

El método de elementos finitos es una técnica numérica que se utiliza para obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales que modelan problemas físicos complejos. A diferencia de una solución analítica de ecuaciones diferenciales que es factible en geometrías básicas y simples, El método de elementos finitos permite analizar sistemas complejos. (Guzmán, 2020).

Para esto en lugar de resolver el problema entero, se realiza la división de la geometría en varios subdominios que en el programa de simulación se lo llama malla, para resolver un sistema de ecuaciones para un conjunto de datos, es posible resolverlas analíticamente si están son simples o si se habla de una geometría sencilla.

Según (Azevedo, 2003), el uso de elementos finitos reduce en un 70% el tiempo de análisis estructural en comparación a los métodos tradicionales de solución analítica, el método de elementos finitos mantiene un error que no sobrepasa un 5%. A demás la resolución de ecuaciones diferenciales de segundo orden en estructuras complejas puede requerir horas o días, el método de elementos finitos se puede completar en minutos u horas dependiendo de la geometría. Por estas razones el método de elementos finitos en indispensable para el diseño y optimización de bastidores.

En los elementos finitos se encuentran varios tipos como: Elementos Unidimensionales (1D), Bidimensionionales (2D), Tridimensionales (3D), para lo cual en esta investigación se utilizará el elemento finito Tridimensional debido a que se

trabajará en un modelo tridimensional y en una estructura compleja para lo cual este tipo de elemento es el ideal.

MALLADO

El mallado es el proceso donde se divide una geometría compleja en un conjunto de elementos más pequeños y simples que conforman la misma geometría. Estos elementos pequeños adquieren varias formas, ya sea triangular, cuadrados, hexaedros, etc. (Orellana et al., 2019).

El mallado es importante debido a que cuando existen elementos más pequeños, estos se ajustan de mejor manera a geometrías irregulares. A demás que ayuda a visualizar como se distribuyen las fuerzas, desplazamientos y cargas en el modelo. (Azevedo, 2003)

Existen varios tipos de malla entre las cuales se nombra: Mallado estructurado, Mallado no estructurado y Mallado híbrido, cada uno de estos tiene sus aplicaciones, en cuanto al modelado de bastidores, según (Gómez & Pineda, 2024), recomienda un mallado no estructurado debido a que se adapta a las formas irregulares del bastidor y a la capacidad de adaptación que se tiene para geometrías complejas.

Otro parámetro que el Software permite variar es el tamaño de mallado, el cual en el SolidWorks permite un tamaño fino y grueso. Para el bastidor se utilizará un mallado fino, aunque este mallado consume mayores recursos computacionales y suele tomar más tiempo, los cálculos tienen mayor precisión. (Gonzáles et al., 2019)

CHASIS TUBULAR

El chasis tubular es una estructura básica compuesta por tubos de perfiles redondos o cuadrados, el chasis tubular es soldado entre sí y se presenta como estructura robusta, su función es soportar las cargas estáticas y dinámicas, de la misma manera debe soportar resistencias mecánicas, pero sobre todo debe salvaguardar la seguridad del piloto en caso de colisión. (Cañizares, 2024)

Un chasis tubular es visto en varias competencias fuera de la Loncin, un ejemplo claro es la SAE, que en su reglamento establece bastidores tubulares para su competencia, debido a su peso relativamente bajo, sencilla construcción con suelda y un mayor espacio interior para el piloto, aunque la soldadura también puede ser una

desventaja debido a que requiere conocimiento y experiencia debido a que la integridad del piloto depende de este trabajo. (Cuenca & Jara, 2022a)

DISTRIBUCIÓN DE PESO

La distribución de peso en un vehículo es fundamental para determinar su comportamiento dinámico, afectando aspectos como estabilidad, la tracción y maniobrabilidad.

Distribución de peso 50/50

Se refiere a una distribución, donde el 50% del peso recae sobre el eje delantero y el 50% sobre el eje trasero, comúnmente usado con vehículos con motor central o delantero y de tracción trasera. (BMW, 2022)

Esta configuración ofrece ciertas ventajas:

- Proporciona un equilibrio óptimo, mejorando la estabilidad y permitiendo una conducción más cómoda.
- Facilita una buena respuesta en curvas, reduciendo el subviraje y el sobreviraje, otorgando más confort al conductor.

Por otro lado, también existen desventajas:

- Durante aceleraciones y frenado bruscos, la distribución de peso varía afectando de manera temporal al equilibrio.

Distribución de peso 40/60

Una configuración de este tipo sitúa el 40% del peso en el eje delantero y el 60% en el eje trasero, es una típica configuración en vehículos con motor y tracción traseros. (BMW, 2022)

Esta configuración ofrece ciertas ventajas:

- El mayor peso en el eje trasero otorga mayor tracción durante una aceleración, especialmente en superficies secas.
- Usada de manera habitual en autos deportivos y de competición por la capacidad de mejorar la salida en curvas.

Por otro lado, esta configuración también es susceptible a:

- Provocar que la parte trasera del vehículo tienda a deslizarse hacia afuera en curvas, requiriendo un mayor control del piloto en estas secciones.

- En frenadas intensas, al tener menor carga en el eje delantero se ve comprometida la dirección y la estabilidad del vehículo.

La distribución de peso en un vehículo de competencia es uno de los aspectos más críticos para maximizar el rendimiento, la estabilidad y la eficiencia en pista. El equilibrio de masas afecta a la tracción, la respuesta en curvas y le frenado, lo que hace necesario un diseño estructural que contemple la correcta distribución de componentes principales.

ÁNGULO DE ATAQUE O RAKE.

El ángulo de rake es una referencia a la inclinación longitudinal del bastidor de un vehículo, donde la parte trasera es más alta que la delantera. Este ángulo es comúnmente usado en vehículos de competencia, siendo este más usado en la Fórmula 1, teniendo esta configuración implicaciones en la dinámica vehicular. (Godoy et al., 2007)

El término "rake" es utilizado para describir la inclinación del bastidor respecto al suelo. Un ángulo de rake positivo implica que la parte trasera del vehículo está elevado en comparación con la delantera. Este diseño afecta a la distribución de flujo de aire debajo del vehículo, otorgando carga aerodinámica y estabilidad.

ANÁLISIS DE SIMULACIÓN

Para entender los resultados que se obtendrán en la simulación se deben tener en cuenta varios conceptos que ayudaran a evaluar la geometría y la integridad del bastidor.

Límite elástico

El límite elástico de un material es aquel punto de esfuerzo máximo que puede soportar un material sin sufrir deformaciones. Cuando la carga que se aplica es retirada del material, este vuelve a su forma original. Este límite es de gran importancia para evitar daños estructurales. (Baltasar, 2016b)

Límite plástico

El límite plástico marca el inicio de la deformación permanente. Cuando el esfuerzo supera el límite elástico, el material ingresa en la región plástica, en esta región las deformaciones persisten incluso después de que la carga sea retirada del material. (Macías, 2019)

Esfuerzo de Von Misses

Es utilizado para evaluar si un material cederá a fallar bajo alguna condición de carga específica y compleja. Esta es una medida equivalente que resulta de las tensiones principales en un material a probar.

Según (SAE INTERNATIONAL, 2024b), el esfuerzo máximo permitido no debe exceder el límite elástico del material utilizado.

Deformación Total

La deformación total hace referencia a la cantidad total de desplazamiento que experimenta un componente bajo las cargas aplicadas. En el análisis estático a realizar se busca determinar si las deformaciones cumplen o afectan a la integridad estructural del vehículo.

Para la deformación total, según (SAE INTERNATIONAL, 2024b) rige que la deformación total no debe exceder valores que comprometan la seguridad. En el caso del bastidor, hay un límite de deformación de 25mm en áreas críticas. La fórmula SAE acepta las deformaciones elásticas, debido a que el material recupera su forma una vez la carga sea retirada. En el caso de las deformaciones plásticas se deben evitar, ya que estas llevan al fallo del bastidor.

Factor de seguridad

El factor de seguridad es una relación que compara la resistencia del material con las cargas aplicadas. Es un parámetro clave para asegurar que la estructura soportará las cargas aplicadas durante la simulación y posteriormente en la vida real.

Según la (SAE INTERNATIONAL, 2024b), el bastidor debe tener un factor de seguridad de al menos 1.2. El factor de seguridad se aplica en Esfuerzos y Deformaciones, esto asegura que el material y el diseño no falle en las condiciones de la simulación que el vehículo podría experimentar.

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS SOBRE BASTIDORES EN COMPETENCIAS AUTOMOVILÍSTICAS.

El diseño de bastidores es un componente crítico en el desarrollo de vehículos de competencia, abarca competencias importantes como la Fórmula SAE, carreras de Kartings, en la última década debido a las innovaciones tecnológicas y los nuevos enfoques en diseño han permitido la creación de bastidores más livianos y con mayor rigidez.

1.1.Diseño y optimización de bastidores en competencias SAE.

Las competencias SAE han servido de plataforma para innovar en el diseño de bastidores, ha impulsado el desarrollo de vehículos más eficientes. Estudios recientes se han centrado en la optimización de estructuras a través del análisis de elementos finitos (FEA), esto permite una reducción de masa y un aumento de rigidez torsional. (Arteaga et al., 2015).

Bastidores para competición SAE

El diseño de bastidores en competencias SAE de combustión se centra en alcanzar una relación entre rigidez y peso, para esto se utiliza la simulación por elementos finitos (FEA). Según (Cuenca & Jara, 2022) demostraron que aplicaciones de aluminio en bastidores pueden reducir hasta un 15% el peso del bastidor, sin comprometer la seguridad del piloto.

Materiales utilizados

El uso de aleaciones de acero o el más común en Fórmula SAE el aluminio 6061 T6, son materiales que ofrecen una combinación excelente entre ligereza y resistencia mecánica.

Rigidez torsional y distribución de cargas.

La rigidez torsional es un factor clave en el diseño de bastidores de vehículos de competencia como la Fórmula SAE. Un bastidor fabricado con un acero AISI 4000, presenta una rigidez torsional superior a 3000Nm, mientras que una aleación de aluminio como el 6061 T6, presenta una rigidez torsional de hasta 2500Nm. La rigidez torsional alta mejora el comportamiento en curvas y permite una mayor maniobrabilidad del vehículo. (Baltasar, 2016).

Seguridad estructural

El diseño en las zonas de deformación debe cumplir las normativas de la Fórmula SAE, la cual establece una deformación máxima de 25mm en bastidores. A demás el bastidor debe mantenerse siempre en zona elástica y se debe mantener un factor de seguridad de 20%. (SAE INTERNATIONAL, 2024a).

Validación de modelo

Para validar que el modelo se lo realizará mediante convergencia de malla según (Gómez & Pineda, 2024) debido a que se deben garantizar los resultados obtenidos en las simulaciones. Primero se ejecutan análisis con malla de elementos relativamente grandes para luego ir reduciendo el tamaño de malla. Con el fin de comparar los resultados de la simulación y verificar que los resultados tienen una variación no más de 5%, esto garantiza precisión y confiabilidad en el análisis.

CAPÍTULO 2:

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES ESTRUCTURALES DEL BASTIDOR TIPO FÓRMULA LONCIN (METODOLOGÍA)

2.1. Materiales

A continuación, se presenta la Tabla 2.1 con los principales materiales y equipos utilizados durante la toma de medidas, la selección del material del bastidor y la simulación de este:

Tabla 2.1: Materiales y equipos utilizados

Material/Equipo	Descripción
Flexómetro	Se utilizó para la toma de medidas generales del bastidor.
Calibrador	Empleado para la medición de diámetros y perfiles de las tuberías redondas y cuadradas
Espectrómetro metalúrgico	Determina la composición del material mediante principio de soldadura.
SolidWorks	Software utilizado para el modelado DAC del bastidor, permite diseñar piezas y ensamblajes, además de permitir la simulación por elementos finitos.

Al empezar este proceso se determinó el tipo de material mediante la toma de probetas de muestra, realizando pequeños cortes de los diferentes perfiles y modelos de tubería con el fin de corroborar el material del que está compuesto siguiendo la normativa ISO 17053 específica para aceros. Está determinado dos modelos de perfiles ocupados en todo el bastidor, proceder a tomar las medidas de cada perfil, se constata dos tipos de perfiles de tubería en todo el bastidor:

- Tubo cuadrado estructural
- Tubo redondo estructural

Donde la tubería redonda presenta dos tipos de diámetros, con esto dando un resultado de tres tipos de probetas para realizar el análisis, y al ser diferentes los diámetros y probablemente también los espesores, con la toma de muestras se podrá determinar de manera exacta que tipo de material es el que se tiene presente.

Como primer paso se realizó las pruebas para determinar qué tipo de material fue usado, con la ayuda de un espectrómetro Figura 2.1, se aplicó tres pruebas en cada probeta por cada perfil para poder estimar mediante un promedio de los resultados determinar el tipo de material.

Figura 2.1: Espectrómetro metalúrgico.

Fuente: Autores

Nota. El tipo de espectrómetro utilizado brinda un soporte rentable y fiable mediante el proceso que desarrolla la prueba y analiza. (*Analizador de metales de escritorio | OES | FOUNDRY- MASTER Smart | Hitachi High-Tech | Hitachi High-Tech Analytical Science*, s/f)

El proceso toma alrededor de cinco minutos por prueba en cada probeta, arrojando los resultados mostrados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Resultados de pruebas

Average	Element	Burn 1	Burn 2	Burn 3
99.2	Fe	99.2	99.2	99.2
0.128	C	0.105	0.167	0.111
0.151	Si	0.143	0.173	0.136

0.387	Mn	0.361	0.414	0.384
0.0010	P	0.0010	0.0010	0.0010
0.0097	S	0.0094	0.0112	0.0086
0.0096	Cr	0.0101	0.0099	0.0089
0.0023	Mo	0.0031	0.0025	0.0013
0.0058	Ni	0.0056	0.0063	0.0057
0.0016	Al	0.0016	0.0025	0.0010
0.0028	Co	0.0025	0.0033	0.0026
0.0076	Cu	0.0077	0.0084	0.0067
0.0018	Nb	0.0018	0.0020	0.0016
0.0024	Ti	0.0024	0.0026	0.0020
0.0023	V	0.0021	0.0030	0.0018
0.01	W	0.01	0.01	0.01
0.0016	Pb	0.0026	0.0010	0.0011
0.0027	Sn	0.0023	0.0039	0.0021
0.0004	B	0.0004	0.0004	0.0004
0.0026	Ca	0.0006	0.0062	0.0011
0.0080	Zr	0.0065	0.0107	0.0068
0.0006	Zn	0.0006	0.0007	0.0005
0.0110	Bi	0.0116	0.0103	0.0111
0.0054	As	0.0060	0.0058	0.0045
0.0102	Se	0.0086	0.0124	0.0097
0.0273	Sb	0.0334	0.0216	0.0269

Fuente: Autores

2.2. Determinación del material.

Los datos obtenidos mediante el ensayo de la espectrofotometría conllevan a un análisis para poder determinar que clase material es el predominante y sus aleaciones. Siendo el hierro (Fe) el material predominante como se puede observar en la Tabla 2.2 de los resultados de las pruebas, los materiales con mayor índice se toman como referencia para determinar qué tipo de acero se tiene presente y asociarlo a un tipo de norma ya definida que se tenga presente en el mercado.

Con la ayuda de un calibrador pie de rey, se procedió a realizar varias mediciones en diferentes lugares del bastidor, con el fin de establecer una base de datos como la Tabla 2.3 que nos permitirá hacer un promedio y de esa manera poder establecer qué tipo de perfil comercialmente fue utilizado y esto se evidencia desde el Anexo 5 hasta el Anexo 9.

Tabla 2.3: Medidas de los perfiles de las tuberías en el bastidor

MEDIDAS DE TUBERIA EN EL BASTIDOR						
TIPO DE TUBERIA	**MEDIDA #1**	**MEDIDA #2**	**MEDIDA #3**	**MEDIDA #4**	**MEDIDA #5**	**PROMEDIO**
Tubería Redonda #1	25.00 (mm)	25.15 (mm)	25.22 (mm)	25.20 (mm)	25.08 (mm)	25.13 (mm)
Tubería Redonda #2	19.20 (mm)	19.27 (mm)	19.14 (mm)	19.15 (mm)	19.21 (mm)	19.19 (mm)
Tubería Cuadrada	25.12 (mm)	25.62 (mm)	25.09 (mm)	25.28 (mm)	25.43 (mm)	25.31 (mm)

Fuente: Autores

Realizando una investigación del mercado ecuatoriano y la oferta de materiales en el país se pudo determinar que los perfiles ocupados en la fabricación de este prototipo son los siguientes:

- Según la norma AISI 4000 la tubería redonda # 1 existente en el mercado perfil 25.4x2 (mm)
- Según la norma AISI 4000 la tubería redonda # 2 existente en el mercado perfil de 19.10x2 (mm)
- Según la norma AISI 4000 tubería cuadrada existente en el mercado perfil 25x25x2 (mm)

Al determinar la medida del perfil se realizó una comparación con la oferta en el mercado nacional para poder obtener una medida que se asemeje y poder incluir en el diseñado del DAC a futuro.

Como parte del análisis se pudo identificar las propiedades mecánicas del material base utilizado, mismas que son las identificadas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Propiedades mecánicas del Acero AISI-4000

GRADO DE ACERO AISI - 4000	
Propiedades	**Valores**
Módulo de Young	205GPa (Giga Pascales)
Relación de Poisson	0.291
Densidad	7.84g/cm^3 (gramos por centímetro cúbico)
Limite Elástico a la tracción	1970MPa (Mega Pascales)
Resistencia máxima a la tracción	1860MPa (Mega Pascales)

Fuente: Autores

Para realizar la carga individual y total de los componentes que conforman el vehículo en conjunto, se realizó un diseño ilustrativo para poder identificar la posición de las partes que van ubicadas sobre el mismo incluyendo el peso del piloto, con este diseño ayuda a simplificar la compresión de las diferentes cargas y su posición, evidenciadas en desde el Anexo 10 hasta el Anexo 12 y por consiguiente se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Lista de masas aproximadas de los componentes y piloto.

COMPONENTES	**MASA (kg)**
Motor	57
Neumáticos	20
Asiento	2.4
Dirección	11
Piloto	70
Suspensión	19.2
Carrocería	10
TOTAL	189.6

Fuente: Autores

CAPÍTULO 3

3. DIBUJO Y DISEÑO DEL BASTIDOR TIPO FÓRMULA LONCIN APOYADO EN SOFTWARE DAC.

Para el modelado DAC se utilizará el Software SolidWorks debido a que permite diseñar piezas y ensamblajes con herramientas avanzadas de diseño.

3.1. Generación del plano

El primer paso para la digitalización del bastidor consistió en la creación de un plano base en SolidWorks. Para ello se utilizó la información dimensional del bastidor recopilada, la cual fue representada en croquis bidimensional sobre los planos principales de trabajo: Frontal, Superior y lateral.

La generación del plano consta de las siguientes etapas:

- Definición de puntos clave: Se establecieron puntos de referencia para identificar las intersecciones críticas del bastidor, tales como conexiones entre barras principales y secundarias. Estos puntos permiten la alineación precisa durante el ensamblaje del modelo tridimensional.
- Croquizado de perfiles: Mediante la herramienta de croquis se trazaron las geometrías que representan los elementos estructurales del bastidor, empleando líneas, arcos y splines para detallar con exactitud cada sección.
- Aplicación de restricciones geométricas: Se utilizaron restricciones como coincidencia, tangencia y paralelismo para garantizar la consistencia bidimensional y posicional con el fin de evitar errores durante la extrusión de los perfiles.
- Validación dimensional: Una vez completado el croquis, se verificó la coherencia de las dimensiones utilizando cotas automáticas y personalizadas, lo que aseguró la precisión del modelo digital respecto al bastidor físico.

Creación de perfiles de tubería.

Los perfiles del bastidor fueron modelados empleando la herramienta “Estructuras Soldadas” del software, que permite generar componentes tubulares con secciones transversales definidas. Se seleccionan perfiles tubulares estándar,

especificando dimensiones y propiedades mecánicas según la normativa aplicada al proyecto. A demás se incorporaron perfiles de sección cuadrada y rectangular que son las que dispone el bastidor.

Selección de materiales y perfiles:

Se incorporaron perfiles comerciales disponibles en el mercado ecuatoriano disponibles con el AISI 4000.

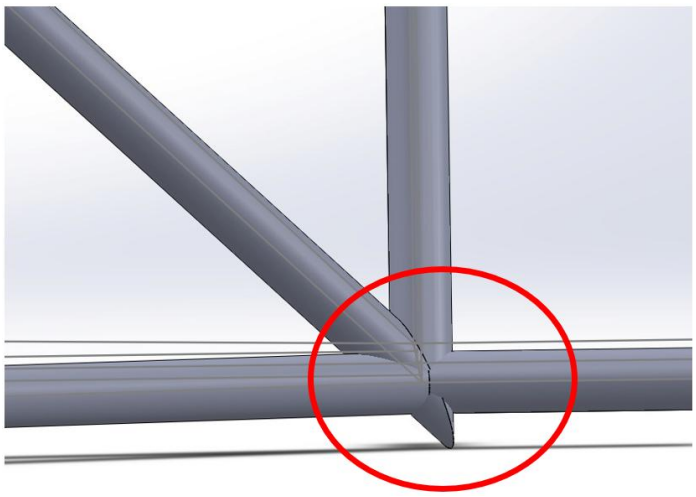
Corrección de uniones

La intersección de los perfiles se realizó mediante el uso de herramientas como “Corte” o “Recortar”, asegurando una conexión adecuada que minimice puntos de concentración de tensiones. Las uniones se soldaron virtualmente, simulando los procedimientos reales que se aplicarían en la fabricación.

Ajustes de geometría:

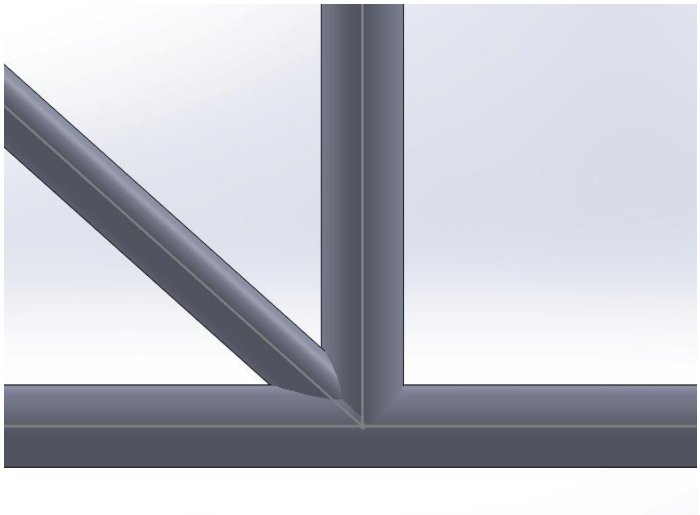
Se utilizaron herramientas para recortar y extender para la corrección de intersecciones como se muestra en la Figura 3.1, asegurando una correcta alineación y reduciendo el material sobrante, como se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3.1: Uniones sobrepasadas



Fuente: Autores

Figura 3.2: Corrección de uniones

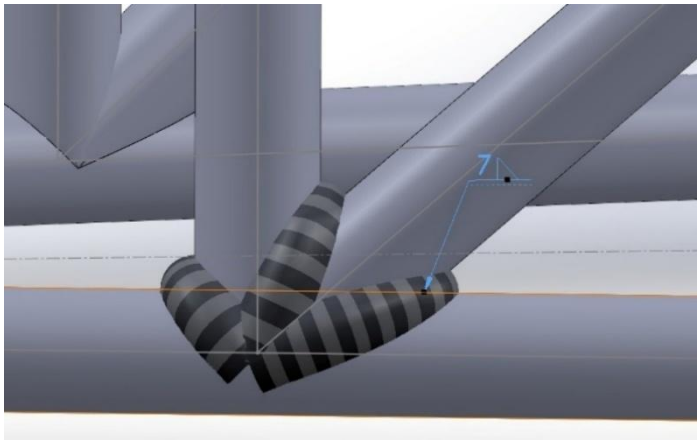


Fuente: Autores

Uniones soldadas:

Se definieron uniones soldadas en cada intersección del bastidor como se muestra en la Figura 3.3, esto permite una distribución uniforme de esfuerzos y reduce la posibilidad de fallo estructural.

Figura 3.3: Uniones soldadas del bastidor



Fuente: Autores

Validación de Modelo

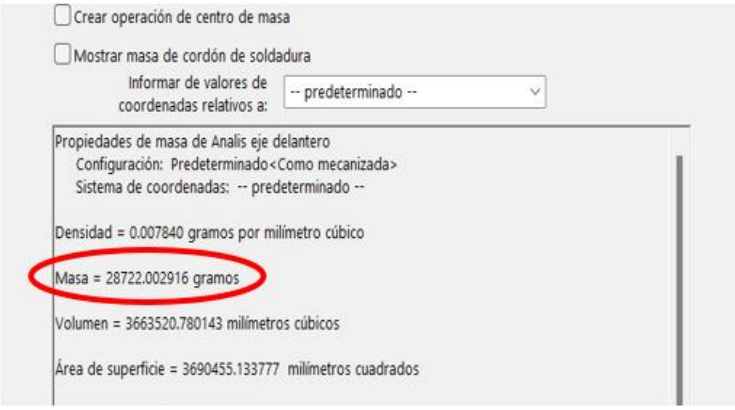
La validación del modelo es una fase crítica que asegura que el diseño final cumple con los requisitos estructurales y de seguridad. Para esto se realizan pruebas y

simulaciones para evaluar el comportamiento del bastidor bajo diversas condiciones de carga y esfuerzo.

Visualización y ajustes

El modelo tridimensional fue examinado desde diferentes ángulos para identificar posibles inconsistencias o interferencias que pudieran afectar el desempeño estructural, para finalmente visualizar el modelado en 2D desde varios ángulos que se muestran en el Anexo 1 y en el Anexo 2. Por consiguiente, se procede a visualizar la masa que el software nos otorga y se muestra en la Figura 3.4.

Figura 3.4: Masa del bastidor en SolidWorks



Fuente: Autores

Luego del modelado DAC, la masa es de 28kg, sin embargo, hay que tener en cuenta las placas de soporte de motor y protección del piloto fueron omitidas, debido a que no interfieren en el análisis estructural del bastidor. Sin embargo, si se tomaron en cuenta para los cálculos dinámicos.

CAPITULO 4

4. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE FUERZAS SOBRE EL BASTIDOR

4.1. Cálculos de esfuerzos y Fuerzas

Para los cálculos se basará en los criterios y fórmulas de (Aparicio et al., 2001)

Condiciones iniciales

- En este caso se obtiene un prototipo que debe soportar una fuerza de 189.6 kg-f (kilogramos fuerza).
- Se considerará que el vehículo se encuentra en aceleración.
- Se desconocerá los efectos aerodinámicos de los alerones.
- Los datos del motor serán tomados en cuenta en base a los datos proporcionados por el fabricante del motor (Loncin).
- Una distribución de peso 40/60.
- El bastidor cuenta con una inclinación positiva, para tomar el radio nominal de los neumáticos, se tomará un promedio entre ambos.
- Al obtener los resultados se trabajará con un 20% de factor de seguridad.

Datos tomados y proporcionados por el fabricante introducidos en Matlab, mostrados en la Figura 4.1.

Figura 4.1: Datos de entrada para cálculo

```
W_motor= 57;                        %Kgf
W_neumaticos= 20;                   %Kgf
W_asiento= 2.4;                     %Kgf
W_direccion= 11;                    %Kgf
W_piloto= 70;                       %Kgf
W_suspension= 19.2;                 %Kgf
W_carroceria= 10;                   %Kgf
W_suma=W_motor+W_neumaticos+...
    W_asiento+W_direccion+W_piloto+W_suspension+W_carroceria; %N
W=(189.6)*(9.81)                        % N
L=1.25;                                 %m
l_1=0.75 ;                              %m
l_2=0.5 ;                               %m
h=0.25 ;                                %m
Potencia=17;                            %hp
RPM_potencia=6000;                      %RPM
Torque=17.5;                            %Nm
RPM_torque=5000;                        %RPM
V_max=130;                              %km/h
                                  %5 velocidades
Volumen_camara=250;                      %cc
anchodevia=1;                            %m
relaciontransmision_motordiferencial=2.285;
realciontransimision_5=1,9;
```

Fuente: Autores

Como se muestra en la Figura 4.1, se suman todos los pesos de los componentes del vehículo, con el fin de obtener cuanto peso debe soportar el bastidor.

$$W = W_{suma} \times g$$

Donde:

W_{suma}= Suma de todos los pesos a soportar.

g =Gravedad (9.81)

$$W = 189.6kg \times 9.81 \frac{m}{s^2}$$

Obteniendo una respuesta de **1860 N (Newtons)**

Resolución

Primero se empieza por calcular el radio efectivo de los neumáticos, por ende, se realizó un promedio entre los 4 neumáticos, para trabajar con un radio promedio, con las siguientes ecuaciones y su resolución se muestra en la Figura 4.2.

$$R_{nd} = \frac{(6 \times 25.4) + (2 \times 160 \times 0.5)}{2}$$

$$R_{nt} = \frac{(6 \times 25.4) + (2 \times 185 \times 0.45)}{2}$$

$$R_{eprom} = \frac{R_{nt} + R_{nd}}{2}$$

Figura 4.2: Cálculo de radio efectivo de neumáticos

Radio efectivo de neumáticos

```
R_nd=((6*25.4)+(2*160*0.5))/(2*1000)  %m

R_nd =
0.1562

R_nt=((6*25.4)+(2*185*0.45))/(2*1000); %m

R_eprom=(R_nt+R_nd)/2                  %m

R_eprom =
0.1578
```

Fuente: Autores

R_{nd} = Radio nominal delantero

R_{nt} = Radio nominal Trasero

R_{eprom} = Radio efectivo promedio

Como resultado se obtiene: **0.1578m** (metros)

Después se procede a calcular la velocidad máxima limitada por el motor con la siguiente ecuación y su resolución mostrada en la Figura 4.3.

$$V_{max} = \frac{RPM_{motor} \times R_{eprom} \times (1 - i)}{2}$$

Donde:

RPM_{motor}= 6000min^{-1}

R_{eprom}=0.1578m

i=0.03

Figura 4.3: Cálculo de la velocidad máxima limitada por el motor

```
V_maxmotor=((6000)*(1/60)*(2*pi)*(0.1578)*(0.97))/1.9; %m/s
V_maxmotorkm=V_maxmotor*3.6                              %Km/h
```

```
V_maxmotorkm =
182.2248
```

Fuente: Autores

Se obtiene como resultado una velocidad máxima limitada por el motor de: **182.2248 km/h** (kilómetros por hora)

Luego se procede a calcular el límite debido a la adherencia, con la siguiente ecuación y con la resolución en la Figura 4.4.

$$\Delta F_z = \frac{h}{L}(F_t - R_r)$$

Donde:

F_t= Fuerzas totales

R_r=Resistencia a la rodadura

$$F_t = R_r + F_a + F_i + F_\theta$$

F_a= Fuerzas aerodinámicas

F_i= Fuerzas inerciales debido a que el vehículo circula a máxima velocidad, se desestiman las fuerzas inerciales (Aparicio et al., 2001)

F_θ= Fuerzas debido a la pendiente, se desestiman debido a que se considera que el vehículo se encuentra en plano. (Aparicio et al., 2001)

Al desestimar las fuerzas inerciales y las fuerzas debido a la pendiente se obtiene la siguiente ecuación:

$$F_t = R_r + F_a$$

Reemplazando se obtiene la siguiente ecuación

$$F_t = \frac{h}{L}\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot V^2\right)$$

$$F_t = \frac{0.25m}{1.25m}\left(\frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 1.2 \cdot 0.7 * \frac{182^2}{3.6}\right)$$

Figura 4.4: Cálculo de fuerzas totales

```
F_t=(0.25/1.25)*(0.5*(1.225)*(1.2)*(0.7)*((182/3.6).^2)) %N

F_t =
262.9984
```

Fuente: Autores

Al final se obtiene una fuerza de **262.9984 N** (Newtons)

Cálculo fuerzas estáticas

Para el cálculo de fuerzas estáticas se utilizará la siguiente ecuación.

$$F_{zd} = 0.4 \times W_{total}$$

$$F_{zt} = 0.6 \times W_{total}$$

Donde:

W_{total}= Peso del bastidor

F_{zd}= Fuerza en el eje delantero

F_{zt}= Fuerza en el eje trasero

Se utiliza el valor de **0.4**, debido a la distribución de peso óptima para un bastidor de competencia, que en el frente es del 40% y en la parte trasera es de **0.6**, es decir que en el tren trasero se encuentra el 60% del peso. (BMW, 2022)

Por consiguiente, se procede al cálculo de las fuerzas estáticas en los dos ejes mostrado en la Figura 4.5.

Figura 4.5: Cálculo de fuerzas estáticas en eje delantero y trasero

```
F_zd=0.4*W      %N

F_zd =
743.9904

F_zt=0.6*W      %N

F_zt =
1.1160e+03
```

Fuente: Autores

Resultados:

F_{zd}= Fuerza estática aplicada en el eje delantero **743.9904 N** (Newtons)

F_{zt}= Fuerza estática aplicada en el eje trasero. **1116 N** (Newtons)

Cálculo de fuerzas dinámicas en condición de aceleración.

En este caso cuando existe una aceleración las cargas se mueven hacia el eje trasero, es decir que la carga dinámica del eje delantero se resta la fuerza de adherencia y en caso del eje trasero se sumaría la misma, por lo cual se usará la siguiente ecuación, y el cálculo se muestra en la Figura 4.6. (Aparicio et al., 2001)

$$F_{zd\ din} = F_{zd} - F_t$$

$$F_{zd\ din} = 744N - 263N$$

$$F_{zt\ din} = F_{zt} + F_t$$

$$F_{zt\ din} = 1116N + 263N$$

Figura 4.6: Cálculo de fuerzas dinámicas de tracción debido a aceleración

```
F_zddin=744-263

F_zddin =
481

F_ztdin=1116+263

F_ztdin =
1379
```

Fuente: Autores

Resultados:

$F_{zd\ din}$ = Fuerza dinámica en el eje delantero en aceleración. **481N** (Newtons)

$F_{zt\ din}$= Fuerza dinámica en el eje trasero en aceleración. **1379N** (Newtons)

Datos finales para simulación:

Considerando el peor escenario para cada eje y con un factor de seguridad de 20% para cada valor.

Eje delantero: En el caso del eje delantero el peor escenario es cuando el vehículo se encuentra estático, así que se aplicará la carga estática aumentada en 20%, por ende, se usará la siguiente ecuación y su cálculo se muestra en la Figura 4.7.

$$F_{del} = F_{zd} \times 1.2$$

$$F_{del} = 743.9904N \times 1.2$$

Figura 4.7: Cálculo de fuerza estática en eje delantero con factor de seguridad

```
F_del=F_zd*1.2      %N
```

```
F_del =
892.7885
```

Fuente: Autores

Como resultado se obtiene aproximadamente **893 N** (Newtons)

Eje trasero: En cuanto al eje trasero, el momento más crítico de este es cuando se encuentra en aceleración debido a que las cargas se mueven hacia este eje. Por ende, se simulará con la fuerza dinámica aumentada en 20%, con la siguiente ecuación, y si cálculo se muestra en la Figura 4.8.

$$F_{tras} = F_{ztdin} \times 1.2$$

$$F_{tras} = 1379N \times 1.2$$

Figura 4.8: Cálculo de fuerza dinámica en el eje trasero con factor de seguridad

EJE TRASERO

```
F_tras=F_ztdin*1.2     %N
```

```
F_tras =
1.6548e+03
```

Fuente: Autores

Obteniendo como resultado una carga de **1655 N** (Newtons)

CAPITULO 5

5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL BASTIDOR

Según la normativa SAE (2024), establece varios criterios para la simulación mediante elementos finitos, estos criterios deben ser cumplidos estrictamente por el equipo con el fin de garantizar la seguridad del piloto y la viabilidad del diseño.

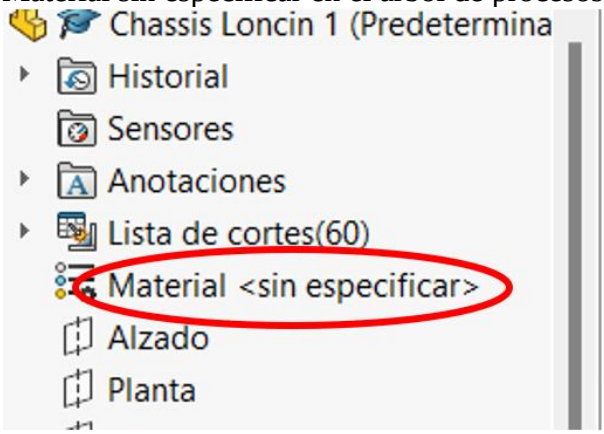
Posterior a la realización de cálculos se lleva a cabo la simulación, por ende, se deben seguir los siguientes pasos:

5.1. Agregar material a librería

Antes de la simulación, el material del bastidor debe ser agregado a la librería del SolidWorks, como primer paso se dirige a la barra de materiales del programa como se muestra en la Figura 5.1.

Material

Figura 5.1: Material sin especificar en el árbol de procesos SolidWorks

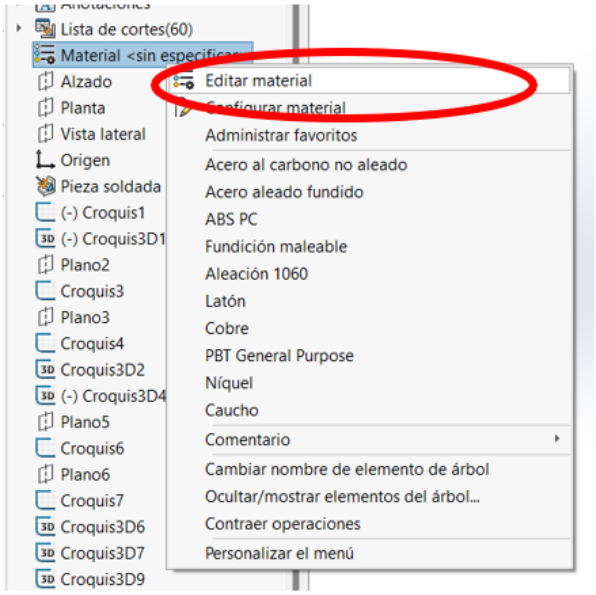


Fuente: Autores

Editar material

Como segundo paso se dirige a la sección de editar material, como se muestra en la Figura 5.2.

Figura 5.2: Edición de material en SolidWorks

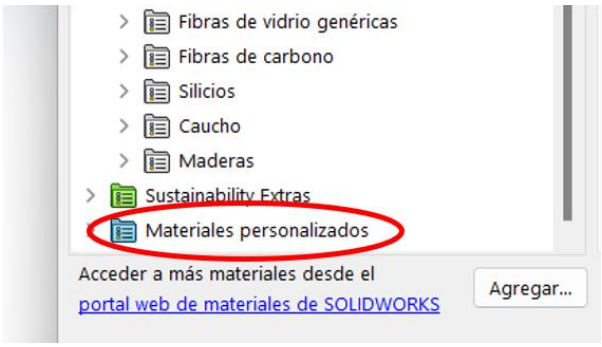


Fuente: Autores

Material Personalizado

Tercero se procede a personalizar el material en el programa ilustrado en la Figura 5.3.

Figura 5.3: Personalizar material en SolidWorks

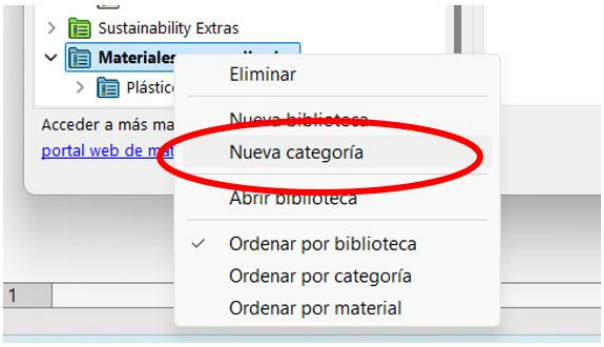


Fuente: Autores

Nueva categoría

Como cuarto paso se agrega una nueva categoría, donde se procederá a agregar el AISI 4000, como se muestra en la Figura 5.4.

Figura 5.4: Agregar nueva categoría en SolidWorks

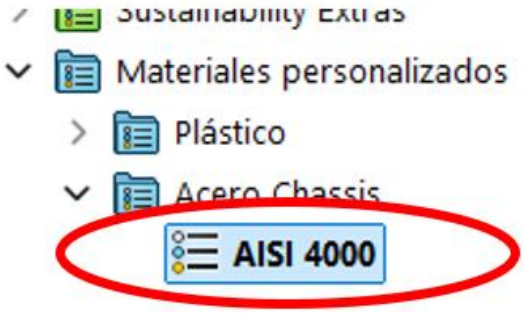


Fuente: Autores

Acero para uso

En quinto paso, se comprueba que el material está agregado como se muestra en la Figura 5.5.

Figura 5.5: Acero AISI 4000 para uso en SolidWorks

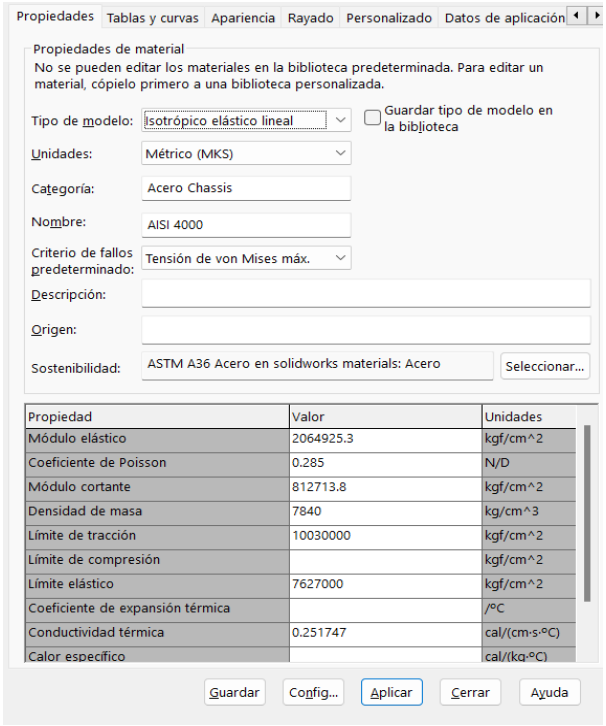


Fuente: Autores

Introducir propiedades de material

En sexto lugar se procede a introducir todas las propiedades mecánicas del AISI 4000 ya indicadas en el Capítulo 2, como se muestra en la Figura 5.6.

Figura 5.6: Introducción de propiedades mecánicas de material en SolidWorks

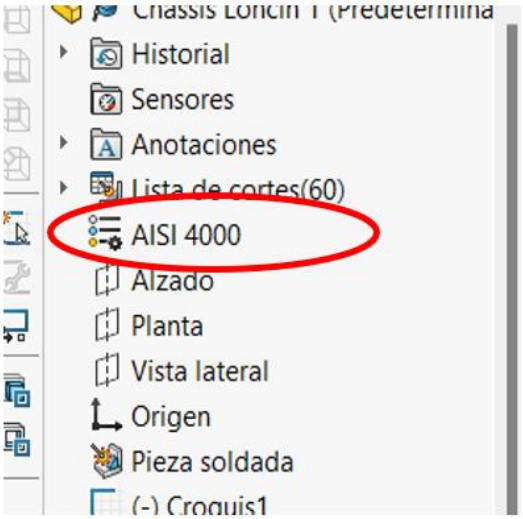


Fuente: Autores

Material agregado

Como último paso se demuestra en la Figura 5.7, que el material se agregó a la biblioteca de forma exitosa y listo para el uso.

Figura 5.7: Material creado en SolidWorks



Fuente: Autores

5.2. Establecer cargas

Como se plantearon mediante los cálculos, se establecerán tres cargas diferentes, con el objetivo de conocer el comportamiento del bastidor y su factor de seguridad, los análisis a realizar son: Análisis en cuanto a Torción, Análisis de carga estática en el eje delantero y Análisis de carga dinámica en el eje trasero.

5.3.Convergencia de malla

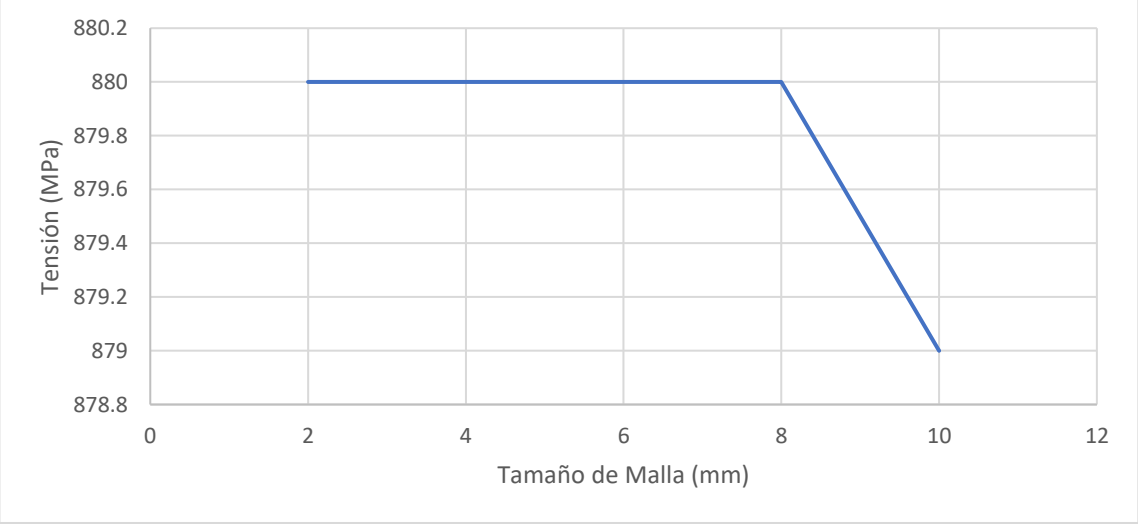
Como se detalló en el marco teórico, se tomarán 5 datos de mallado para corroborar los datos obtenidos donde estos no deben tener una variación mayor a un 5%, que se demuestra en la Tabla 5.1 y en la Figura 5.8.

Tabla 5.1: Convergencia de malla.

Análisis de convergencia de malla				
Tamaño de elemento (mm)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Factor de seguridad	Convergencia
2	880	4.78	8.5	
4	880	4.78	8.49	0
6	880	4.78	8.49	0
8	880	4.78	8.49	0
10	879	4.78	8.5	0.113636364

Fuente: Autores

Figura 5.8: Gráfico de convergencia de malla



Fuente: Autores

Debido a los resultados de convergencia de malla que no existe una variación significativa, se opta por trabajar con una malla de 2mm y con los detalles de malla mostrados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Propiedades de malla de SolidWorks

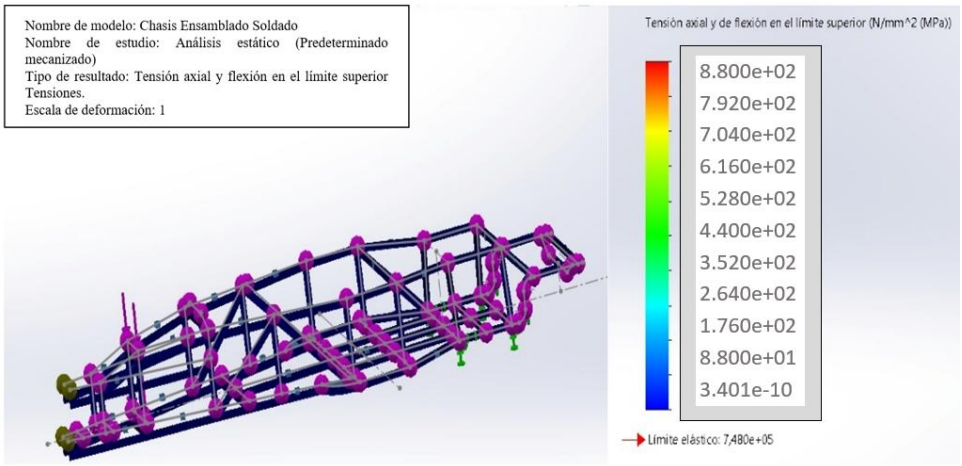
Nombre de estudio	Análisis estático
Detalles Tipo de Malla	Malla de viga
Control de malla	Definida
Número total de nodos	12923
Número total de elementos	12581
Tiempo para completar malla (hh:mm:ss)	00:00:13

Fuente: Autores

5.4.Análisis de Esfuerzo en los dos ejes

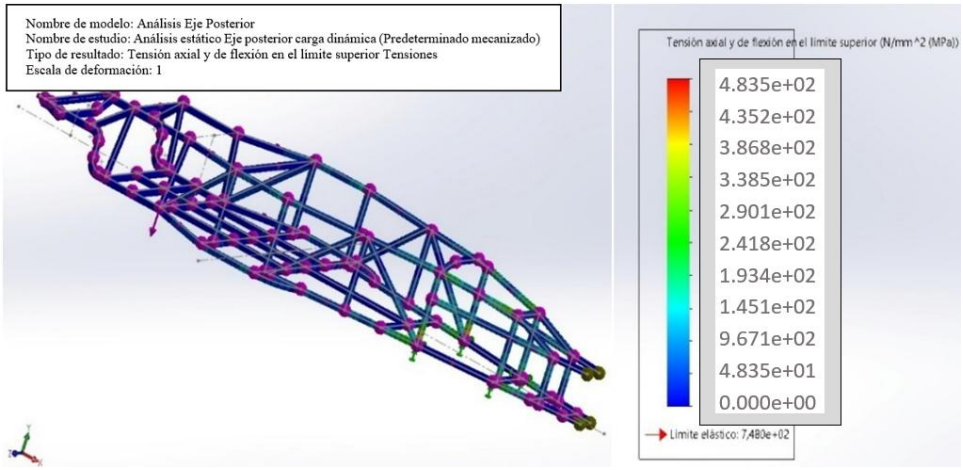
Al proceder a la simulación se obtienen los resultados de la Tabla 5.3, que se demuestran desde la Figura 5.9 hasta la Figura 5.17.

Figura 5.9: Resultados de Tensión en el eje delantero con carga estática de 893N



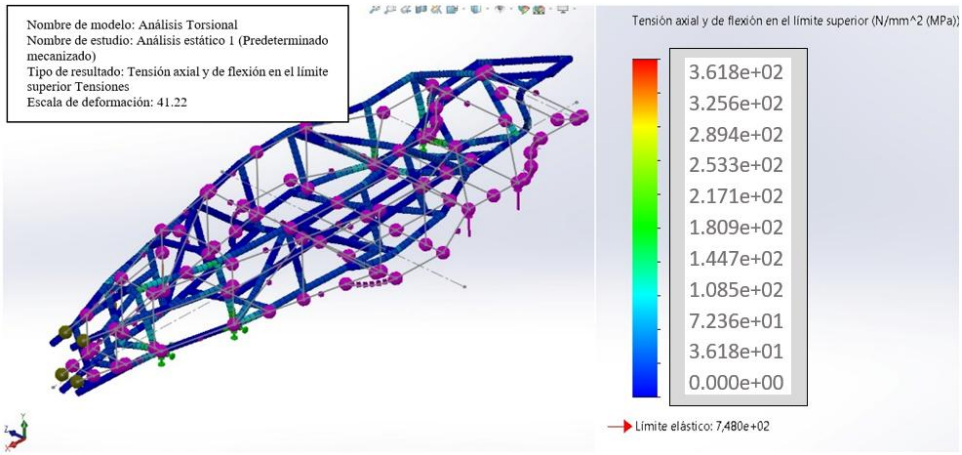
Fuente: Autores

Figura 5.10: Resultados de Tensión en el eje trasero con carga dinámica de 1655N



Fuente: Autores

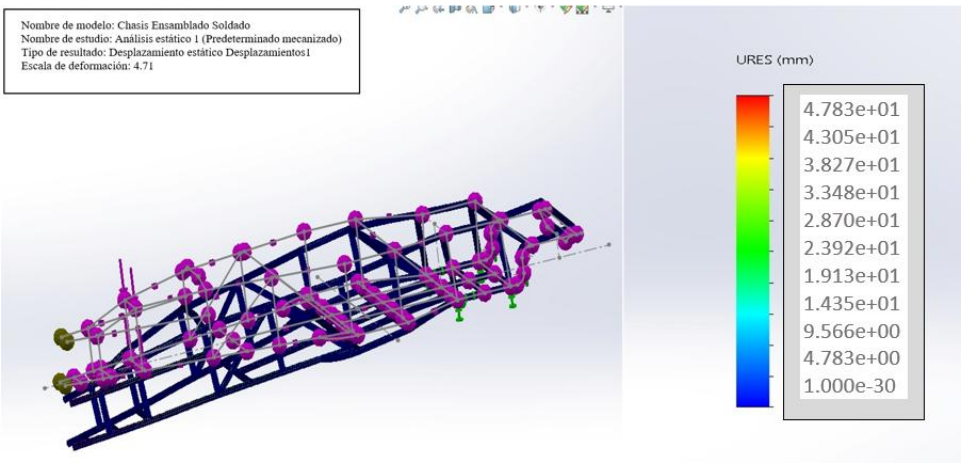
Figura 5.11: Resultados de torsión con cargas diagonales en eje delantero de 893N y eje trasero de 1655N



Fuente: Autores

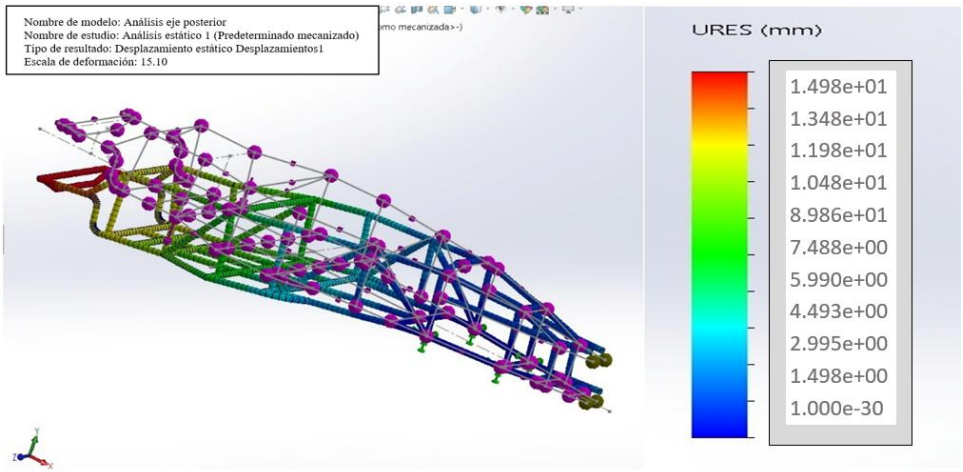
6. Análisis de Desplazamiento en los dos ejes (Deformación)

Figura 5.12: Resultados de desplazamiento en el eje delantero con carga estática de 893N



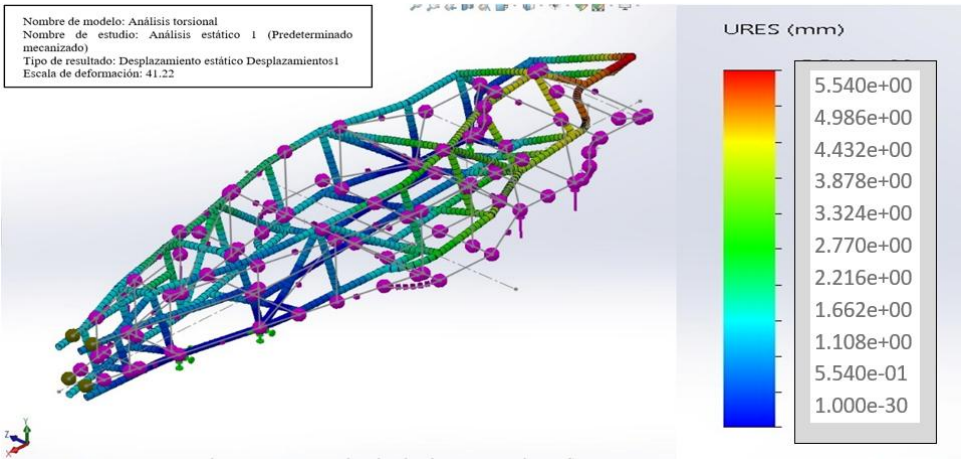
Fuente: Autores

Figura 5.13: Resultados de desplazamiento del eje trasero con carga dinámica de 1655N



Fuente: Autores

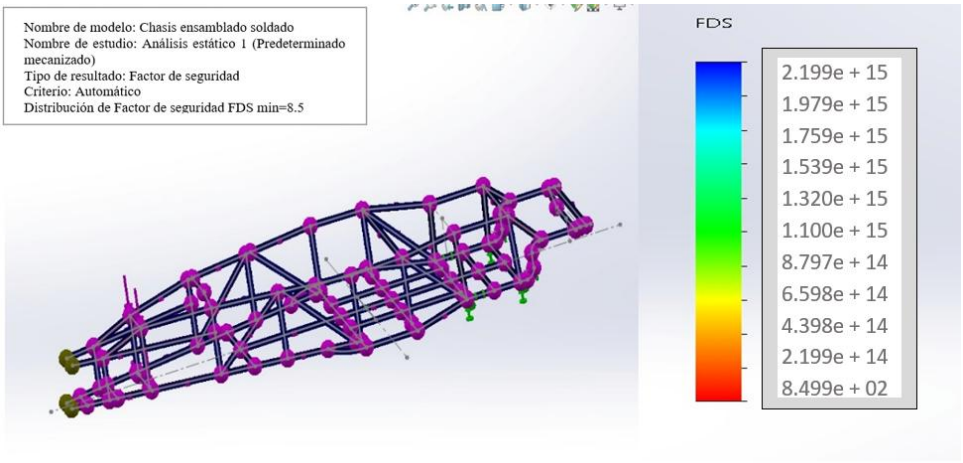
Figura 5.14: Resultados de desplazamiento con cargas diagonales.



Fuente: Autores

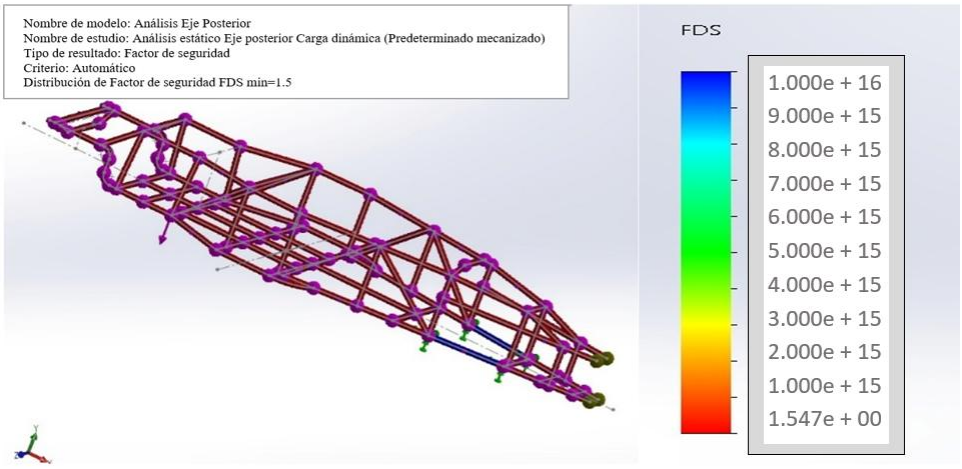
Factor de Seguridad en ambos ejes

Figura 5.15: Resultados de Factor de Seguridad con carga en el eje delantero



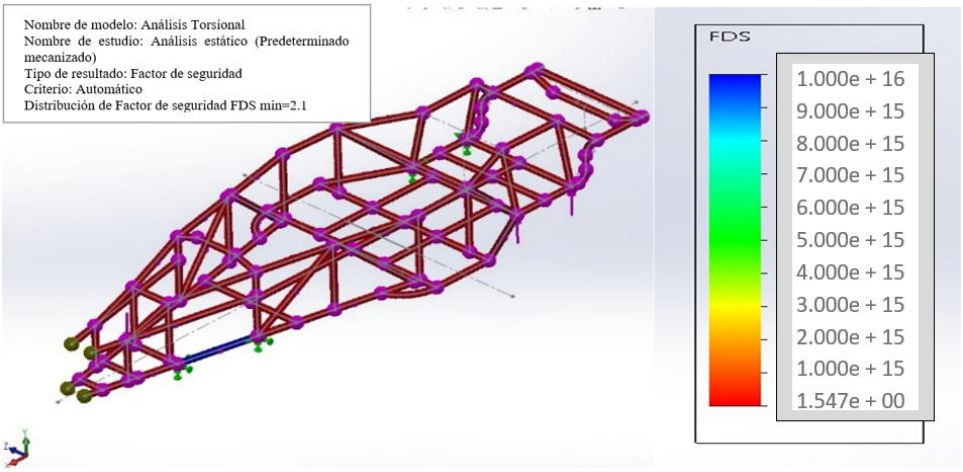
Fuente: Autores

Figura 5.16: Resultados de factor de seguridad en eje trasero con carga dinámica



Fuente: Autores

Figura 5.17: Resultados de Factor de Seguridad con cargas diagonales.



Fuente: Autores

7. Análisis de resultados

Se realiza un resumen, mostrado en la Tabla 5.3 que denotan los resultados obtenidos en la simulación, la cual nos permite analizar en base a los conceptos establecidos en el Marco Teórico.

Tabla 5.3: Resultados de simulación de bastidor.

RESULTADOS EJE DELANTERO		**Límite elástico del material (MPa)**	**Limite plástico o elástico**	**Cumple: SI/NO**
Deformación total Max. (MPa)	880	1860	Elástico	SI
Desplazamiento total (mm)	4.78		Elástico	SI
Factor de Seguridad Min.	8.5		Elástico	SI
RESULTADOS EJE TRASERO		**Límite elástico del material (MPa)**	**Límite plástico/ elástico**	**Cumple: SI/NO**
Deformación total Max. (MPa)	1183	1860	Elástico	SI
Desplazamiento total (mm)	14		Elástico	SI
Factor de Seguridad Min.	1.55		Elástico	SI
RESULTADOS DE TORSIÓN		**Límite elástico del material (MPa)**	**Límite plástico/ elástico**	**Cumple: SI/NO**
Deformación total Max. (MPa)	361	1860	Elástico	SI
Desplazamiento total (mm)	5.5		Elástico	SI

Factor de Seguridad Min.	2		Elástico	SI

Fuente: Autores

En base a la Tabla 5.3, se puede notar que el bastidor cumple con todas las condiciones de la Fórmula SAE, pero tiene un exceso en el Factor de seguridad, lo que permite concluir de que el bastidor está diseñado con más material del necesario para soportar las cargas y esfuerzos previstos, lo que permite concluir que existe una oportunidad de optimización. La presencia de material adicional incrementa la masa del bastidor, lo que afecta potencialmente al rendimiento del vehículo. Reducir el material sin comprometer la resistencia estructural ayudaría a obtener una relación peso/potencia mucho mayor.

CAPITULO 6

6. REDISEÑO DE BASTIDOR

En el presente capítulo se abordará el proceso de rediseño geométrico y cambio de material del bastidor del vehículo. La necesidad de este rediseño surge debido a la serie de deficiencias identificadas en el bastidor actual, lo que compromete su integridad estructural y eficiencia en términos de peso y distribución de esfuerzos. Los problemas identificados incluyen:

- Soldaduras defectuosas
- Ubicación errónea de tubos estructurales
- Tuberías de diferentes diámetros alrededor del bastidor

Estos problemas generan inconsistencias en las distribuciones de carga y puntos críticos de tensión.

El objetivo principal del rediseño es optimizar la geometría del bastidor y estandarizar el uso de tubos de un solo diámetro y espesor, empleando aluminio 6061-T6 como material alternativo utilizado comúnmente en la Fórmula SAE. El aluminio 6061-T6 ha sido seleccionado por sus excelentes propiedades mecánicas, buena soldabilidad y una significativa reducción de peso en comparación al acero con una expectativa a alcanzar un factor de seguridad mayor o igual a 1.2.

6.1.Análisis de deficiencias del bastidor

Soldaduras defectuosas

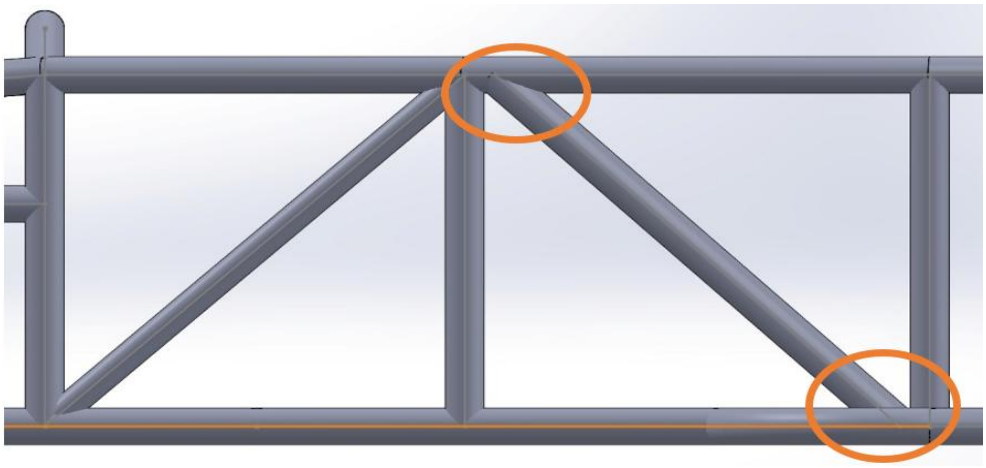
Las inspecciones revelaron uniones mal ejecutadas, generando concentraciones de esfuerzo que comprometen la resistencia del bastidor.

Las discontinuidades y porosidades en las soldaduras debilitan la integridad estructural aumentando el riesgo de fallo por fatiga.

Juntas mal colocadas

Se observó que algunos tubos estructurales se encuentran mal ubicados, en posiciones que no contribuyen a la rigidez del bastidor, como se muestra en la Figura 6.1.

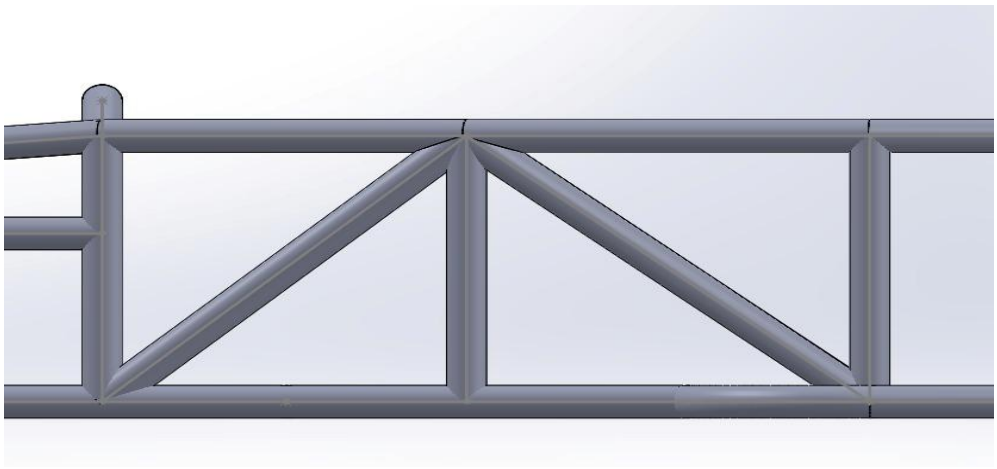
Figura 6.1: Ejemplo de junta que no cumple triangulación.



Fuente: Autores

Una falta de triangulación en áreas críticas reduce la capacidad de disipar las cargas generadas durante la conducción e impactos, por ese motivo se procedió a realizar triangulaciones en el bastidor, como se muestra en la Figura 6.2. (Fierro & Ordóñez, 2018)

Figura 6.2: Corrección de junta con triangulación.

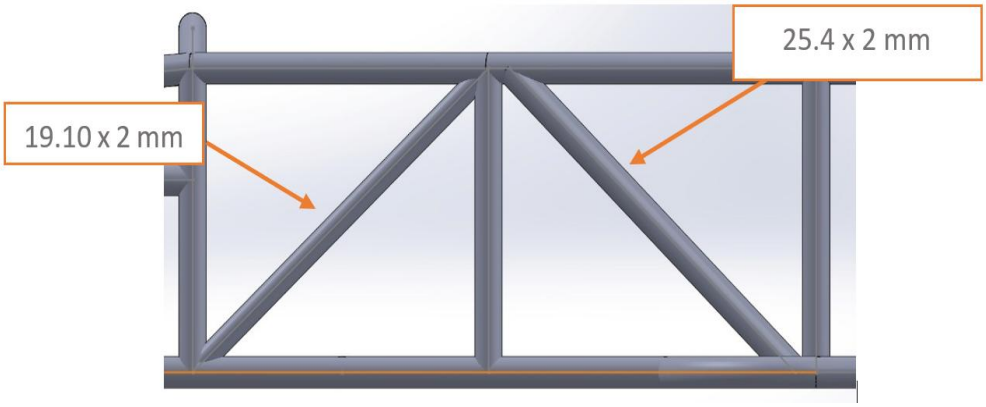


Fuente: Autores

Diferentes diámetros de tuberías

La utilización de tubos de diferentes dimensiones genera irregularidades en la distribución de esfuerzos, produciendo un pandeo, como es demostrado en la Figura 6.3. (Fierro & Ordóñez, 2018)

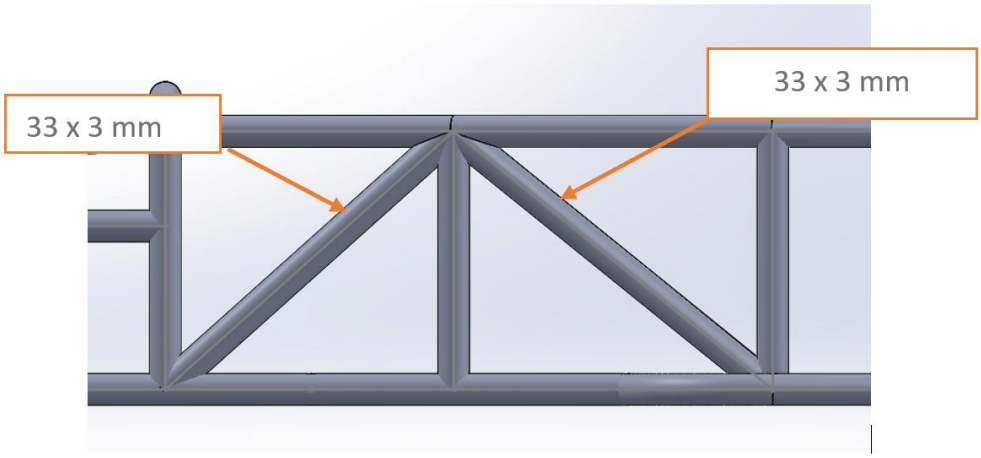
Figura 6.3: Ejemplo de tuberías de diferentes diámetros



Fuente: Autores

Las variaciones en el espesor complican los procesos de manufactura y ensamblaje, además de aumentar el peso del bastidor, por tal motivo se optó por un solo tubo para el rediseño que se muestra en la Figura 6.4.

Figura 6.4: Tubería de los mismos diámetros



Fuente: Autores

6.2. Justificación de Cambio de Material

El aluminio 6061-T6 ha sido seleccionado debido a su uso común en la Fórmula SAE, debido a las propiedades en términos de relación de resistencia-peso, que son:

- Módulo de Young: 69GPa (Giga Pascales)
- Límite elástico: 275MPa (Mega Pascales)
- Resistencia última: 310MPa (Mega Pascales)

- Densidad: 2.7g/cm^3 (Gramo por centímetro cúbico)

El uso de este material permitirá reducir el peso del bastidor, lo que contribuirá a mejorar la relación potencia-peso del vehículo y optimizará el comportamiento dinámico. A pesar de la reducción en el límite elástico en comparación con el acero, el diseño espera alcanzar un factor de seguridad mayor o igual a 1.5 y manteniendo el bastidor en su zona elástica.

6.3.Proceso de rediseño

Objetivos del rediseño

- Estandarizar las tuberías al usar un solo diámetro y espesor.
- Optimizar la geometría al reubicar tubos y refuerzos para maximizar la rigidez torsional y resistencia a flexión
- Minimizar el peso del bastidor sin comprometer seguridad y rigidez.
- Simplificar procesos de fabricación
- Se realizará una triangulación estratégica con el fin de optimizar la transferencia de cargas.

6.4.Resultados esperados:

El rediseño propuesto se espera que represente una reducción en peso entre 20% y 30%, sin comprometer la rigidez estructural. A través de la simulación se verificará que el bastidor alcance un factor de seguridad mínimo de 1.2 con las mismas cargas y esfuerzos que el bastidor original, el plano del chasis rediseñado se visualiza en el Anexo 3 y en el Anexo 4.

CAPITULO 7

7. SIMULACIÓN DE CARGAS Y ESFUERZOS EN BASTIDOR REDISEÑADO.

En este capítulo se abordará el análisis de las fuerzas que debe soportar el bastidor rediseñado, replicando las condiciones de carga descritas en el Capítulo 3. El objetivo es demostrar que el bastidor optimizado mantiene la capacidad de resistir dichas fuerzas y esfuerzos, pero con un menor peso. El diseño se ha modificado con una estructura triangulada y se modificó el material al Aluminio 6061-T6.

7.1.Especificaciones de material

El bastidor optimizado se ha diseñado utilizando aluminio 6061-T6, debido a sus propiedades mecánicas favorables y por su común uso en la Fórmula SAE, El aluminio 6061-T6 presenta las siguientes propiedades:

- Módulo de Young: 69GPa (Giga Pascales)
- Límite elástico: 270MPa (Mega Pascales)
- Resistencia última: 290MPa (Mega Pascales)
- Densidad: 2.7g/cm^3 (Gramos por centímetro cúbico)
- Relación de Poisson: 0.33
- Diámetro exterior: 33mm (Milímetros)
- Espesor de pared: 3mm (Milímetros)

7.2.Cargas aplicadas y Condiciones de Frontera

Para garantizar una comparación directa entre el bastidor original y el rediseñado, se utilizarán las mismas condiciones de cargas detalladas previamente.

Eje delantero

En el eje delantero se aplicará la carga estática detallada en el Capítulo 3, que da un valor de **893N** (Newtons).

Eje trasero

En el eje trasero se aplicará la carga dinámica detallada en el Capítulo 3, que otorga un valor de **1655N** (Newtons).

7.3.Modelado DAC y preparación del análisis en SolidWorks.

El modelado DAC optimizado generado en SolidWorks, lleva un proceso similar al detallado en el Capítulo 1, con la diferencia de que se incorporó la triangulación a lo largo de todo el bastidor. La geometría final reflejará una distribución más eficiente de las cargas.

7.4.Aplicación de cargas

El bastidor optimizado será sometido a las mismas fuerzas que el bastidor original para asegurar condiciones de comparación equivalentes. Las cargas representan situaciones reales durante el funcionamiento del vehículo.

7.5.Restricciones y Resultados de carga.

Las cargas se aplicarán en los mismos puntos específicos que en el primer bastidor, replicando el comportamiento del vehículo en condiciones operativas.

7.6.Convergencia de malla

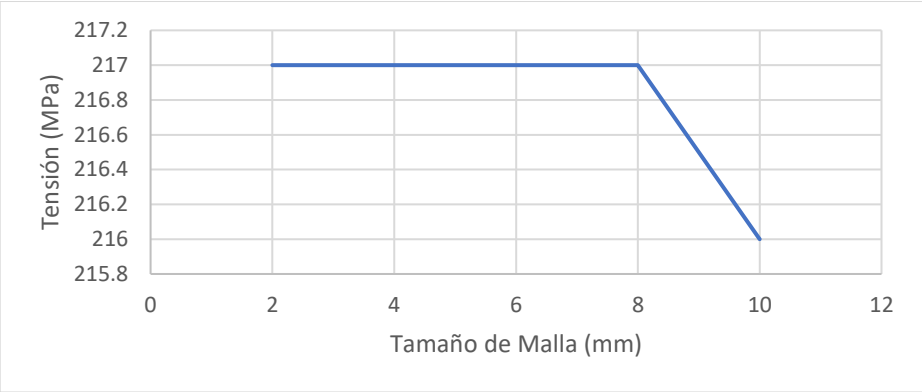
Como se detalló en el marco teórico, se tomarán 5 datos de mallado para corroborar los datos obtenidos donde estos no deben tener una variación mayor a un 5%, demostrada en la Tabla 7.1 y en la Figura 7.1.

Tabla 7.1: Análisis de convergencia de malla

Análisis de convergencia de malla en bastidor rediseñado				
Tamaño de elemento (mm)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Factor de seguridad	Convergencia
2	217	22	1.26	
4	217	22	1.26	0
6	217	22	1.26	0
8	217	22	1.26	0
10	216	22	1.27	0.460829493

Fuente: Autores

Figura 7.1: Convergencia de malla



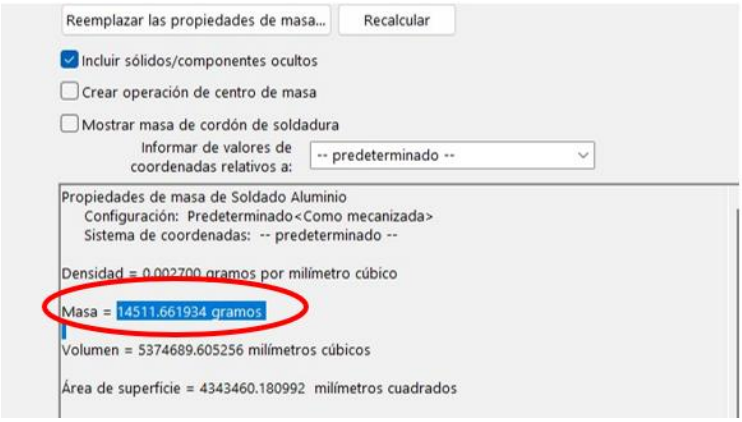
Fuente: Autores

Debido a los resultados de convergencia de malla que no existe una variación significativa, se opta por trabajar con una malla de 2mm.

7.7.Resultados del análisis de elementos finitos

Al realizar la simulación se opta por ver la masa del bastidor rediseñado, que se muestra en la Figura 7.2.

Figura 7.2: Masa total del bastidor rediseñado



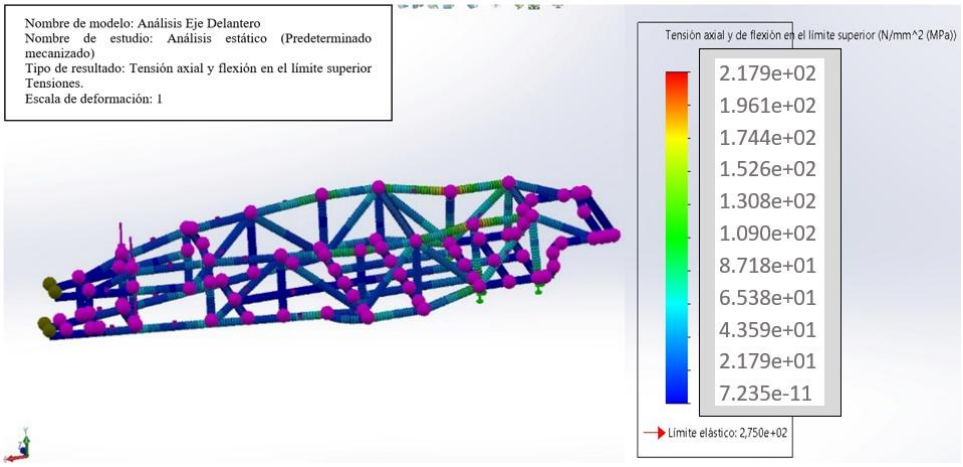
Fuente: Autores

Como resultado de la masa en el bastidor rediseñado el software nos otorga un valor de 14.5Kg.

Eje delantero

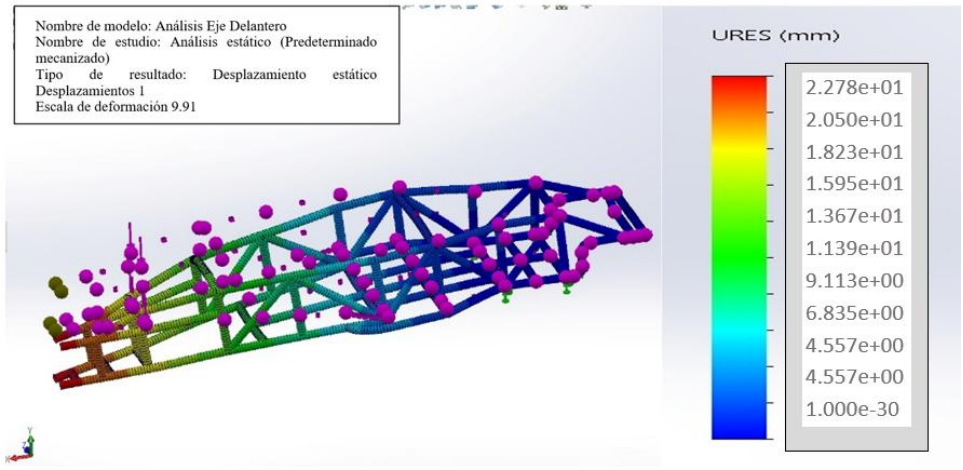
Para el análisis del eje delantero como se detalló en el Marco Teórico, el bastidor rediseñado soportará las mismas cargas y esfuerzos que el bastidor original, y se demuestra desde la Figura 7.3 a la Figura 7.5.

Figura 7.3: Resultado de simulación de torsión en eje delantero de 893N



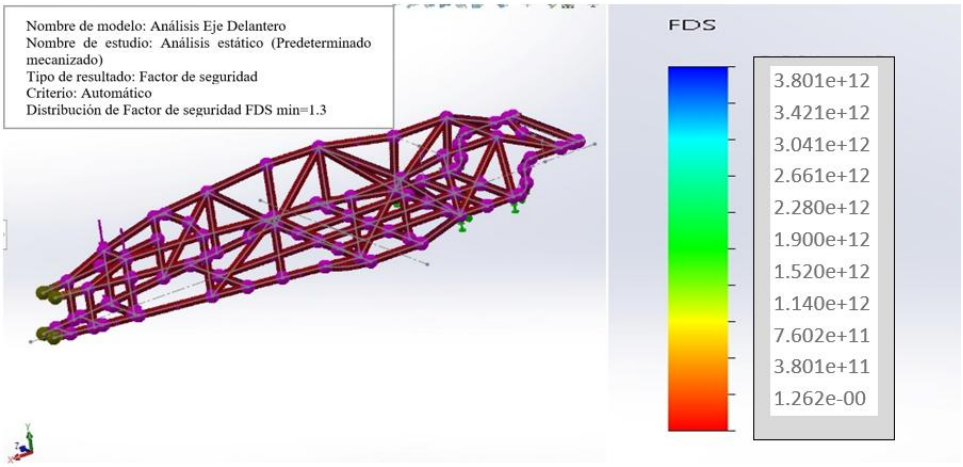
Fuente: Autores

Figura 7.4: Resultados de Desplazamiento en el eje delantero con fuerza de 893N



Fuente: Autores

Figura 7.5: Resultados de Factor de seguridad en el eje delantero con fuerza de 893N

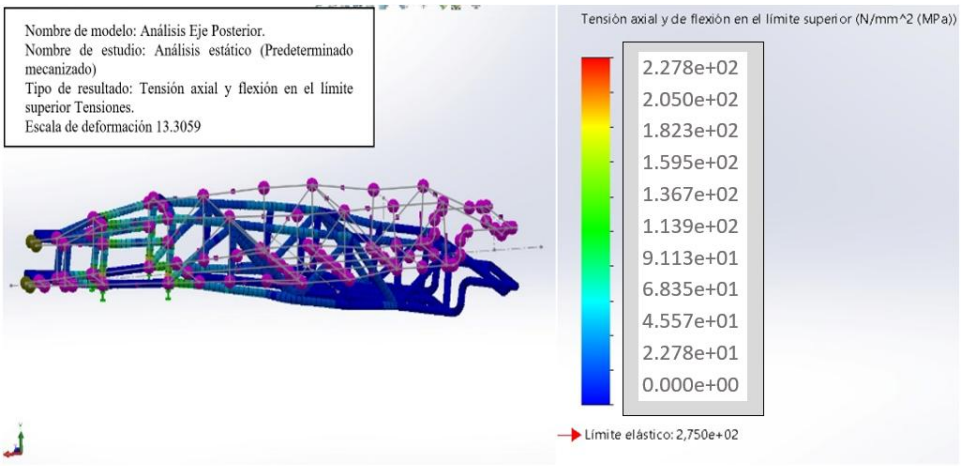


Fuente: Autores

Eje trasero

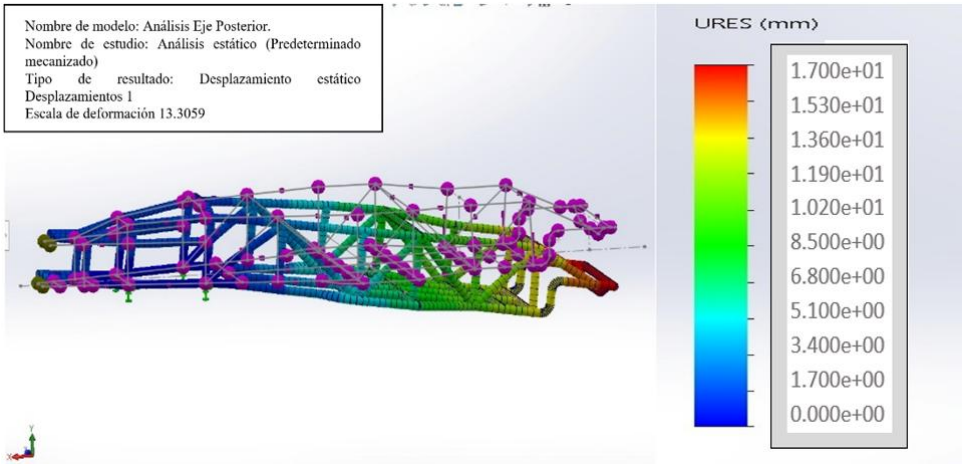
En el caso del eje trasero, se lo simulará con las mismas cargas y esfuerzos que se muestran desde la Figura 7.6 a la Figura 7.8.

Figura 7.6: Resultados de tensión en el eje trasero con fuerza de 1655N



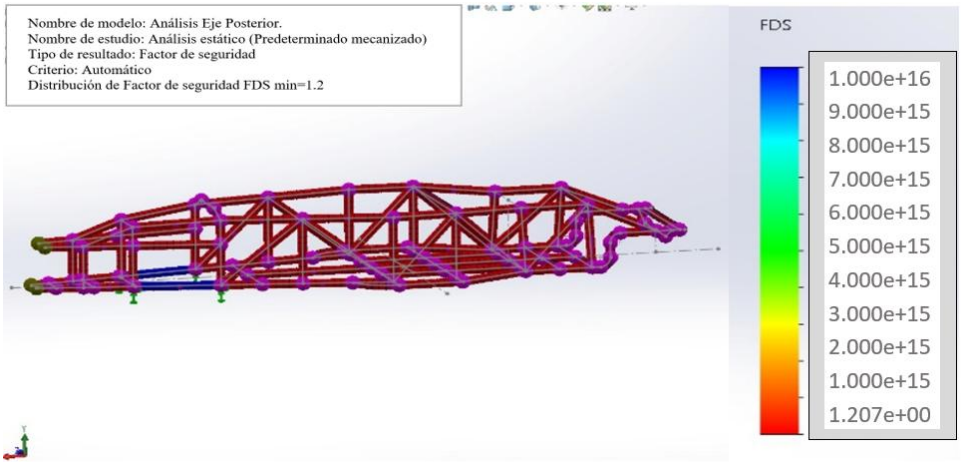
Fuente: Autores

Figura 7.7: Resultados de Desplazamiento en el eje trasero con fuerza de 1655N



Fuente: Autores

Figura 7.8: Resultados de Factor de Seguridad en el eje trasero con fuerza de 1655N

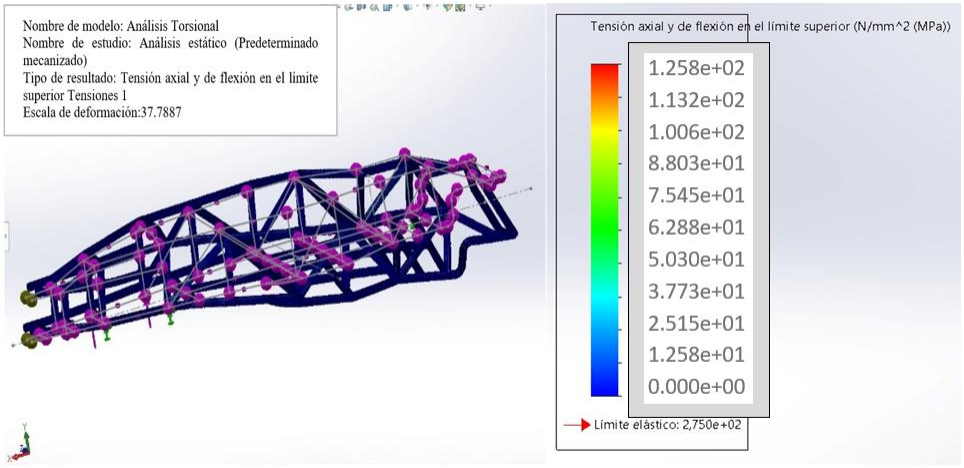


Fuente: Autores

Análisis torsional

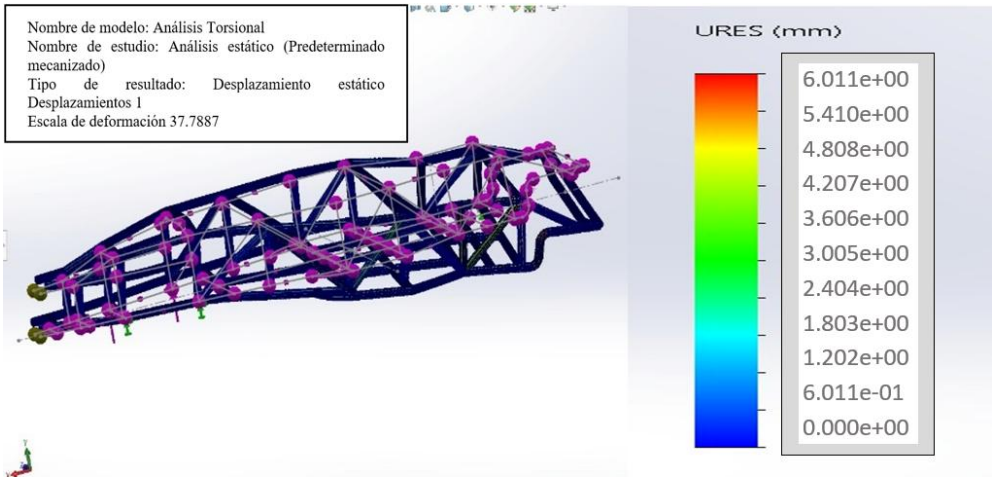
Manteniendo lo planteado, en el análisis torsional se aplicarán las mismas cargas y esfuerzos que en el bastidor original que se muestran desde la Figura 7.9 a la Figura 7.11.

Figura 7.9: Resultados de tensión con cargas diagonales



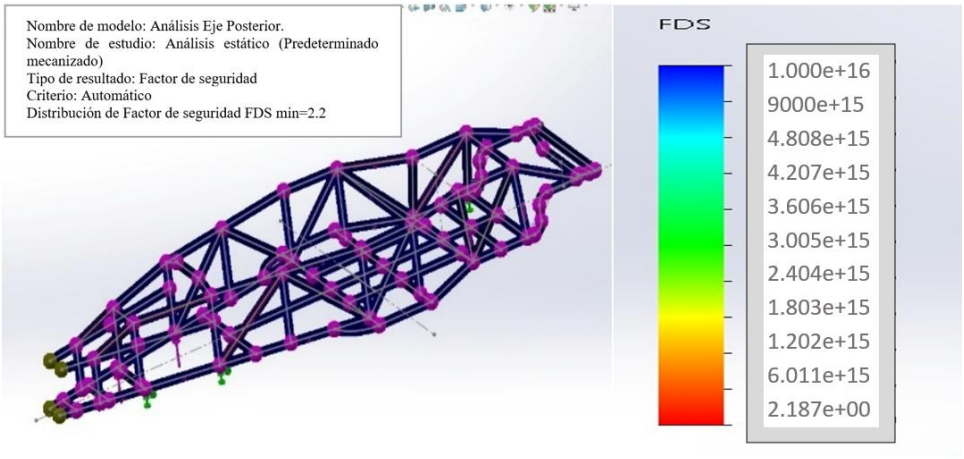
Fuente: Autores

Figura 7.10: Resultados de desplazamiento con cargas diagonales



Fuente: Autores

Figura 7.11: Resultados de Factor de Seguridad con cargas diagonales



Fuente: Autores

Para un posterior análisis se procede a realizar una tabla resumen sobre los resultados de la simulación sobre el bastidor rediseñado, que se muestra en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Resultados de simulación en bastidor rediseñado.

RESULTADOS EJE DELANTERO		**Límite elástico del material**	**Limite plástico/elástico**	**Cumple: SI/NO**
Esfuerzo total Max. (MPa)	217	275	Elástico	SI
Deformación total Max. (mm)	22		Elástico	SI
Factor de Seguridad Min.	1.26		Elástico	SI
RESULTADOS EJE TRASERO		**Límite elástico del material**	**Limite plástico/elástico**	**Cumple: SI/NO**
Esfuerzo total Max. (MPa)	227	275	Elástico	SI

Deformación total Max. (mm)	17		Elástico	SI
Factor de Seguridad Min.	1.20		Elástico	SI
RESULTADOS ANÁLISIS TORSIONAL		**Límite elástico del material**	**Limite plástico/elástico**	**Cumple: SI/NO**
Esfuerzo total Max. (MPa)	125	275	Elástico	SI
Deformación total Max. (mm)	6		Elástico	SI
Factor de Seguridad Min.	2.18		Elástico	SI

Fuente: Autores

La simulación de las cargas demuestra que el rediseño del bastidor y el cambio de material a aluminio 6061 T6 fue exitoso, ya que en las evaluaciones en sus ejes y el análisis torsional cumple con los requisitos estructurales con márgenes de seguridad adecuado. Los esfuerzos máximos se mantienen por debajo del límite elástico del material, lo que asegura que el bastidor no sufrirá deformaciones permanentes y garantiza su integridad en condiciones de trabajo. El factor de seguridad en todos los casos supera el valor crítico de 1, asegurando que el bastidor resistirá las condiciones exigentes sin riesgo a falla estructural.

7.8.Comparación de resultados frente al bastidor original

Por último, se realizó una tabla resumen de ambos bastidores para su posterior análisis mostrado en la Tabla 7.3

Tabla 7.3: Tabla comparativa entre bastidor rediseñado y bastidor original.

	BASTIDOR ORIGINAL	**BASTIDOR REDISEÑADO**	**REDUCCIÓN (%)**
Peso del bastidor (Kg)	28	14	-50%
Deformación total Max. (mm)	14	22	+57%
Esfuerzo total Max. (MPa)	1183	227	-80.8%
Factor de Seguridad Min.	1.55	1.2	-21.3%
Límite Elástico o Plástico	Elástico	Elástico	-

Fuente: Autores

El análisis comparativo entre el bastidor original y el rediseñado muestra que el cambio de diseño y el material ha resultado en una significativa optimización estructural y de peso, cumpliendo con los objetivos de eficiencia y rendimiento. El bastidor rediseñado logró una reducción de 50% en el peso total, pasando de 28kg a 14kg, lo que representa una ventaja clave para mejorar el desempeño en pista, aunque hubo un incremento en la deformación este es aceptable según (SAE INTERNATIONAL, 2024a), es aceptable una deformación en áreas críticas de hasta 25mm. El factor de seguridad se redujo de 1.55 a 1.2, lo que aún sigue garantizando un margen seguro. Esta mejora en la eficiencia estructural, combinada con una reducción significativa de peso, justifica plenamente que el diseño ha sido exitoso y cumple con los objetivos de la optimización.

CONCLUSIONES

- La simulación de los bastidores bajo condiciones de trabajo estático y dinámico permitió identificar puntos críticos de esfuerzo en las uniones soldadas y en las secciones de los tubos sometidos a torsión, donde el esfuerzo máximo en el bastidor rediseñado fue de 227MPa, al contrario que en el bastidor original existió un esfuerzo máximo de 1183MPa, esto representó una disminución de aproximadamente un 81% y manteniéndose el aluminio en zona elástica. Este cambio permitió un desempeño más eficiente reduciendo fallos estructurales, basándose en los resultados de la simulación del bastidor rediseñado.
- Se planteó la alternativa de diseño utilizando aluminio 6061 T6, que logró mejorar la resistencia estructural del chasis y optimizar la masa del bastidor. El rediseño incluyó la realización correcta de triangulación que incrementó la rigidez torsional reduciendo esfuerzos máximos de 361MPa a 125MPa, dando una mejora de alrededor del 64%. Asimismo, el peso del bastidor disminuyó en un 50%, esto permitió mejorar la relación peso/potencia pasando de 12.07kg/HP a 9.94kg/HP, proporcionando equilibrio entre rigidez, seguridad y ligereza, garantizando que el bastidor soporta cargas de 893N en el eje delantero y 1655N en el eje trasero y todo esto sin superar el límite elástico de 275MPa.
- El bastidor optimizado cumple con las normativas de seguridad de la Formula SAE, presentando un factor de seguridad de 1.2 y deformaciones máximas de 22mm, ambas dentro de los límites establecidos por el reglamento 2024. En comparación al bastidor original, que tenía un factor de seguridad de 1.5 y deformaciones de 14mm, el rediseño logró una reducción de la mitad del peso y mejoró su relación peso/potencia. A demás el uso de aluminio de 3mm de espesor y 33mm de diámetro mantuvo la rigidez estructural y facilita la fabricación mediante procesos estándar de corte y soldadura.
- El uso del aluminio 6061 T6 permitió reducir el peso del bastidor en un 50%, disminuyendo de un peso de 28kg a 14kg. Este cambio no comprometió la rigidez estructural, ya que en la simulación por elementos finitos se demostró que las áreas críticas del bastidor y sus puntos de unión mantienen una adecuada distribución de

esfuerzos, con un esfuerzo máximo de 227MPa que se encuentra dentro del límite elástico del aluminio que es de 275MPa.

- La reducción del peso del bastidor de 28kg a 14kg mejora la relación peso/potencia pasando de 12.07kg/HP a 9.94kg/HP lo que se traduce en una mejora del 17.63%, lo que favorece la aceleración y el rendimiento dinámico general. Esta disminución de peso impacta en distancias de frenado, reduciendo fuerzas inerciales y mejorando la capacidad de desaceleración, debido a que la distancia de frenado depende directamente de la inercia del vehículo que está determinada por la masa, lo que determina una menor fuerza para detener el vehículo.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un análisis topológico de las placas del soporte de motor, bases estructurales y protección del piloto para identificar material redundante y lograr más reducción de peso. Este análisis podría permitir una disminución de peso desde un 5% hasta un 10% sin comprometer rigidez estructural, mejorando aún más la relación peso/potencia.
- Ampliar el alcance del análisis mediante simulaciones que evalúen el comportamiento térmico y vibracional del bastidor bajo condiciones de competencia, con el fin de experimentar fatiga estructural. Esto ayudará a identificar zonas críticas donde puedan ocurrir resonancias o acumulación de calor, asegurando integridad durante la competencia.
- Se recomienda la fabricación del bastidor optimizado y la realización de pruebas físicas en condiciones controladas para validar resultados para verificar que las deformaciones máximas no excedan los valores de 22mm y su factor de seguridad se mantenga en 1.2; Estas pruebas garantizarán que el diseño cumple con los requisitos estructurales basados en la Formula SAE.
- Ampliar el estudio a simulaciones de impacto y deformación con el mismo método de elementos finitos para evaluar la respuesta del bastidor ante colisiones leves y fuertes, permitiendo ajustar el diseño a zonas susceptibles, evitando en lo posible variar las características de masa y peso.
- Diseñar un protocolo de mantenimiento para la inspección constante de las soldaduras y las áreas críticas del bastidor, con el fin de garantizar integridad estructural y evitar fallos durante la competencia, este manual debería incluir inspecciones visuales basadas en puntos críticos y soldaduras que pueden ser basadas en el reglamento de la Fórmula SAE.
- La elección del aluminio 6061 T6 se basó debido a las propiedades mecánicas del material y otro factor es debido a que en la Fórmula SAE es comúnmente usado. Esta selección priorizó el rendimiento dinámico del vehículo y estructural del vehículo asegurando su competitividad en condiciones de competencia donde un menor peso y la relación peso/potencia son factores claves para el éxito, a pesar del mayor costo en comparación al acero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Analizador de metales de escritorio | OES | FOUNDRY- MASTER Smart | Hitachi High-Tech | Hitachi High-Tech Analytical Science. (s/f). Recuperado el 18 de diciembre de 2024, de https://hha.hitachi-hightech.com/en/campaigns/foundry-master-smart/

Aparicio, F., Vera, C., & Díaz, V. (2001). teoría de Los Vehículos automóviles. *Instituto Universitario*, 259.

Arteaga, O., Mena, S., Caiza, V., & Vilaña, J. (2015). *DISEÑO, SIMULACIÓN, OPTIMIZACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERÍA DE UN VEHÍCULO TIPO FÓRMULA SAE*. https://repositoriobe.espe.edu.ec/server/api/core/bitstreams/8fa84759-1813-4c43-87a2-3a38a179c96c/content

Azevedo, Á. F. M. (2003). *MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS*. http://www.fe.up.pt/~alvaro

Baltasar, O. (2016a). *ANÁLISIS MEDIANTE EL M.E.F. DE UN CHASIS FORMULA STUDENT*. http://hdl.handle.net/10317/5457

Baltasar, O. (2016b). *ANÁLISIS MEDIANTE EL M.E.F. DE UN CHASIS FORMULA STUDENT*. http://hdl.handle.net/10317/5457

BMW. (2022, enero 24). *REPARTO DEL PESO 50:50*. https://www.bmw.es/es/footer/footer-section/glosario-bmw/50-50-weight-distribution.html?utm_source=chatgpt.com

Cagigas Quintana, F. (2023). *DISEÑO CHASIS TUBULAR DE UN VEHÍCULO PARA LA FORMULA STUDENT EDICIÓN 2023*. https://hdl.handle.net/10902/29555

Cañizares, R. (2024). *DISEÑO DE CHASIS PARA UN FORMULA STUDENT*. https://repositori.tecnocampus.cat/bitstream/handle/20.500.12367/2643/TFG_FernandezCa%c3%b1izares_Memoria.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Cuenca, H., & Jara, K. (2022a). *OPTIMIZACIÓN DE PESO ESTRUCTURAL PARA UN CHASIS MONOPLAZA FORMULA STUDENT EB17 DE LA CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ UPS SEDE CUENCA*. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23663

Cuenca, H., & Jara, K. (2022b). *OPTIMIZACIÓN DE PESO ESTRUCTURAL PARA UN CHASIS MONOPLAZA FORMULA STUDENT EB17 DE LA CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ UPS SEDE CUENCA*. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23663

Fierro, R., & Ordóñez, A. (2018). *Clave para el desarrollo sostenible en Ecuador* (2a ed., Vol. 1). Universidad Politécnica Salesiana.

Godoy, J., Vergara, J., Oviedo, P., & Quispe, M. (2007). TEORÍA DE BILL MUNDY Y EL ÁNGULO EFECTIVO DE ATAQUE DE HERRAMIENTAS DE CORTE EN ALEACIONES DE COBRE. En *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* (Vol. 15).

Gómez, F., & Pineda, J. D. (2024). Comparación de mallas para el análisis de convergencia en el modelo de elementos finitos de un aerogenerador. *Universidad EIA*, 85.

Gonzáles, O., Gonzáles, C., & López, A. (2019). Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab. *Ideas en ciencias de la ingeniería*.

Guzmán, D. (2020). *DISEÑO DE CHASIS MONOPLAZA DE COMPETICION PARA FORMULA STUDENT*.

Macías, J. J. (2019). *DISEÑO DE UN CHASIS PARA UN MONOPLAZA ELÉCTRICO DE FORMULA STUDENT*. http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/15073

Manso Agundez, J. (2019). *Análisis y optimización topológica de un chasis para Formula Student*. http://uvadoc.uva.es/handle/10324/37839

Monge Francés, S. (2017). *Diseño y optimización del chasis de un monoplaza Formula Student mediante el método de elementos finitos* (Vol. 1). http://uvadoc.uva.es/handle/10324/25585

Orellana, D., Sáenz, J., & Ulloa, K. (2019). *Análisis estructural mediante elementos finitos para la optimización de un go-kart de competencia*. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18017/1/Rev_Juv_Cie_Sol_0201.pdf

SAE INTERNATIONAL. (2024a). *Formula SAE Rules 2024* (SAE INTERNATIONAL, Ed.; 1a ed.). SAE INTERNATIONAL.

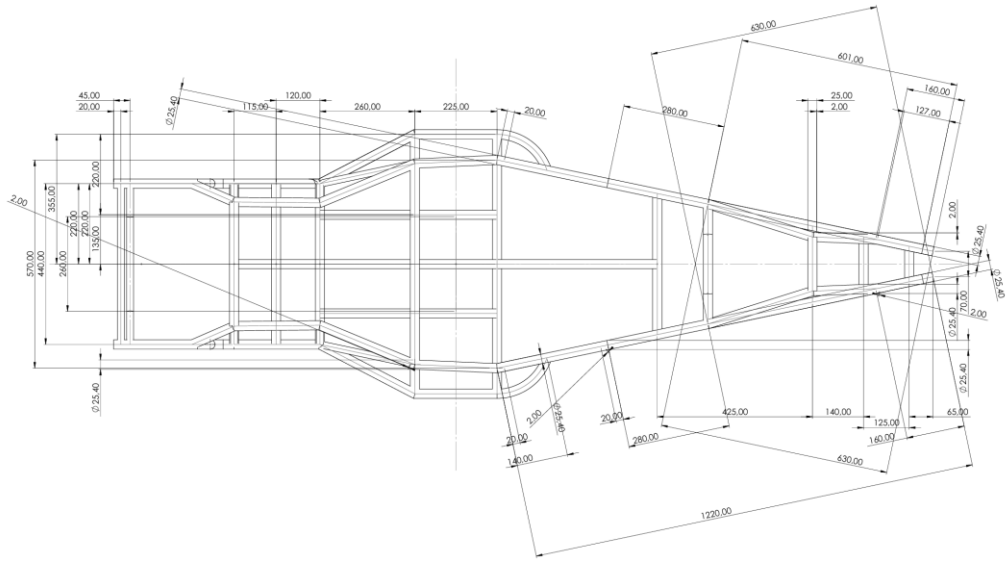
Tejada Castillo, J. (2019). *DISEÑO DE UN CHASIS DE FORMULA SAE*. https://crea.ujaen.es/handle/10953.1/9342

Valenzuela, R., Campos, D., Ramirez, C., Corral, C., Gonzales, C., Leonardo González Pinzón, C., Caberta, R., Dávila, J., & Romero González, J. (2013). *Diseño de chasis para un monoplaza formula SAE*. file:///C:/Users/DAVID/Downloads/Dialnet-DisenoDeChasisParaUnMonoplazaFormulaSAE-7070083%20(1).pdf

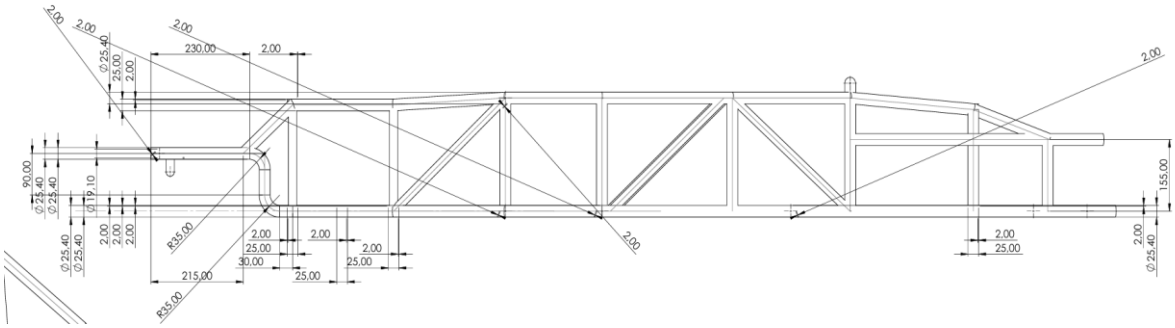
Vicente Alvarez. (2018). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CHASIS TUBULAR DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE ELÉCTRICO*. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15149/1/UPS-CT007481.pdf

ANEXOS.

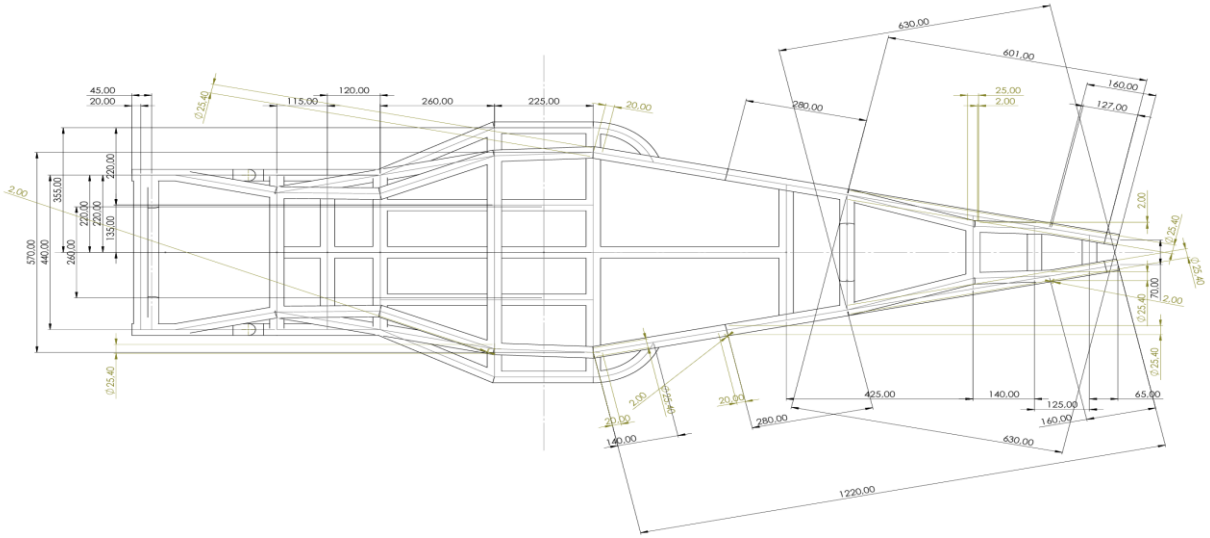
Anexo 1



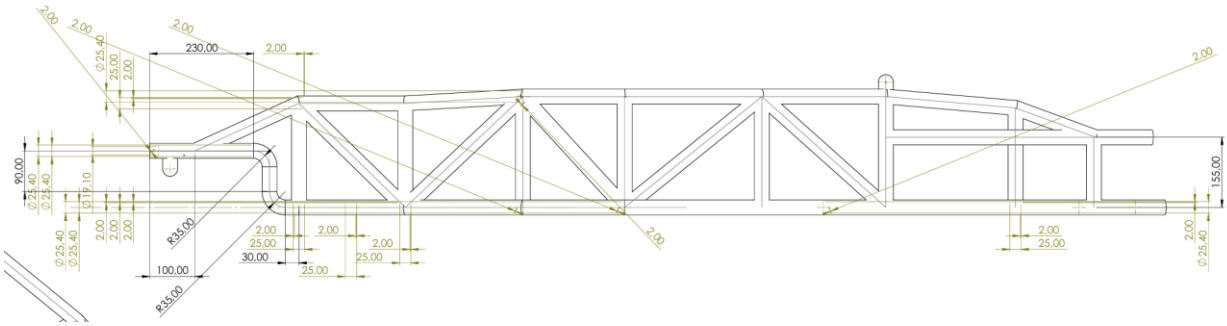
Anexo 2



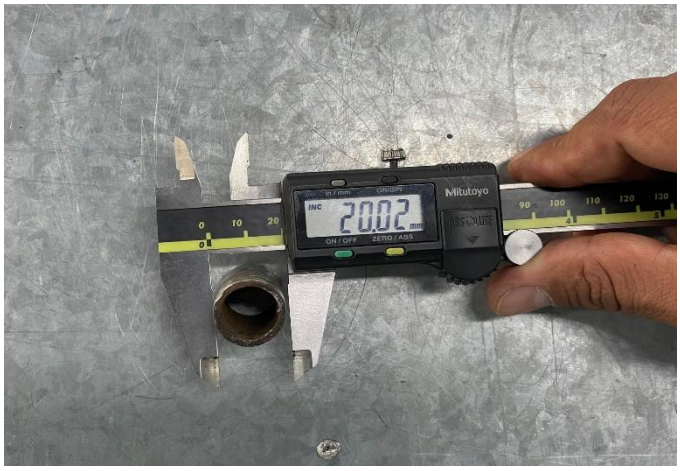
Anexo 3



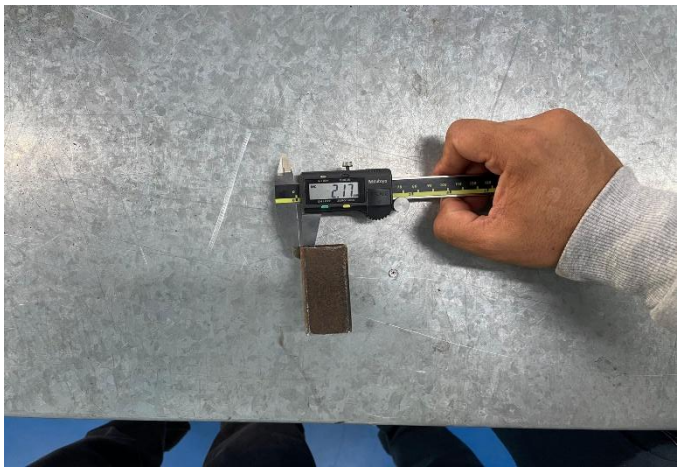
Anexo 4



Anexo 5



Anexo 6



Anexo 7

Anexo 8

Anexo 9

Anexo 10

Anexo 11

Anexo 12