

**OPTIMIZACION TOPOLOGICA DE UN CHASIS SSV PARA EL
DAKAR**

**JOSE LUIS SALGADO CORDERO
ANUAR ISAAC ROJAS MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA.
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2024**

**OPTIMIZACION TOPOLOGICA DE UN CHASIS SSV PARA EL
DAKAR**

**JOSE LUIS SALGADO CORDERO
ANUAR ISAAC ROJAS MUÑOZ**

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Asesor
RAFAEL EDUARDO TUIRÁN VILLALBA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2024**

08 de abril de 2024

Dedicatoria

Primeramente, agradecer a Dios por darnos la sabiduría en los momentos importantes, darnos las fuerzas tanto física y mentales para sobrellevar toda la responsabilidad que se tuvo a la hora de realizar este trabajo de grado.

Agradecer a familiares como nuestros padres y hermanos que cada día fue un apoyo y base fundamental en brindar el ánimo de seguir progresando día tras día.

Agradecer también a la parte docente e ingenieros de la facultad de ingeniería mecánica de la universidad pontificia bolivariana por brindarnos conocimientos y guiarnos a cumplir todas nuestras metas, muchas gracias por ayudarnos a hacer este sueño realidad.

Título del trabajo de grado:	OPTIMIZACION TOPOLOGICA PARA UN CHASIS SSV PARA EL DAKAR
Nombres y apellidos de los Estudiantes de Trabajo de Grado	Jose Luis Salgado Cordero Anuar Isaac Rojas Muñoz
Director(es):	RAFAEL EDUARDO TUIRAN VILLALBA
Unidad académica:	INGENIERIA MECANICA
Fecha de inicio:	Enero de 2022
Fecha de finalización:	Junio de 2023
Costo total del proyecto <i>(incluyendo descargas, pago de personal).</i>	\$25.000.000
Montos de contrapartida <i>(Entidad o dependencia que cofinancio).</i>	ninguno
Línea de trabajo o área del conocimiento en la cual se inscribió el trabajo	Resistencia de Materiales y Diseño de ingeniería
Empresa donde realizó el trabajo	Universidad Pontificia Bolivariana

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	14
2. Justificación.....	15
3. Objetivos	16
3.1 Objetivo General	16
3.2 Objetivos Específicos.....	16
4. Estado Del Arte	17
5. Marco Teórico	20
5.1 Método de Elementos Finitos.....	20
5.1.1 ¿Qué es el Método de Elementos Finitos?	20
5.1.2 Geometrías de Los Elementos.....	21
5.1.3 ¿Qué es y Cómo se Generan las Mallas?	24
5.1.4 Condiciones de Frontera.....	24
5.2 Chasis	25
5.2.1 Tipos de Chasis	25
5.3 Restricciones FIA.....	27
5.3.1 Grupo Técnico	27
5.3.2 Neumáticos.....	27
5.3.3 Motor.....	28
5.3.4 Chasis.....	28
5.3.5 Carrocería.....	29
5.3.6 Tamaño Máximo	30
5.3.7 Altura Máxima.....	30

5.3.8	Voladizo	30
5.3.9	Distancia Entre Ejes.....	30
5.3.10	Peso Mínimo.....	30
5.3.11	Generalidades del Motor.....	32
5.3.12	Posición de los Vehículos	32
5.3.13	Diseño de los Arcos	33
5.3.14	Dimensiones Neumáticos	33
5.3.15	Sistema de frenos	33
5.4	Parámetros	34
5.4.1	Rigidez.....	34
5.4.2	Rigidez Torsional y Flexión	34
6.	Metodología	37
6.1	Criterios de Diseño en la Metodología	37
7.	Resultados y discusión.....	44
7.1	Proceso de Optimización	44
7.1.1	Comparativa y Confirmación.....	44
7.1.2	Modelo 2D	44
7.1.3	Modelo 3D	48
7.2	Criterio de Diseño	57
7.2.1	Selección de Diseño Comercial	57
7.2.2	Cargas	58
7.3	Modelo A: Diseño Monocasco	59
7.3.1	Planteamiento de Diseño.....	59
7.3.2	Variables.....	60

7.3.3	Esquema Conceptual.....	62
7.3.4	Estructura 3D	62
7.4	Modelo B: Diseño Spaceframe	63
7.4.1	Diseño Esquemático	63
7.4.2	Estructura 3D	64
7.5	Proceso de optimización del Chasis	65
7.5.1	Condiciones de Frontera en Ansys Workbench	65
7.5.2	Condiciones de Optimización Topológica	69
7.5.3	Simulación de Optimización Topológica en Ansys Workbench	70
7.5.4	Postproceso Blender - Ntopology	72
7.5.5	Simulaciones Estáticas del Postproceso	76
7.5.6	Simulaciones Dinámicas del Postproceso	77
7.5.7	Proceso de independencia de malla.....	79
8.	Conclusiones y recomendaciones.....	84
9.	Bibliografía	lxxxvi

TABLA DE IMÁGENES

<i>IMAGEN 1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y DISTRIBUCIÓN DE MALLAS</i>	21
<i>IMAGEN 2. CHASIS MONOCASCO EN FIBRA DE CARBONO MCLAREN P1</i>	26
<i>IMAGEN 3. CHASIS SPACEFRAME TUBULAR DE CAN-AM MAVERICK</i>	26
<i>IMAGEN 4. MOTOR SOBREALIMENTADO A GASOLINA A ELECCIÓN.</i>	28
<i>IMAGEN 5. FIA STRUCTUAL PROTECTION NORMATIVE EXAMPLE</i>	33
<i>IMAGEN 6. DEFORMACIÓN EN ESTRUCTURAS TUBULARES TRIANGULARES, CUADRADA Y CUADRADA CON SOPORTE TRANSVERSAL</i>	34
<i>IMAGEN 7. RESUMEN DE LAS CARGAS QUE FLEXIONARÍAN EL CHASIS</i>	36
<i>IMAGEN 8. GRÁFICO QFD</i>	42
<i>IMAGEN 9. EVALUACIÓN COMPARATIVA DECRECIMIENTO DE VOLUMEN ENTRE CONDICIONES DE RESTRICCIÓN DE 40% Y 50% Y 30% DE CONSERVACIÓN DE VOLUMEN EN MODELO DE 20 MM DE ESPESOR.</i>	46
<i>IMAGEN 10. EVALUACIÓN COMPARATIVA DECRECIMIENTO DE VOLUMEN ENTRE CONDICIONES DE RESTRICCIÓN DE 40% Y 50% Y 30% DE CONSERVACIÓN DE VOLUMEN EN MODELO DE 10MM DE ESPESOR.</i>	47
<i>IMAGEN 11. EVALUACIÓN COMPARATIVA DECRECIMIENTO DE VOLUMEN ENTRE CONDICIONES DE RESTRICCIÓN DE 40% Y 50% Y 30% DE CONSERVACIÓN DE VOLUMEN EN MODELO DE 5 MM DE ESPESOR.</i>	48
<i>IMAGEN 12. MODELO VIGA 3D A OPTIMIZAR</i>	49
<i>IMAGEN 13. OPTIMIZACIÓN DEL MODELADO 3D DEPENDIENDO DEL NÚMERO DE ITERACIONES</i>	49
<i>IMAGEN 14. PASO A PASO DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN 3D</i>	50
<i>IMAGEN 15. CARACTERIZACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN 3D</i>	51
<i>IMAGEN 16. MALLADO DE LA OPTIMIZACIÓN 3D</i>	51
<i>IMAGEN 17. WIREFRAME DEL SÓLIDO 3D</i>	52
<i>IMAGEN 18. RESULTADO DE SIMULACIONES DEL SOLIDO 3D</i>	53

<i>IMAGEN 19. CONFIGURACIÓN DE ANÁLISIS DEL SOLIDO 3D</i>	54
<i>IMAGEN 20. DETALLES DE LA CONFIGURACIÓN DE SIMULACIÓN</i>	55
<i>IMAGEN 21. REFERENCIA COMERCIAL CAN-AM MAVERICK X3 – DAKAR 2022</i>	58
<i>IMAGEN 22. ESQUEMA CONCEPTUAL PARA EL MODELO MONOCASCO</i>	62
<i>IMAGEN 23. MODELO 3D DEL CHASIS MONOCASCO</i>	63
<i>IMAGEN 24. ESQUEMA CONCEPTUAL PARA EL MODELO SPACEFRAME</i>	64
<i>IMAGEN 25. MODELO 3D DEL CHASIS SPACEFRAME</i>	64
<i>IMAGEN 26. DISEÑO 3D DEL CHASIS MONOCASCO EN ANSYS CON SUS CARGAS</i>	66
<i>IMAGEN 27. DISEÑO 3D DEL CHASIS SPACEFRAME EN ANSYS CON SUS CARGAS</i>	67
<i>IMAGEN 28. GEOMETRÍA DE LA MALLA Y UBICACIÓN DE LOS NODOS</i>	67
<i>IMAGEN 29. SIMULACIONES ESTÁTICAS DEL CHASIS SPACEFRAME</i>	68
<i>IMAGEN 30. SIMULACIONES ESTÁTICAS DEL CHASIS MONOCASCO</i>	69
<i>IMAGEN 31. OPTIMIZACIÓN DEL CHASIS SPACEFRAME</i>	70
<i>IMAGEN 32. DETALLES DE LA OPTIMIZACIÓN DEL CHASIS SPACEFRAME</i>	71
<i>IMAGEN 33. OPTIMIZACIÓN DEL CHASIS MONOCASCO</i>	72
<i>IMAGEN 34. CHASIS MONOCASCO POSTPROCESADO EN BLENDER</i>	73
<i>IMAGEN 35. CHASIS SPACEFRAME POSTPROCESADO EN BLENDER</i>	74
<i>IMAGEN 36. CHASIS SPACEFRAME POSTPROCESADO EN NTOPOLOGY</i>	75
<i>IMAGEN 37. CHASIS MONOCASCO POSTPROCESADO EN NTOPOLOGY</i>	75
<i>IMAGEN 38. SIMULACIONES ESTÁTICAS DEL CHASIS SPACEFRAME POSTPROCESADO</i>	76
<i>IMAGEN 39. SIMULACIONES ESTÁTICAS DEL CHASIS MONOCASCO POSTPROCESADO</i>	77
<i>IMAGEN 40. SIMULACIONES DE IMPACTO FRONTAL DEL CHASIS MONOCASCO</i>	78
<i>IMAGEN 41. SIMULACIONES DE IMPACTO LATERAL DEL CHASIS MONOCASCO</i>	79

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS DE ELEMENTOS Y SUPERFICIES (BUDYNAS & NISBETT, 2012).	23
TABLA 2. MOTORES SOBREALIMENTADO A GASOLINA.....	31
TABLA 3. MOTORES NORMALMENTE ASPIRADOS Y MOTORES SOBREALIMENTADOS A DIESEL.....	31
TABLA 4. RESUMEN DE LOS AUTOS CON MAYOR RIGIDEZ TORSIONAL EN EL MERCADO.	35
TABLA 5. TABLA RECOPILATORIA DE PESOS DE QFD.....	41
TABLA 6. ENTIDADES Y PROPIEDADES ESCOGIDAS PARA LA OPTIMIZACIÓN 3D.....	52
TABLA 7. SIMULACIONES DE OPTIMIZACIÓN PARA CADA PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN.....	56
TABLA 8. COMPARATIVA COMERCIAL CON RESULTADOS HISTÓRICOS DE LA LÍNEA DE COMPETICIÓN SSV.....	57
TABLA 9. CARGAS APROXIMADAS Y CONSIDERADOS POR PESOS MUERTOS QUE ESTARÁN EN EL CHASIS.....	59
TABLA 10. VARIABLES PARA EL MODELO MONOCASCO.....	61
TABLA 11. VALORES MÁXIMOS PARAMETRIZADOS DEL SISTEMA DE SIMULACIÓN ESTÁTICA.	81
TABLA 12. VALORES MÍNIMOS PARAMETRIZADOS DE LA SIMULACIÓN ESTÁTICA.....	82
TABLA 13. PARAMETRIZACIÓN DE PROCESO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA EN CHASIS SPACEFRAME EN BASE A LA DISTANCIA DE MALLA	83
TABLA 14. VARIABILIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN EN BASE A LA INDEPENDENCIA DE MALLA.....	83

Resumen

En la siguiente investigación se realiza una optimización topológica a un vehículo SSV Dakar, en base a una metodología de trabajo QFD o “casa de calidad”, donde se parametriza todas las características que se debe tener en cuenta a la hora de hacer un diseño conceptual de un vehículo, seguidamente de ya escoger las características principales de nuestro diseño, se plantea un diseño en base a un modelo comercial de los usados en las diferentes competencias de Rally Dakar, en este caso un chasis Spaceframe y un monocasco serán el objeto de estudio para tener en consideración las condiciones de diseños necesaria, se le hará un proceso de optimización que comenzará con el diseño conceptual con ajustes propios y realizar simulaciones para verificar que cumpla las condiciones mínimas de operación, ya teniendo los 2 diseños se procede a usar Ansys Workbench para hacer la reducción de material por medio de la geometría de malla seleccionada y así tener nuestros 2 diseños optimizados, luego se procede a hacer un postprocesado de los 2 chasis para generar ya un diseño final de los 2 vehículos, donde por último, se hacen simulaciones estáticas y dinámicas para comprobar si en verdad los vehículos soportan los esfuerzos aplicados y saber las deformaciones que se pueden generar, y tener un factor de seguridad que sirva como guía para la comparación con otros modelos de chasis, todo esto para así desarrollar un producto eficiente en el que se pueda ahorrar material, y saber la funcionalidad y aplicabilidad que puede tener cada uno de los 2 chasis que se tuvo como objeto de estudio.

Abstract

In the following research a topological optimization of a Dakar SSV vehicle is carried out, based on a QFD or "quality house" work methodology, where all the characteristics that must be taken into account when making a conceptual design of a vehicle are parameterized, after choosing the main features of our design, a design is proposed based on a commercial model of those used in the different Dakar Rally competitions, in this case a Spaceframe chassis and a monocoque will be the object of study to take into consideration the necessary design conditions, an optimization process will be carried out starting with the conceptual design with its own adjustments and simulations to verify that it meets the minimum operating conditions, Once we have the 2 designs we proceed to use Ansys Workbench to make the material reduction by means of the selected mesh geometry and thus have our 2 optimized designs, then we proceed to make a post-processing of the 2 chassis to generate a final design of the 2 vehicles, where finally, static and dynamic simulations are made to check if the vehicles really support the applied efforts and know the deformations that can be generated, and have a safety factor that serves as a guide for comparison with other chassis models, all this in order to develop an efficient product in which you can save material, and know the functionality and applicability that can have each of the 2 chassis that were taken as the object of study.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito del diseño de ingeniería, la optimización topológica es una técnica que busca mejorar la estructura, análisis y generación de mecanismos más eficientes. Se trata de un método computacional numérico que utiliza el análisis mecánico para definir y generar una reorganización de la estructura y cumplir con la función de soportar cargas, reduciendo su peso y rentabilidad de producción en diferentes industrias. El chasis de un SSV es un ejemplo en el que se consideran muchos parámetros y estándares al realizar el diseño, incluyendo el material óptimo, las cargas que soportará y los esfuerzos a los que estará sometido. La optimización topológica también busca encontrar sistemas de estructuras que proporcionen resistencia y eficiencia mecánica. Con esta técnica se pueden obtener resultados de reducción de peso y mejoras en zonas con problemas de calentamiento. Se utilizan algoritmos que solucionan elementos finitos planos y que mediante interpolación lineal permiten solucionar problemáticas de optimización. Además, se planteó la pregunta de si se puede mejorar el chasis de vehículos SSV para competencias Dakar sin empeorar sus propiedades mecánicas y dinámicas. Se realizó una investigación para analizar diferentes parámetros y diseñar un chasis SSV reglamentado según la competencia Dakar. Se utilizó la optimización topológica para reducir material y costos, lo que brinda grandes ventajas en términos de resistencia y costo en comparación con otros sistemas comerciales. Esta investigación fue llevada a cabo por el semillero SIMEC de la Universidad Pontificia Bolivariana, enfocándose en el área de diseño y manufactura.

2. JUSTIFICACIÓN

La principal motivación de este trabajo es la necesidad de plantear un diseño estructural de un chasis de un vehículo SSV reglamentado según la competencia DAKAR. Esta investigación viene dada a través del semillero SIMEC de la Universidad Pontificia Bolivariana, y desde el área de diseño y manufactura se tiene como meta que, por medio del uso de la optimización topológica, que es una rama de la ingeniería que viene con gran avance en los últimos tiempos, y más específicamente en el tema de elementos finitos, y uso de software de diseño se le puede sacar gran provecho. Teniendo en cuenta el referente teórico a usar, se hará una discretización desde 0 de un modelo conceptual, y el hecho de hacer una buena optimización nos dará grandes ventajas que como ingeniero es lo que se quiere brindar como solución. Donde se espera que esto brinde grandes ventajas como la reducción de material, una reducción de costos a la hora de hacer la fabricación en masas de un chasis con el que se va a trabajar, y finalmente que a la hora de hacer una síntesis después de realizar la optimización topológica, brinde características parecidas o incluso mejores a los que ya hay comercialmente.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un vehículo monoplaza SSV de acuerdo con los requerimientos de competencia DAKAR haciendo uso de optimización topológica.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Delimitar el proceso de diseño del chasis de un vehículo SSV según las necesidades planteadas por la normativa FIA y DAKAR
- Estructurar el diseño conceptual y básico de un vehículo monoplaza de competencia SSV planteando los requerimientos necesarios según el reglamento Deportivo de Rallye Todo Terreno FIA 2020
- Desarrollar el diseño de detalle del vehículo planteando el proceso de optimización topológica del chasis.

4. ESTADO DEL ARTE

Para la fabricación del chasis de un kart KF4 se sigue la reglamentación impuesta por la comisión Internacional de Karting CIK/FI. Una vez tomada ya la referencia de la normativa a seguir se identificaron todos los parámetros necesarios, recopilando toda la información que es generada con los reglamentos para la construcción del chasis siguiendo todos los conceptos para la creación del prototipo. Teniendo ya todos los parámetros a trabajar, se utiliza un software de diseño como lo es CAD, se diseña la base para crear el chasis, teniendo en cuenta conceptos de estática, dinámica y resistencia de materiales, donde sabiendo estas condiciones se conoce los puntos críticos del diseño, para así conocer en que podría fallar, o que podría mejorar en futuras optimizaciones. Teniendo el diseño ya computarizado en CAD, se procede a analizar el comportamiento estructural del prototipo mediante MED con la asistencia de un software CAE, luego de ya hacer todas las pruebas y arrojar resultados positivos con los esfuerzos, cargas y diferentes características, proceden a plasmarlo físicamente, teniendo como base la aplicación en procesos de manufactura e ingeniería para sacarle mejor provecho a los costos de fabricación, materiales a usar y tiempo de hechura, por último, luego de tener el diseño finalizado, proceden a hacerle pruebas de esfuerzos, dinámicas y carga, comprobando si finalmente se cumplen las condiciones establecidas digitalmente mediante software, concluyendo que sí fue posible la creación del diseño del kart teniendo la reglamentación y normas estipuladas (Poma & Quezada, 2018).

Asimismo, otra aplicación que se le da a la optimización topológica se usa para hacer el diseño evolutivo para estructuras en 3 dimensiones de diversos materiales (Hiller & Lipson, 2019), el uso de algoritmos en esta investigación es la base para crear subestructuras que se adaptan a funciones personalizadas, teniendo como objeto de estudio la impresión 3D, que dependiendo del material permiten la fabricación de manera libre muchos arreglos en formay geometrías complejas. Algoritmos como el uso de codificaciones para proponer un código pseudo-generativa que genera de forma natural formas 2D y 3D suaves y de forma libre a

un nivel arbitrario de complejidad con un número mínimo de parámetros. Todo esto para que se generen diferentes matrices en tres dimensiones, para poder crear un algoritmo en lenguaje C++, y por medio de parámetros y diferentes evaluaciones logran generar una optimización topológica computacional por medio de códigos, esto da como resultado diferentes curvas que las catalogan como curvas estándar, donde haya una desviación que no va acorde a la tendencia de la curva habrá una falla crítica en el diseño teniendo en cuenta el material en uso, donde finalmente concluyen que lo complejas formas que puede tener un objeto con multimateriales, en vez de hacer diseños como CAD, existen modelos de algoritmos homogéneos como el que se presenta donde evalúan el contraste de una viga y la codifican y poder saber sus fallas.

Siguiendo con el método de la optimización topológica en 2007 se usó esta teoría en estructuras continuas para pretender obtener la distribución óptima de material en un dominio predefinido de modo que se cumplan las condiciones resistentes exigidas. Esto por medio de colocar varias variables que afecten al proceso y saber que variable afecta en algún punto de la formulación y así decidir si debe o no existir un material que resista. Se plantea un modelo donde usan la densidad relativa en la estructuración del material donde tienen un código del estado en que se encuentre (0 = vacío; 1 = lleno), esto lo hacen para evaluar una optimización topológica de estructuras continuas para hallar puntos máximos de rigidez en la estructura que estudian. Siguiendo con la metodología establecen un volumen ya predefinido que se distribuirá por todo el dominio a estudiar los parámetros que en este caso será la tensión y el peso de este, donde se presenta inconvenientes de restricción como la rigidez y desplazamiento de la estructura, en este caso el volumen establecido y que genera inconvenientes a la hora de una estabilización que trae consigo fenómenos indeseados a la hora de plantear un modelo, la formulación que plantean es una alternativa a los planteamientos que hay de máxima rigidez y en contrario hacen un análisis al diseño óptimo de mínimo de peso o coste para aguantar las restricciones estructurales estandarizadas por parámetros

a través de leyes o normas, usando un método de elementos finitos para problemas tridimensionales en tensión plana a través de mallas en base al volumen predefinido, llegando así a soluciones por medio de matrices llegando a la conclusión que por medio de la optimización topológica se puede resolver utilizando un algoritmo de Programación Lineal Secuencial (SLP) con búsqueda unidireccional cuadrática (QLS) para evitar los fenómenos oscilatorios en torno a la solución (Lopez Paris, 2007).

Más usos que se dan de la optimización topológica y que sirve como guía en 2020 se usó esta teoría para resolver la problemática del diseño de manguetas y obtener una solución para reducir el peso y sus características, primeramente usaron un software de diseño CAD para el modelado y verificar que la optimización si daba resultados positivos, como objeto de estudio usaron una mangueta con aleación de aluminio 7075-T6, donde primeramente hicieron un modelo geométrico con varios parámetros establecidos y luego haciendo una optimización por medio de una simulación en ANSYS WORKBENCH, lo que causó que hubiera cambios en el diseño inicial, generando cambios en la reducción del material y obteniendo un nuevo factor de diseño para las respectivas manguetas, luego de esto usaron la impresión 3D para el diseño ya optimizado para corroborar mediante pruebas físicas si cumplía con las características planteadas por medio del modelo, dando así pruebas positivas como la reducción del peso en los elementos estudiado que en este caso eran las manguetas, donde finalmente concluyen que por medio de la utilización de software de diseños, un buen modelo de optimización y generar buenos parámetros para restricciones se puede tener una mangueta resistente teniendo una aleación adecuada para el uso de esta, generando un costo de producción más factibles económicamente, utilizando varios criterios técnicos y diversos para tener una buena mangueta como resultado final (Padilla, Pozo, Ballin, & Herrera, 2020).

5. MARCO TEÓRICO

5.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

5.1.1 ¿Qué es el Método de Elementos Finitos?

El método de elementos finitos o FEM por sus siglas en inglés tiene sus inicios en la década de 1940 por Hrennikoff, McHenry y Newmark para solucionar esfuerzos en sólidos continuo, este método sugiere interpolaciones polinomiales por pasos sobre regiones triangulares como el método para modelar problemas de torsión. Con la llegada de las computadoras se logró reunir y resolver este tipo de ecuaciones en planteamientos matriciales, este método crece a medida que los avances tecnológicos lo permiten dan más vida a la experimentación con elementos matriciales. Permitiendo realizar análisis y formulaciones que un humano común nunca podría realizar (Budynas & Nisbett, 2012).

El método de elementos finitos puede concurrir en dos tipos de errores, los Errores computacionales y los Errores de conversión discreta los primeros se deben a problemas de redondeo en los cálculos de puntos flotantes de la computadora y de las formulaciones de los esquemas de integración numérica. Los segundos se delimitan al uso de un número finito de elementos al modelar la estructura, lo que induce errores al igualar la geometría y distribución del desplazamiento. (García & Antonio Martínez De La Concha, 2013)

Un ejercicio que ejemplifica los errores de conversión a valores discretos se considera en la siguiente estructura de placa delgada, la *Imagen 1* muestra un modelo de elementos finitos en el cual se emplean elementos triangulares simples de esfuerzo plano con 3 nodos. Los problemas de este elemento desembocan en que el elemento tiene dos lados rectos y otros varios curvos donde la superficie curva tiene un modelado deficiente mientras que el círculo tiene un buen modelado. El segundo problema, mucho más severo, es que las tensiones en diversas regiones de la estructura real cambian con rapidez, y el elemento de tensión constante solo

proporcionará una aproximación de la tensión promedio en el centro del elemento (Budynas & Nisbett, 2012).

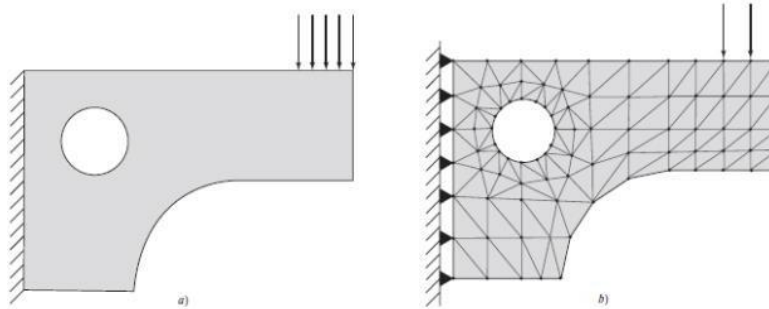


Imagen 1. Método de Elementos finitos y distribución de mallas

5.1.2 Geometrías de Los Elementos

Muchas geometrías de elementos se utilizan en el análisis de elementos finitos y aplicaciones específicas. Varios elementos utilizados por el código de software comercial como Los FEM de propósito general constituyen lo que se conoce como bibliotecas de elementos para cifrar. Los artículos se pueden colocar en las siguientes categorías: elemento lineal, elemento, Superficies, partículas sólidas y elementos objetivo-específicos. a continuación, se dan algunos, pero no todos, los tipos de elementos disponibles para el análisis de elementos finitos problemas estructurales. No todos los elementos admiten todos los grados de libertad. Detrás, Por ejemplo, un elemento de llave 3D solo admite tres grados de libertad de traslación. en cada nodo.

Tipo de elemento	Numero de nodos	Aplicaciones

Línea	Puntal	2	Barra con extremos articulados en tensión o compresión
	Viga	2	Flexión
	Armazón	2	Axial, torsional o de flexión con o sin rigidez de carga
Superficie	Cuadrilátero de 4 nodos	4	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión
	Cuadrilátero de 8 nodos	8	Esfuerzo o deformación plana, placa plana o cascaron en flexión
	Triangular de 3 nodos	3	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión, preferible cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros
	Triangular de 6 nodos	6	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, placa plana o cascaron en flexión, preferible

			cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros
Solido	Hexagonal de 8 nodos (paralelepípedo o ladrillo)	8	Sólido, placa gruesa.
	Pentagonal de 6 nodos (cuña)	6	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones
	Tetraedro de 4 nodos (tetra)	4	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones
Propósito especial	Brecha	3	Desplazamientos libres, para espacios preestablecidos
	Gancho, conexión	2	Desplazamientos libres, para espacios preestablecidos
	Rígido	variable	Restricción rígida entre nodos

Tabla 1. Caracterización de los tipos de elementos y superficies (Budynas & Nisbett, 2012).

5.1.3 ¿Qué es y Cómo se Generan las Mallas?

La red de elementos y nodos que delimitan una región se conoce como malla. La densidad y el tamaño de la malla aumenta a medida que se colocan más elementos en un área determinada. La optimización de la red ocurre cuando la red se cambia de un análisis de modelo a otro. El siguiente análisis para obtener mejores resultados. Los resultados suelen ser mejores cuando la densidad de la red aumenta en regiones con altos gradientes de presión y/o cuando las regiones de transición geométrica están uniformemente entrelazadas.

- Generación manual de malla: es el método más tedioso y el primero con el que se desarrolló este tipo de análisis. Como se interpreta, se discretiza el objeto en nodos y elementos y se hacen los cálculos por caculo en computadora para determinar una solución.
- Generación semiautomática de malla: simplemente es la generación automática del sistema con una parametrización y control más directo por el diseñador.
- Generación completamente automática de mallas: en este ambiente el programa hace control del diseño, de esta forma el programa discretiza las zonas con mayores esfuerzos, delimita un crecimiento de la malla de forma distribuida para ahorrar recursos y tener respuestas más claras al análisis (Budynas & Nisbett, 2012).

5.1.4 Condiciones de Frontera

Posiblemente simular condiciones de contorno y otros tipos de restricciones es la parte más difícil de modelar con precisión una estructura es el análisis de elementos finitos. Con limitaciones específicas, es relativamente fácil causar errores de omisión y distorsión. Es posible que los analistas deban probar diferentes enfoques para modelar las restricciones de la magia. Como las uniones de tornillos, soldadura, etc., no es simple. Las juntas fijas o tornillos son ideales. Las pruebas deben limitarse a problemas menores y no Estructura grande y compleja. A veces, la naturaleza exacta de la afección es Las fronteras o los límites son inciertos, solo

puede haber límites para el comportamiento. Por ejemplo, se diseñan ejes de cojinetes reforzados simples. Probablemente nn soporte es algo entre un soporte simple y un soporte constante y puede analizar ambos términos Establecer límites. Sin embargo, suponiendo un soporte simple, los resultados son conservadores de para esfuerzo y deflexiones. Es decir, la solución pronostica esfuerzos y deflexiones mayores a los reales (Budynas & Nisbett, 2012)

5.2 CHASIS

Se denomina chasis a la estructura que conforma y soporta los demás componentes de un equipo, tiene la funcionalidad de sujetar todas las cargas y ofrecer una resistencia y protección al equipo, este elemento se basa en 3 condiciones o variables que a la hora de optimizarlos mejoraran en conjunto todo el ensamble, en primera parte está la ligereza, en muchos casos se necesita que el chasis de un equipo no genere una sobrecarga extra que puede disminuir la eficiencia de los demás componentes como puede ser el caso el chasis para un motor, en segundo tenemos la rigidez, lo que se busca con esto es que además de que el chasis sea ligero, sea capaz de resistir impactos y con esto que tenga una mejor protección el equipo, como por ejemplo en un automóvil, que sea lo más resistente posible a la hora de generar un choque, y por último, tenemos la economía, el costo que se tiene al momento de elegir el material con que se fabricará este elemento y que sea lo mejor posible.

5.2.1 Tipos de Chasis

5.2.1.1 Chasis monocasco

este tipo de chasis tiene la particularidad que integra carrocería y chasis en la misma estructura, es fabricado generalmente por aluminio, acero y materiales compuestos, y se caracteriza por ser un chasis con elevado costo y que solo es usado en autos de lujo y en autos de competencia de Fórmula 1, así como se muestra en la Imagen 2.



Imagen 2. Chasis Monocasco en Fibra de Carbono McLaren P1

5.2.1.2 Chasis Space frame

Este chasis viene definido por un estudio computacional donde se busca que la estructura del elemento sede por enlaces que se fijan a lo largo de todos los nodos del chasis, creando así una especie de marco o esqueleto del carro como muestra la Imagen 3, y que así cumpla con la función de soportar y agregar rigidez a lo que se quiere proteger, que en este caso sería los componentes del vehículo, y que luego de tener la estructura se coloque los panes o carrocería restante, normalmente este chasis se fabrica en la mayoría de aluminio y en otros casos en acero.



Imagen 3. Chasis Spaceframe Tubular de Can-am Maverick

5.3 RESTRICCIONES FIA

La federación internacional de automovilismo FIA comprende en su reglamento provisional de autocamiones a fecha de 2022 las reglas complementarias SSV donde delimita las principales modificaciones y restricciones que deben tener los vehículos en sus diversas categorías de competición, aclarando la categorización de grupos técnicos y materiales de construcción. (Reglamento Dakar, 2020)

De las principales modificaciones para tener en cuenta recurren las siguientes, que encierran las modificaciones de diseño aptas para ser aceptado dentro de la competición.

5.3.1 Grupo Técnico

Group T4 "SSV "

Lightweight Series Production Cross-Country Side-by-Side Vehicles, named SSV for the Dakar Rally, in accordance with A.S.O. Regulations (based on the FIA Regulations Appendix J Article 286a), see article T4 of the attached Technical Regulations.

Groupe T4.1: Lightweight Series Production Cross-Country Side-by-Side Vehicles, with Turbo.

Groupe T4.2: Lightweight Series Production Cross-Country Side-by-Side Vehicles, without turbo (Reglamento Dakar, 2020)

5.3.2 Neumáticos

Para las especificaciones de peso, solo las ruedas de aluminio son permitidas por encima de los 13 kilogramos, para otros materiales y aleaciones tienen que ser menos o igual a 13 kilogramos estrictamente, en términos de la presión interna de los neumáticos se considera un límite de 2,5 bares, por último, el tamaño de los

neumáticos vendrá rígido un por un diámetro máximo de 810 mm medido con una presión máxima como la anterior mencionada (Reglamento Dakar, 2020).

5.3.3 Motor

El motor seleccionado dentro de la categoría roza los 200HP siendo de 900cc de cilindrada y con un sistema de 3 en línea como se evidencia en la Imagen 4. Motor eficiente para llegar a los 130km/h máximos dentro de la competición y que garantiza consumo equilibrado de combustible en la competición (ROTAX, 2021)



DETALLES TÉCNICOS

Familia de motores	4-tiempos
Número de cilindros	3
Potencia	0 kW / 200 HP
~ Peso	126 kg
Potencia R.P.M.	kW / 7750 rpm
Engranaje	Ninguno
Tecnología	ACE (ADVANCED COMBUSTION EFFICIENCY), TURBOCHARGED

Imagen 4. Motor Sobrealimentado a Gasolina a elección.

5.3.4 Chasis

Solo se autorizan los chasis tubulares de aleaciones a base de hierro, El espesor de los tubos que constituyen las partes estructurales del chasis no debe ser inferior a 1,5 mm, Todos los tubos que constituyen la estructura de seguridad deben tener las dimensiones mínimas siguientes: 50x2 mm (2.0"x0,083") o 45x2,5 mm (1.75" x 0,095"), la parte trasera del tubo del arco principal al nivel de su pie de anclaje no debe estar a más de 980 mm del centro de la rueda trasera, para los vehículos construidos con una estructura de seguridad que tenga un segundo arco principal, se tomará como referencia el segundo arco principal, una zona de relleno de materiales de tipo CF45M, de un espesor mínimo de 40 mm, debe estar colocada sobre el volante de dirección en una superficie mínima de 20 000 mm² (200 cm²) para proteger la cara del Piloto (Reglamento Dakar, 2020).

5.3.5 Carrocería

Todos los elementos de la carrocería deben estar completa y cuidadosamente acabados, sin piezas provisionales ni simuladas, y sin ningún ángulo cortante, ningún elemento de la carrocería puede presentar elementos cortantes o puntiagudos, en caso de tener un parabrisas que es opcional debe estar constituido por vidrio laminado, cualquier vehículo debe estar equipado de una carrocería de un material duro y no transparente que se eleve como mínimo hasta el centro del volante, sin poder estar a menos de 420 mm por encima del plano de fijación del asiento del conductor, y proporcionando una protección contra las proyecciones de piedras, la carrocería debe recubrir en proyección vertical al menos 120° de la parte superior de las ruedas (situada por encima del eje de la rueda visto de lado) y ningún elemento mecánico debe estar a la vista desde arriba salvo los amortiguadores, los radiadores, los ventiladores y las ruedas de repuesto, incluyendo puntos de anclaje y de fijación, la carrocería debe como mínimo bajar o prolongarse hacia la parte trasera hasta el nivel del borde superior de la llanta, todas las partes que tengan una influencia aerodinámica y todas las partes de la carrocería deben estar fijadas a la parte enteramente suspendida del vehículo (conjunto chasis/carrocería), no conllevar ningún grado de libertad, estar firmemente fijadas y permanecer inmóviles con respecto a esta parte cuando el vehículo se desplace exceptuando las guillotinas/palas de ventilación de los Pilotos y/o copilotos, el vehículo debe ir equipado con dos retrovisores, uno a cada lado del vehículo, con el fin de tener una visión eficaz hacia atrás, cada retrovisor debe tener una superficie mínima de 90 cm², los Comisarios Técnicos se asegurarán mediante una demostración práctica que el piloto, sentado con normalidad, puede ver claramente los Vehículos que le siguen, por consiguiente, el piloto debe identificar letras o cifras de 15 cm de altura y 10 cm de anchura, situadas al azar en unos paneles situados detrás del vehículo de acuerdo con las siguientes instrucciones: Altura Entre 40 cm y 100 cm del suelo; Ancho 2 m a cada lado del eje del vehículo; Posición 10 metros detrás del centro del eje trasero del vehículo (Reglamento Dakar, 2020).

5.3.6 Tamaño Máximo

El ancho máximo de la carrocería queda fijado en 2000 mm sin los retrovisores.

5.3.7 Altura Máxima

En una superficie mínima de 1 m² (1m x 1m), el techo debe estar situado a una distancia vertical mínima de 1410 mm de la superficie de referencia.

5.3.8 Voladizo

Los voladizos delantero y traseros no deben ser inferiores a 660 mm, visto en proyección vertical, este valor de 660 mm debe mantenerse en una distancia mínima de 500 mm alrededor de la línea central del automóvil (250 mm a cada lado) (Reglamento Dakar, 2020).

5.3.9 Distancia Entre Ejes

Si el chasis (o el monocasco) proceden de un vehículo con una producción superior a 1000 unidades por año, se debe conservar la distancia entre ejes de serie, o puede ser modificada con la condición de que no sea inferior a 2900 mm, para los chasis tubulares, la distancia entre ejes está fijada a 2900 mm +/- 60 mm de tolerancia (Reglamento Dakar, 2020).

5.3.10 Peso Mínimo

Los vehículos están delimitados en toda razón por la definida dentro de la normativa dependiendo de la cilindrada del vehículo (Tabla 2. Motores Sobrealimentado a Gasolina Tabla 2 y Tabla 3)

Motores sobrealimentados a gasolina		
Cilindraje (cm ³)		Peso (kg)
Sobre	Hasta e incluyendo	
0	5950	1850

Tabla 2. Motores Sobrealimentado a Gasolina

Motores normalmente aspirados y motores sobrealimentados a Diesel		
Cilindraje (cm3)		Peso (kg)
Sobre	Hasta e incluyendo	
2000	2250	1400
2250	2500	1475
2500	2750	1475
2750	3000	1550
3000	3250	1550
3250	3500	1625
3500	3750	1625
3750	4000	1700
4000	4250	1700
4250	4500	1775
4500	4750	1775
4750	5000	1850
5000	5250	1850
5250	5500	1925
5500	5750	1925
5750		2000

Tabla 3. Motores normalmente aspirados y motores sobrealimentados a Diesel

Este es el peso del automóvil sin combustible en cualquier momento de la competición, con dos ruedas de repuesto, los niveles de líquido refrigerante y aceite lubricante del motor y líquido de frenos deben estar en sus posiciones normales.

5.3.10.1 *Peso Mínimo sin Tripulación y sin Equipo*

Este es el peso del automóvil sin combustible en cualquier momento de la competición, con dos ruedas de repuesto. Los niveles de líquido refrigerante y aceite lubricante del motor y líquido de frenos deben estar en sus posiciones normales.

5.3.10.2 *Peso Mínimo con Tripulación y con Equipos*

El peso mínimo con tripulación y los equipos se determinará con el peso mínimo sin tripulación y sin equipos y se le suma 220 kg para los Rallye Todo Terreno u otros 200 kg para Bajas.

5.3.11 Generalidades del Motor

El motor debe proceder de un motor de un vehículo homologable* en Grupo A, GT (Reglamento de homologación GT 2012) o T2. Que cumpla con los criterios de homologación, pero no es obligatorio que el vehículo aún esté siendo producido.

Para motores normalmente aspirados se permite el mecanizado local y/o la soldadura del bloque motor con el único fin de montar la caja de cambios, así como equipos auxiliares como lo puede ser el soporte de este mismo o el soporte del alternador.

Para los motores sobrealimentados a gasolina primeramente se tiene una cilindrada nominal que será de 3500 cm³, y de igual manera que para el motor anteriormente mencionado se permite el mecanizado local y/o soldadura del bloque para la composición del motor, para las demás partes como el pistón, bielas, culata se tiene que mantener conforme al modelo original del motor, las demás partes son de elección libre.

5.3.12 Posición de los Vehículos

El cigüeñal debe estar delante del centro de la distancia entre ejes e instalado longitudinalmente para los chasis tubulares, la altura mínima entre el eje del

cigüeñal y la superficie de referencia es de 190 mm, cualquier cambio necesario para obtener este valor está permitido para un chasis monocasco.

5.3.13 Diseño de los Arcos

Los arcos deben ser conformes a los Reglamentos Score (Imagen 5), (ver Artículo CR33) o Artículo 283.9 del Anexo J – FIA. (Reglamento Dakar, 2020).

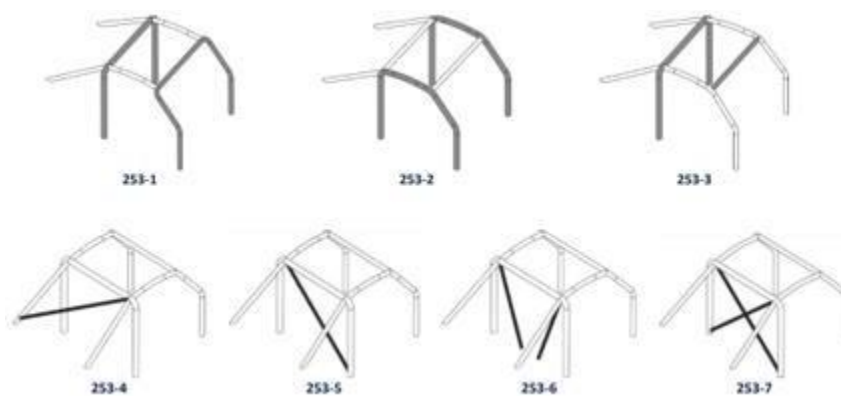


Imagen 5. FIA Structural Protection Normative Example

5.3.14 Dimensiones Neumáticos

Los neumáticos deben respetar las siguientes medidas:

- 940 mm máximo para los Vehículos 2 ruedas motrices
- 810 mm máximo para los Vehículos 4 ruedas motrices.

O respetar el Artículo 285.8, Anexo J – FIA y el Artículo T1P8 del presente Reglamento Técnico.

5.3.15 Sistema de frenos

Es de elección libre siempre y cuando sea activado y controlado por el conductor y la presión sea generada por el freno de mano.

5.4 PARÁMETROS

5.4.1 Rigidez

El diseño tubular como herramienta de construcción es uno de los más eficientes mientras recurra a la conservación de asignar las cargas en las tuberías solo a compresión o tensión respecto a las fuerzas torsionales y de flexión que son las que más afectan a este tipo de chasis. y además mientras también se mantenga el sistema estructural triangular y en las zonas donde se requiera el posicionamiento de uniones transversales en zonas cuadradas. Así como se ve en la Imagen 6, donde en la estructura triangular no sufre deformación al aplicar fuerza, y en la estructura cuadrada sin el soporte transversal sufre deformación, problemática que se soluciona al añadir una sección transversal de soporte (Lafuente Ibanez, 2017).

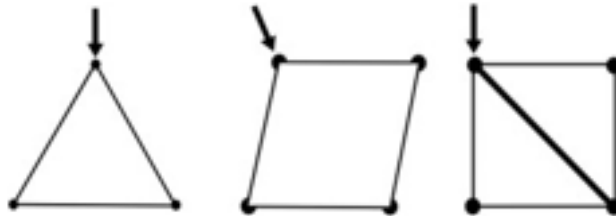


Imagen 6. Deformación en Estructuras Tubulares Triangulares, Cuadrada y Cuadrada con Soporte Transversal

5.4.2 Rigidez Torsional y Flexión

Un chasis al momento de soportar cargas como los ejes, las masas como lo son el motor, transmisión, aditamentos y piloto tiende a ser una estructura compleja que debe soportar grandes deformaciones o desplazamientos generalizados. Donde en este entra el concepto de rigidez definida por la fuerza ejercida en cualquier unidad de pascuales por una variación de desplazamiento en una unidad de mediada comúnmente esta rigidez se da en MPa/mm

5.4.2.1 Rigidez Torsional

La rigidez torsional en una barra recta de sección uniforme es la relación entre el momento de torsión aplicado en uno de sus extremos y el ángulo girado por este extremo, al mantener fijo el extremo opuesto de la barra. Viene definida por la fórmula:

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

donde K es la rigidez torsional en N·m/º, M el par aplicado en N·m y θ el ángulo que gira la estructura en grados (Lafuente Ibanez, 2017).

La rigidez torsional también se puede calcular con el cálculo de la fuerza por la distancia entre la aplicación de las cargas entre el cálculo tangencial de la suma de las deformaciones verticales en cuestión de la distancia entre las cargas, la fórmula es la siguiente:

$$K = \frac{F * L}{\tan^{-1} \left(\Delta Z_1 + \frac{\Delta Z_1}{2L} \right)}$$

En casos de automóviles donde es publica la información de los valores de rigidez torsional en el chasis se encuentran datos como lo muestra la Tabla 4.

Modelo	Nm / grado
Rolls-Royce Phantom	40.500
Mercedes-Benz Clase S (2014)	40.500
Volkswagen Phaeton	37.000
Porsche Cayenne	36.900
Audi A8 (2003)	33.000

Tabla 4. Resumen de los Autos Con Mayor Rigidez Torsional en el Mercado.

Teniendo en cuenta registros obtenidos existen chasis de autos como el Porsche Cayenne que usualmente también es usado en deportes de Off-Road y que ciertamente también existen registros de que en la formula SAE y los vehículos de fórmula 1 que llegan a rigidez torsional de 30000 Nm/ grado y algunos como el Ford Mustang Coupe 20000 Nm/grado y el Bugatti Veyron 60000 Nm/grado. (DSPORT, 2022). Por lo que se decide desde un principio intentar lograr al menos un valor entre 40,500 Nm/grado y 60000 Nm/Grado de resistencia para el chasis (Krzikalla, Mesicek, Petru, Sliva, & Smiraus, 2019).

5.4.2.2 Rigidez a Flexión

Dentro del concepto de rigidez a flexión los pesos que son soportados dentro del vehículo como lo son el motor, la transmisión, el chasis, los pasajeros y aditamentos llegan a generar una flexión que debe ser soportada por las suspensiones y ejes y al mismo tiempo deben mantener la integridad estructural del chasis en condiciones de flexión mucho más grandes. El componente de unión estructural de estos elementos simplemente se soporta dentro del chasis y en muchos casos no es significativo, pero si es determinante estudiarlo en simulación en esta práctica inicial (Monge Frances, 2017)

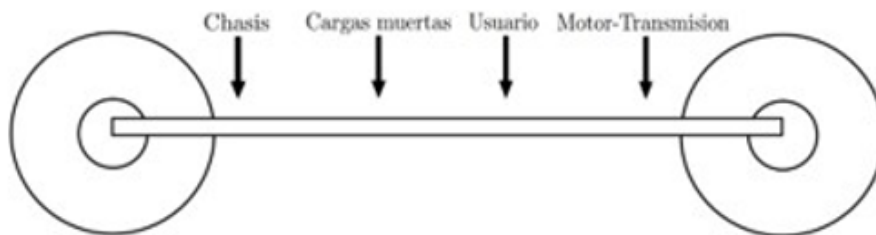


Imagen 7. Resumen de las Cargas que Flexionarían el Chasis

6. METODOLOGÍA

La metodología aplicada a este proyecto es de tipo descriptiva - experimental, descriptiva debido a la caracterización del chasis, y experimental debido a la evaluación del comportamiento del chasis a partir de los parámetros que influyen en el proceso de optimización topológica. Estas mejoras son posibles a partir del uso de las herramientas computacionales como ANSYS donde se puede variar las condiciones esfuerzos, pesos, factor de seguridad, entre otros parámetros.

Esta investigación se hizo por medio de 4 etapas, cada etapa cuenta con un fin y un objetivo claro. La primera etapa consta en formar un diseño, y verificar si se puede mejorar por medio de cálculos en temas como estática, resistencia de materiales y diseño de ingeniería. La segunda etapa se toma el diseño del chasis y se hace el boceto en el software computacional, teniendo ya la estructura en Ansys se hace el estudio de elementos finitos para la optimización de este mecanismo. En la tercera etapa, luego de hacer la optimización se harán simulaciones dinámicas y estáticas para saber si luego de hacer todo el proceso de reducción de material en el diseño, es capaz de soportar las diferentes pruebas como de compresión, tracción y peso. La última etapa consta de tener el diseño de los chasis optimizados, a un programa de post-procesamiento para dejar el chasis listo como material de producción en masa, y hacer que el procesamiento nos dé un diseño 3d, que brindará la posibilidad de generar un modelo a escala de los chasis.

6.1 CRITERIOS DE DISEÑO EN LA METODOLOGÍA

Dentro del estructura método metodológico se planteó el desarrollo de un sistema QFD "Casa de la calidad" donde se plantearon situaciones problemas y necesidades comunes a la hora de plantear un vehículo a competición así se definieron unos QUE'S y unos COMO que plantean necesidades enteras y dan soluciones comprometidas, que son comparadas por puntuaciones y en las que se determinan criterios de calidad estables donde se presentan cuáles son las principales

características que facilitarían el cumplimiento de más cantidad de Que's así dando luego con comparativas de diferentes diseños una estandarización de un diseño con planteamientos de necesidades concretas y con soluciones firmes. Al plantear esto se delimitaron necesidades en materiales, control, fabricación, vida útil, costos y seguridad a la operación, la Tabla 5 muestra todos los criterios elegidos y sus respectivos pesos.

	Demanded Quality (Ques a solucionar)	Quality Characteristics (Comos / soluciones para los Que)	Difficulty	Max Relationship in value column	Weight / Importance	Relative Weight
1	Sea Liviano	Use materiales resistentes y livianos	0	9	472,8	11,1
7	Resistencia estructural	Tenga sistema de triangulado estructural	3	9	337,5	7,9
14	Cumpla con los soportes estructurales	Sea diseñado de acuerdo con la reglamentación FIA-DAKAR	2	9	303,4	7,1
20	Sea de fácil mantenimiento frente a fracturas.	Tenga materiales accesibles de costo normalizado y	1	9	269,9	6,3

		de fácil reparación.				
19	Cuide al conductor en accidentes fuertes	Este estructurado para que mediante deformaciones o choques el conductor mantenga su integridad	1	9	258,7	6,1
2	Sea Rápido	Use un motor y sistema de transmisión adecuado	4	9	257,6	6
6	Simplicidad estructural	Sea un chasis tubular soldado completo	5	9	242,4	5,7
17	Soporte niveles de carga y estrés de más del 30% del soporte nominal	Tenga alto rango de rompimiento frente a esfuerzos o flexiones grandes	2	9	233,8	5,5

15	Mantenga rigidez torsional	Sea diseñado simulando condiciones	1	9	225,8	5,3
5	Que cumpla con fácil mantenimiento motor.	Pueda ser de forma fácil retiradas las tapas para acceso al motor	3	9	221,2	5,2
3	Sea Cómodo	Adapte el espacio	4	9	213,5	5
18	Sea de fácil construcción	Sea un chasis tubular	1	9	212,6	5
4	Cumpla requerimientos de seguridad	Tenga cinturones de 5 puntos y resista grandes impactos	5	9	201,4	4,7
13	Se adapte a configuraciones de suspensión	Tenga soportes para instalación de suspensiones de gas o la versión necesaria	1	9	148,4	3,5
8	Resistencia a ambientes hostiles	Tenga protección anticorrosión	2	9	130,1	3,1

16	Mantenga rigidez a flexión	Sea diseñado simulando condiciones	1	9	133,2	3,1
9	Resistencia a fuertes golpes	Distribuya los impactos por el chasis.	2	9	117,2	2,7
111	Tenga bajo coeficiente aerodinámico	Que se apoye en la carrocería para ser aerodinámico	5	9	114,9	2,7
12	Soporte modificaciones en potencia	Tenga un motor apto con modificaciones forjadas y cilindraje mediano	1	9	97,9	2,3
10	Que sea estético	Tenga un concepto estético en la carrocería	2	9	71,9	1,7

Tabla 5. Tabla Recopilatoria de Pesos de QFD



Imagen 8. Gráfico QFD

En base a los resultados obtenido por medio del diagrama QFD, y darle un peso y una importancia a los criterios que pueden afectar más a la hora de realizar el diseño, se pudo llegar a los siguientes resultados:

- La principal característica identificada es la ligereza del chasis, como primer parámetro dentro de las opciones planteadas se considera que el chasis a

diseñar sea liviano, ya que esto contribuye a la eficiencia y rendimiento del vehículo. Se valora el uso de materiales que sean capaces de soportar grandes esfuerzos sin comprometer la resistencia estructural.

- Resistencia estructural: dentro del planteamiento de diseño se considera que el chasis deba resistir cargas comparadas a impactos a alta velocidad y al desplazamiento en zonas con ambientes con terrenos complicados, pues las condiciones de Rally que necesita el diseño suponen a someter a difíciles situaciones el chasis.
- Cumplimiento de normativas de seguridad: se expresa la necesidad de cumplir con las características planteadas dentro del normativo de la FIA, euro NCAP y el Rally Dakar. Estas normativas establecen requisitos rigurosos en términos de tamaño, estructura y factores de seguridad, y se considera esencial cumplir con ellos para garantizar la protección de los ocupantes del vehículo.
- Simplicidad estructural: se considera que la simplicidad estructural del diseño favorece a la distribución de cargas dentro del chasis para así dar protección en el habitáculo del vehículo, por lo que se considera usar un diseño estructural de armaduras y geometrías triangulares que supongan una distribución de las cargas en el sistema, para así evitar deformaciones que comprometan la seguridad del ocupante y la operatividad del chasis.

Estos resultados reflejan las principales necesidades y expectativas en cuanto al diseño del chasis. Para satisfacer estas demandas, se deben enfocar los esfuerzos de diseño y desarrollo en lograr un chasis liviano, resistente, que cumpla con normativas de seguridad, de fácil mantenimiento, proteja al conductor frente a impactos y tenga una estructura simple.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

7.1 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Dentro del proceso de optimizar el chasis elegido ya siendo este el chasis de estructura espacial / SpaceFrame, se encontró la necesidad de verificar el funcionamiento del módulo de optimización de ANSYS Workbench haciendo uso de la simulación de cargas en una viga empotrada, que ha sido evaluada ampliamente en la literatura en este caso con el método BESO3D y los resultados se resumen a continuación:

7.1.1 Comparativa y Confirmación

Dentro del proceso de optimización se planteó replicar dos modelos de optimización planteados dentro del libro, "Evolutionary topology optimization of continuum structures" por X. Huang and Y.M. Xie donde se plantea una simulación en la página 12 punto 2.3.2 "Example of a short cantiléver" y en la página 33 el punto 3.8 "Example of a 3d estructura" un modelo de viga 2d y un modelo de viga 3d donde se realiza un planteamiento según condiciones de compliance restriction y reducción de la fracción de volumen de los sólidos para tener resultados garantizados de optimización topológica.

7.1.2 Modelo 2D

El ejemplo de topología 2D es planteado con una viga de 0.16 m de largo y 0.1 metros de alto, con 0.001m de espesor, se plantea un módulo de Young de 207 GPa y un Poisson Ratio de 0.3, se plantea la división del dominio computacional en un conjunto de 32x20 elementos, y se considera una carga de 3kN en el extremo opuesto de la sujeción de la viga. Para la obtención de las topologías usando el módulo de Optimización Topológica de Ansys se tienen las siguientes condiciones:

- Se consideraron 3 grosores de lámina, de 20mm 10mm y 5mm así mismo para cada simulación se establecieron como función objetivo 50%, 40% y 30% de retención de volumen respectivamente.
- El proceso de simulación y optimización topológica fue comprendido en un computador de uso propio, con un almacenamiento comprendido por un SSD NVME 1TB con velocidades de lectura escritura aproximadas de 4000Mb/s, Procesador Intel I5 12450H 4.40 GHz 95W 8 Núcleos, y una tarjeta gráfica Nvidia RTX 3050 con los drivers Nvidia Studio para optimizar procesos de cómputo y cálculo múltiple en ANSYS 2022 R1.

Las soluciones fueron las siguientes:

- En la Imagen 9 se tiene que el sistema de 20mm de espesor se encontró que con las condiciones de 50% de retención se mantenían secciones estructurales casi laminares de 1 a 5mm desarrollando una estructura sólida con diversos grosores en secciones estructurales y siendo el caso de 40% un sólido con una convergencia de buena calidad, donde se ven secciones estructurales sólidas y en la sección de 30% se ven partes sólidas que se puede considerar el programa intentó converger pero no desarrolló un resultado con secciones estructurales completamente unidas entre ellas.

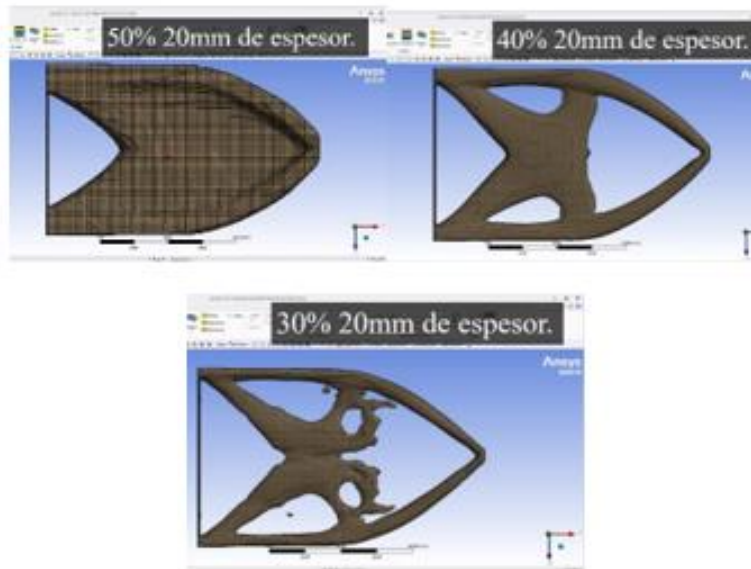


Imagen 9. Evaluación comparativa decrecimiento de volumen entre condiciones de restricción de 40% y 50% y 30% de conservación de volumen en modelo de 20 mm de espesor.

- En la simulación de la placa de 10mm mostrada en la Imagen 10, se observaron resultados laminares con diferentes grosores de sección transversal que pueden ser útiles y se pueden considerar en los casos donde se pueda simular evitando estos en el postprocesado. Para así mismo comprobar la calidad del proceso de optimización.

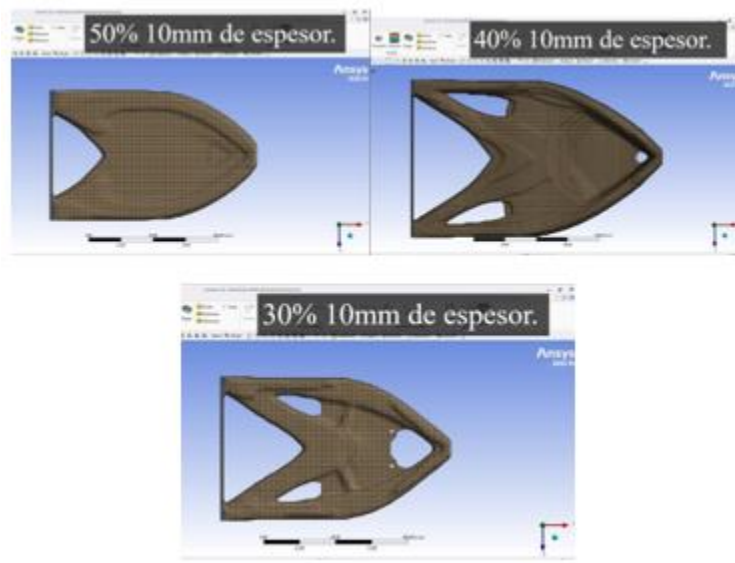


Imagen 10. Evaluación comparativa decrecimiento de volumen entre condiciones de restricción de 40% y 50% y 30% de conservación de volumen en modelo de 10mm de espesor.

En las simulaciones de 5mm mostradas en la Imagen 11, se encontraron resultados gratificantes donde se desarrollaron secciones estructurales sólidas y convergentes tanto en 40% y 30% siendo la sección de 30% un sólido estructural con secciones que interconectan entre todo el sólido y que mantienen sus secciones estructurales ente el grosor mismo de la placa de 5 mm

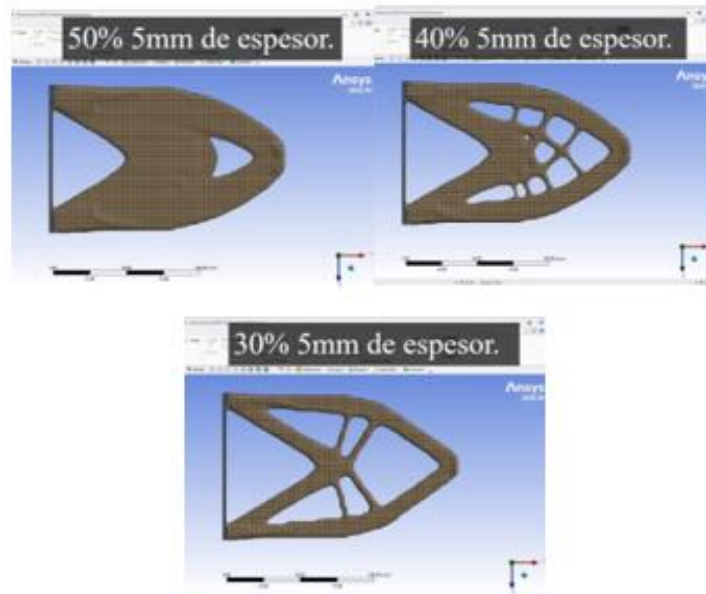


Imagen 11. Evaluación comparativa decrecimiento de volumen entre condiciones de restricción de 40% y 50% y 30% de conservación de volumen en modelo de 5 mm de espesor.

7.1.3 Modelo 3D

Dentro de las consideraciones del modelo 3D se planteó según el siguiente ejemplo, mostrado en la imagen Imagen 12:

- Planteada una viga con 40000 elementos y una fuerza aplicada en el extremo central opuesto de la zona de sujeción con un material definido con módulo de Young de 10 GPa y Poisson Ratio de 0.3 de medidas 20 mm x 40 mm y 100 mm de largo como se plantea a continuación:

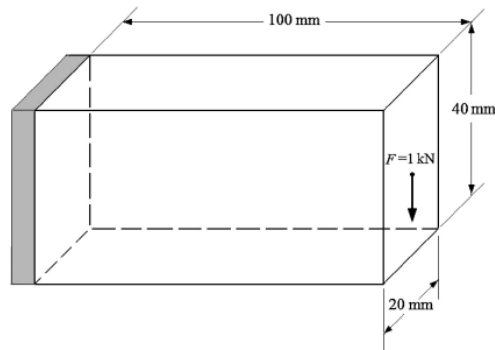


Imagen 12. Modelo Viga 3D a Optimizar

- Las condiciones de simulación en este programa plantearon un proceso de 2 horas y 40 minutos de iteración pues se contó con un computador personal con un Pentium 4 y 512 MB RAM.

Planteada la simulación según las iteraciones 15, 30, 45, 60 y 87 se obtuvo lo siguiente, cada una organizada secuencialmente por orden alfabético.

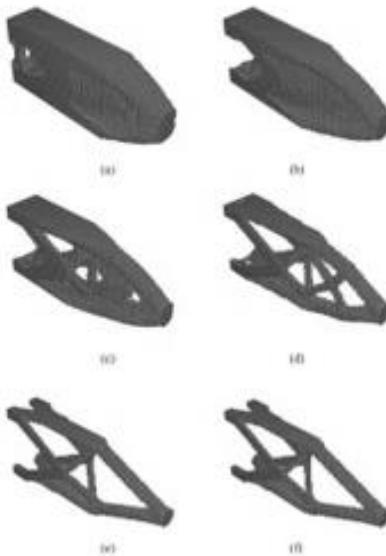


Imagen 13. Optimización del Modelado 3D dependiendo del número de iteraciones

y según todo esto para el planteamiento de nuestra optimización consideramos con las capacidades computacionales antes presentadas por nuestro computador de uso personal realizar la optimización como lo muestra la Imagen 14.

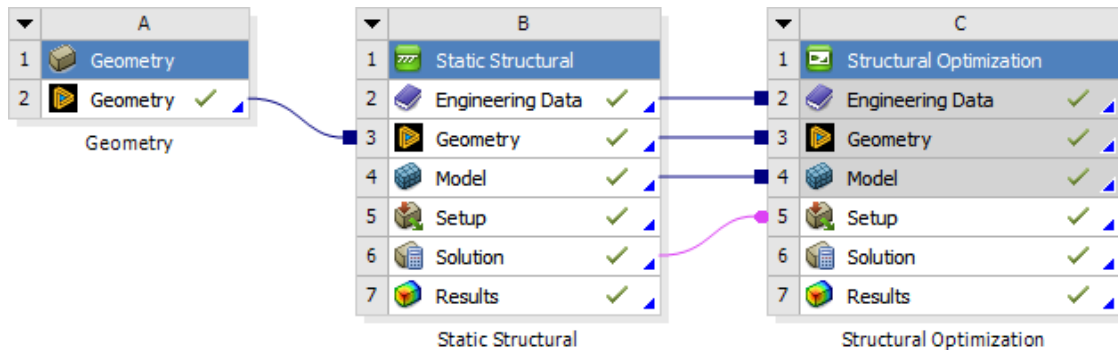


Imagen 14. Paso a paso del proceso de optimización 3D

Dentro de Ansys Workbench planteamos seleccionando dentro de la pestaña “Component System” y “Analysis system” el módulo de geometría, que al abrirlo nos dirige al subprograma SpaceClaim de ansys, donde por medio de su sistema CAD planteamos la geometría utilizada para la simulación.

Dentro del proceso de optimización se planteó el siguiente modelo de proyecto, Ansys Workbench trabaja con un sistema de modelos y análisis donde en un principio se determina la geometría del objeto, las cualidades físicas del material que son dadas en el ejercicio, las cargas que actual sobre este y las sujeciones que la geometría tiene.

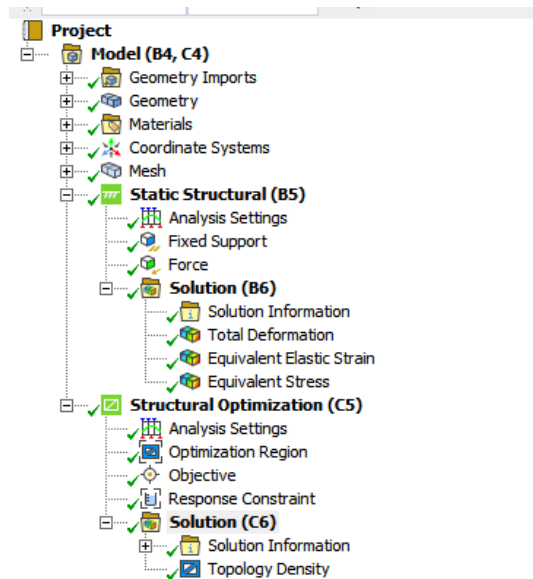


Imagen 15. Caracterización de la optimización 3D

Al realizarse el proceso de mallado se considera lo planteado en la Imagen 16.

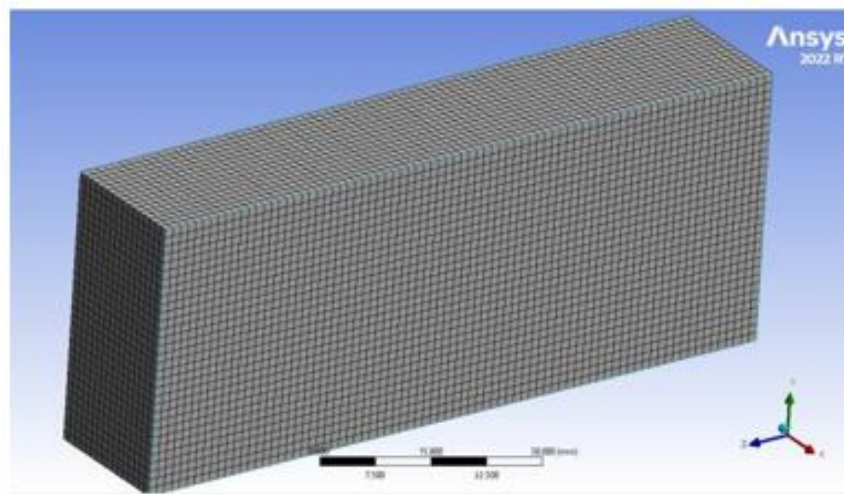


Imagen 16. Mallado de la Optimización 3D

Dentro de ANSYS se programa un mallado con un tamaño de elemento de 1.25 mm específico para lograr un aproximado del número de elementos que se encuentran dentro de la simulación teórica referencia, el cual da un resultado de 40960 elementos y 177153 nodos dentro del sistema, elementos que son del tipo “HEX20”,

esto dado por el programa dentro de la sección de información de las entidades en la barra inferior de información.

Entity	Element ID	Element Type	Body
1 Mesh Element, Summary			
Mesh Element 1	40144	Hex20	Geom\Solid

Tabla 6. Entidades y propiedades escogidas para la optimización 3D

Consiguientemente se aplicaron las cargas y las sujeciones respectivamente la carga de 1000 N en dirección negativa al eje Y y las sujeciones en cada esquina del sólido, siendo 4 sujeciones compuestas por las caras de 16 elementos, así siendo 64 elementos donde se aplicó el condicionante “Fixed Support”, así como se ve en la Imagen 17.

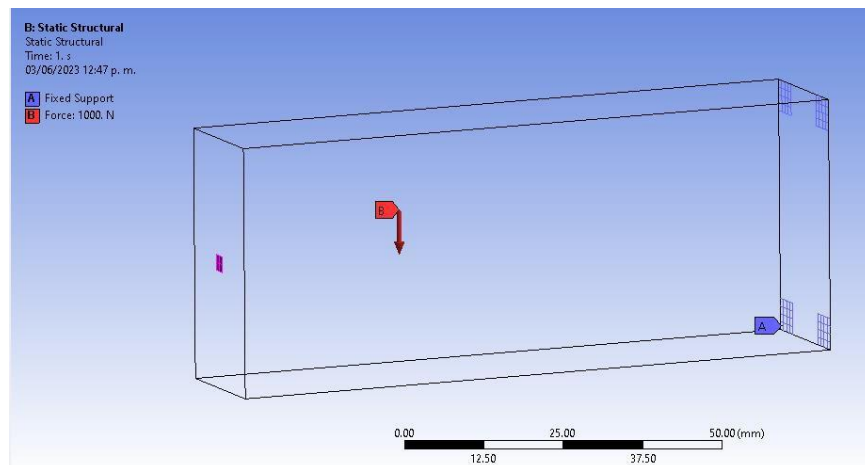


Imagen 17. Wireframe del sólido 3D

Dentro del resultado de la simulación se planteó que es necesario desarrollar un análisis estático comprendido por resultados de deformación total, equivalente elástico y el estrés equivalente, que determinan las zonas con mayor estrés, deformaciones elásticas y deformaciones totales.

Los resultados fueron los mostrados en la Imagen 18, donde se presentaron resultados con escalas visuales de x12 para así apreciar las deformaciones.

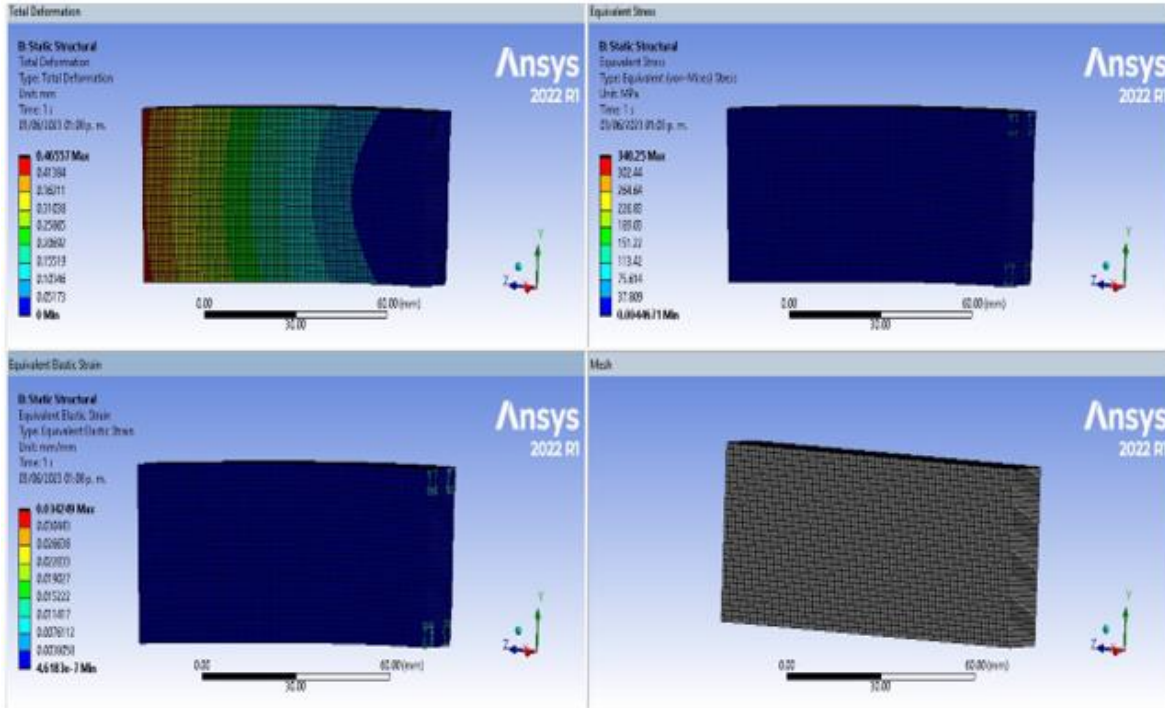


Imagen 18. Resultado de simulaciones del solido 3D

Simulado la pieza a continuación dentro del proceso de optimización topológica se compone del módulo “Optimización estructural” que comprende de un análisis del sistema, regiones de optimización, objetivos, restricciones de respuesta y la solución mostrada como Densidad topológica.

Dentro de las configuraciones de análisis del módulo de optimización topológica podemos configurar el número máximo de iteraciones (El número de ciclos o pasos máximo que se recorren para tener un resultado con convergencia), el mínimo de densidad normalizada (se refiere a la densidad real de un material en un punto y es el mínimo aceptable dentro del elemento en la estructura), fracción inicial de volumen (la fracción de volumen total de la estructura que se asigna a la región de diseño) y factor de penalización (es la restricción de la transición abrupta de la

densidad entre los elementos) , las condiciones como región de manufactura mantenida, región con tamaño de miembro estructural mínimo y restricción de saliente componen básicamente de restricciones donde se evita eliminar elementos dentro del rango de zonas donde son aplicadas cargas o son objetos de sujeción.

Para garantizar similitud en los modelos de simulaciones fueron seleccionados así el valor de convergencia y la fracción inicial del volumen para acercar el resultado y tener precisión como se muestra en la Imagen 19.

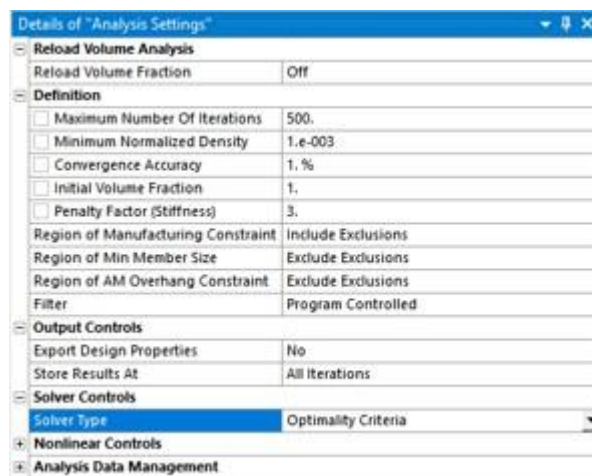


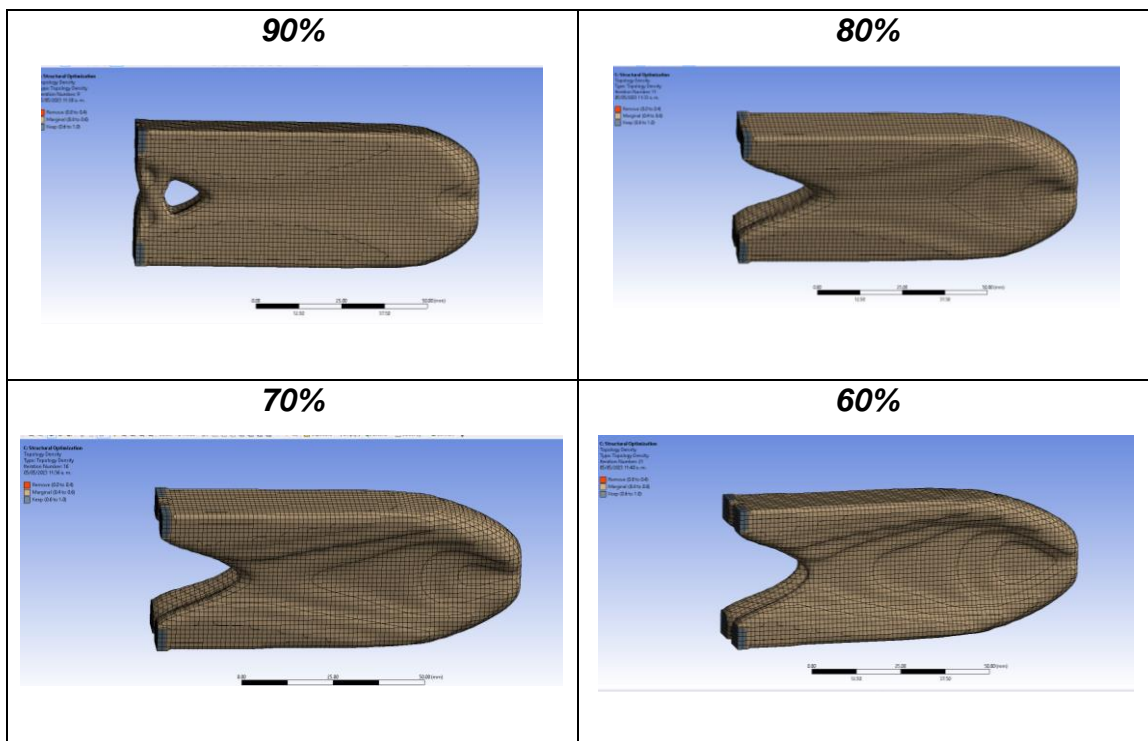
Imagen 19. Configuración de análisis del sólido 3D

La convergencia de la simulación busca soluciones de mayor calidad y rendimiento, pero puede aumentar el tiempo de ejecución y requerir más recursos computacionales. En este caso, se realizaron 8 simulaciones que tomaron aproximadamente 6 a 15 minutos cada una, lo que sumó aproximadamente 1,33 horas en total, sin considerar los tiempos de reajuste y comprobación entre simulaciones.

Details of "Solution (C6)"	
Solution	
Number Of Cores to Use (Beta)	Solve Process Settings
Adaptive Mesh Refinement	
Mesh Refinement (Beta)	No
Information	
Status	Done
<input type="checkbox"/> MAPDL Elapsed Time	6 m 19 s
MAPDL Memory Used	1.3223 GB
MAPDL Result File Size	2.6029 MB
Post Processing	
Export Optimal Shape	Only Geometry
-- Topology Result	Topology Density
Distributed Post Processing (Beta)	Program Controlled
Definition	
Environment Selection List	B5

Imagen 20. Detalles de la configuración de simulación

Dentro de la simulación se optó por distribuir de 90% a 10% condiciones de restricción de volumen hasta tener los resultados de las imágenes mostrados en la Tabla 7.



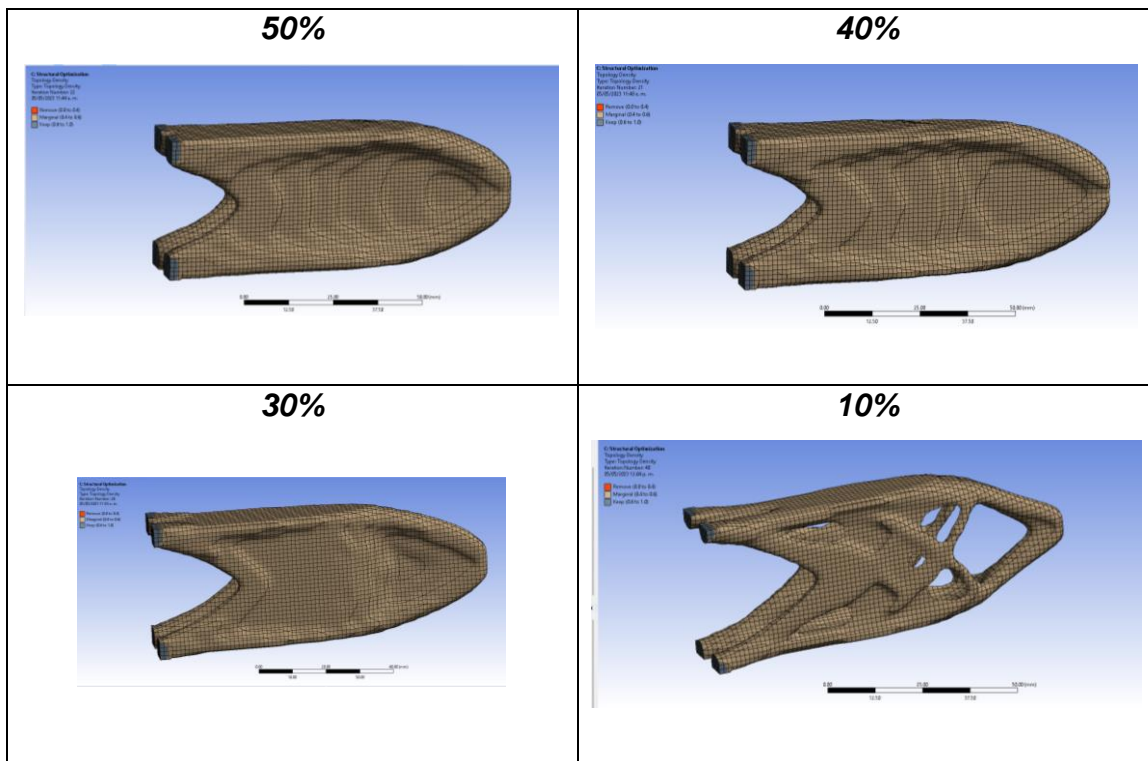


Tabla 7. Simulaciones de Optimización para cada porcentaje de reducción de volumen

Se considera que los resultados no serían los mismos haciendo una comparación con el método BESO3D ya que no se usan los mismos elementos, en esta situación los HEX20 comprenden un espectro de características físicas del material mucho más grande que los de BESO3D, además el método del solver MAPLD no es el mismo que el de BESO3D pero los resultados son congruentes y comprenden rigidez estructural.

Con todo esto presente y con las similitudes encontradas dentro de los modelos de optimización estamos garantizando la calidad del proceso, las limitaciones y capacidades de los recursos computacionales con los que se cuentan en el proceso de optimización, por lo que se considera continuar dentro del proceso de optimización de los dos modelos planteados anteriormente.

7.2 CRITERIO DE DISEÑO

Siendo planteado el concepto de optimización topológica se opta por la selección de los sistemas estructurales usados comercialmente para así seleccionar el mas acertado para el uso de topologías y formas solidas como las que presentan los resultados de procesos de optimización topológica.

7.2.1 Selección de Diseño Comercial

Investigando dentro del segmento de competición se estudiaron los últimos 6 años del sector de competición de SSV en Dakar (Tabla 8), así identificando claro margen de ganancia en la marca Can-Am donde la serie Maverick y XRS son los modelos mejor equipados de la marca canadiense.

Año	Ruta	SSV/UTV Vehículo
2017	Asunción- La Paz- Buenos Aires	Polaris RZR 1000 XP
2018	Lima-La Paz-Córdoba	Can-Am Maverick
2019	Lima-Lima	Can-Am X3
2020	Yeda- Al-Qiddiya	Can-Am Maverick
2021	Yeda- Hail-Yeda	Can-Am X3
2022	Yeda-Hail-Yeda	Can-Am XRS

Tabla 8. Comparativa Comercial con Resultados Históricos de la Línea de Competición SSV

Por lo que, según la categoría, el número de plazas y uso se selecciona el Can-Am Maverick X3 X RC TURBO RR como referencia comercial para el diseño del producto.



Imagen 21. Referencia Comercial Can-Am Maverick X3 – Dakar 2022

Auto con motor de 900 cc, 200 HP, ancho de 72 in de altura 102 in entre ejes y 16 in del suelo, con 800 kg de peso, con estas características siendo aceptado dentro de la categoría seleccionada en competición “Groupe T4.1: Lightweight Series Production Cross-Country Side-by-Side Vehicles, with Turbo” (FIA, 2021).

7.2.2 Cargas

Dentro de las cargas aproximadas que soportaría el chasis se encuentran las mostradas en la Tabla 9, dado de base la referencia de motor homologado para competición den el Dakar, con un motor de 3 cilindros 4 tiempos con potencia de 200 HP peso de 126 kg (ROTAX, 2021).

Cargas Aproximadas.	
Elemento	Peso Aproximado. (kg)
Pasajero	80
instrumentación de control	20
Equipo de seguridad	20

Motor	126
transmisión	60
Ruedas freno transmisión eje y soportes.	80
Otros	60
Total	446

Tabla 9. Cargas Aproximadas y Considerados por Pesos Muertos que Estarán en el Chasis

En base a esto, se tiende a plantear el diseño estructural y la definición de la optimización del chasis. Para el cumplimiento del primer y segundo objetivo como lo es delimitar según las normativas de la FIA y de la competición Dakar. Entrando en conclusión con el diagrama QFD (Tabla 5 e Imagen 8), se discute que las condicionantes 1,7,14 y 20 consideran las principales necesidades para el diseño como lo son la resistencia y calidad de los materiales, el triangulado estructural y que cumpla con las normativas FIA. Teniendo en cuenta se plantearon las siguientes dos opciones:

7.3 MODELO A: DISEÑO MONOCASCO

7.3.1 Planteamiento de Diseño

Dentro del planteamiento de este diseño se considera un chasis de estilo mono casco, esta estructura al ser basada en integrar la carrocería principal en una sola unidad brinda gran rigidez y resistencia estructural. la estructura se compone en diversas formas por un armazón tubular, donde al ser planteada la optimización topológica se considera dentro de la integración de material, la orientación y el espesor de los tubos, los puntos de unión y la integración de la carrocería para el diseño principal dentro de base para la optimización. Así buscando que esta pueda dar resultados óptimos al trabajársele.

7.3.2 Variables

Tipo de Variable	Criterio
Resistencia estructural	<ul style="list-style-type: none">- Características: El chasis monocasco ofrece una alta resistencia estructural debido a su diseño integrado y la utilización de paneles y refuerzos adicionales.- Mejoras: Se puede mejorar aún más la resistencia estructural mediante el uso de materiales más avanzados y técnicas de fabricación más sofisticadas. Esto aumentaría la capacidad del chasis para soportar cargas y fuerzas sin sufrir deformaciones excesivas.- Desventajas: Si se produce una colisión severa, la estructura monocasco puede deformarse más difícilmente en comparación con un chasis spaceframe, lo que puede complicar las reparaciones y afectar la integridad general del chasis.
Peso	<ul style="list-style-type: none">- Características: El chasis monocasco tienden a ser más pesados que los chasis spaceframe debido a la necesidad de paneles y refuerzos adicionales para proporcionar rigidez y resistencia.- Mejoras: Se pueden emplear materiales más ligeros y técnicas de fabricación avanzadas para reducir el peso del chasis monocasco sin comprometer su resistencia estructural. Esto mejoraría el rendimiento del vehículo en términos de aceleración, eficiencia del combustible y maniobrabilidad.- Empeoramientos: Si se sacrifica la resistencia estructural en favor de una reducción extrema de peso, podría disminuir la seguridad y la durabilidad del chasis.

Distribución de cargas	<ul style="list-style-type: none"> - Características: Los chasis monocascos ofrecen una buena distribución de cargas debido a su diseño integrado, que ayuda a evitar puntos de concentración de esfuerzos. - Mejoras: Al optimizar la geometría del chasis y la colocación de refuerzos, se puede mejorar aún más la distribución de cargas. Esto permitiría una distribución más uniforme de las fuerzas y una mayor estabilidad del vehículo. - Empeoramientos: Si se producen daños localizados en el chasis, especialmente en áreas clave de distribución de cargas, podría comprometerse la integridad estructural y la capacidad del chasis para distribuir las cargas adecuadamente.
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> - Características: Los chasis monocascos ofrecen una buena seguridad en caso de colisión, ya que su diseño integrado y los refuerzos proporcionan una mayor protección para los ocupantes. - Mejoras: Al utilizar materiales de absorción de impactos y sistemas de seguridad adicionales, se puede mejorar la seguridad del chasis monocasco. También se pueden incorporar zonas de deformación controlada para absorber la energía del impacto y proteger mejor a los ocupantes. - Empeoramientos: Si se producen daños estructurales significativos, puede ser más difícil reparar o reforzar el chasis monocasco, lo que podría afectar su capacidad para brindar una protección óptima en futuras colisiones.
Rigidez torsional	<ul style="list-style-type: none"> - Características: Los chasis monocascos ofrecen una buena rigidez torsional debido a su diseño integrado y la utilización de paneles y refuerzos. - Mejoras: Al optimizar la geometría y el material del chasis.

Tabla 10. Variables para el modelo Monocasco

7.3.3 Esquema Conceptual

Dentro de las consideraciones de diseño se desarrolló un esquema conceptual descriptivo que se evidencia en la Imagen 22, que detalla las características del chasis monocasco, para así tener en cuenta las variables a que deben tenerse en cuenta a la hora de plantear un diseño para producción y como debe orientarse el proceso.

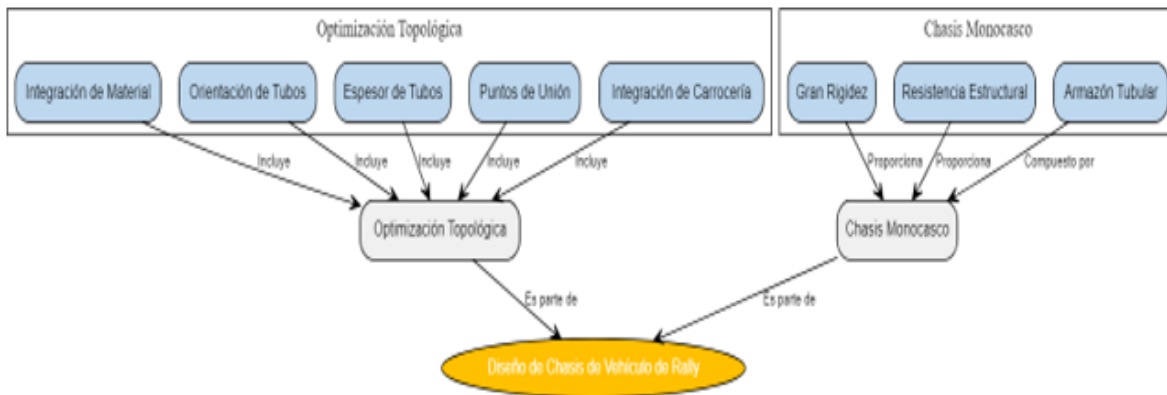


Imagen 22. Esquema conceptual para el modelo Monocasco

7.3.4 Estructura 3D

La estructura del chasis monocasco planteada para el chasis monocasco comprende un diseño simple y con menos secciones estructurales esto para así favorecer su posible proceso de fabricación ya fuese en estructuras laminadas para producción den masa o fibras de carbono, el detalle de diseño se presenta en la Imagen 23.

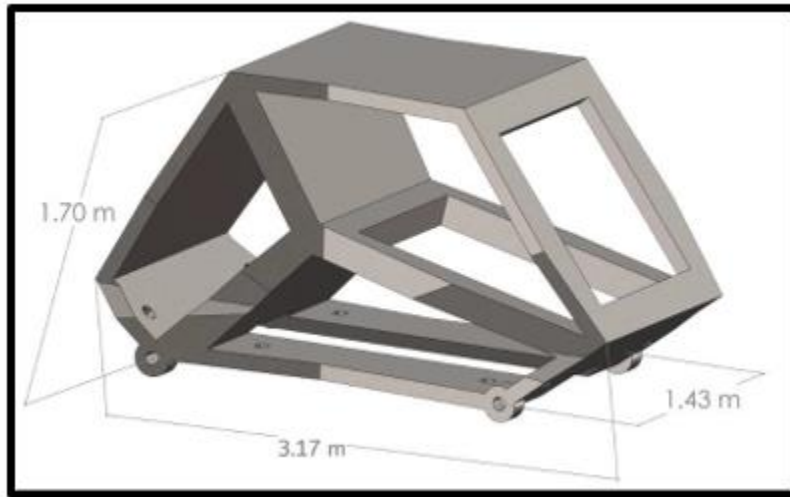


Imagen 23. Modelo 3D del chasis Monocasco

7.4 MODELO B: DISEÑO SPACEFRAME

Un modelo diseñado por optimización topológica para un chasis spaceframe de un auto de rally utiliza técnicas avanzadas de diseño computacional para encontrar la configuración óptima de la estructura reticular de tubos. El objetivo es maximizar la resistencia y rigidez del chasis mientras se minimiza su peso. Se aplican algoritmos y restricciones para redistribuir el material y eliminar secciones innecesarias. El resultado es una estructura reticular eficiente que mejora el rendimiento y manejo del vehículo durante las competencias de rally.

7.4.1 Diseño Esquemático

Dentro del diseño esquemático del chasis Spaceframe se consideraron características del diseño estructural del chasis, el uso de secciones tubulares, beneficios estructurales y de seguridad.

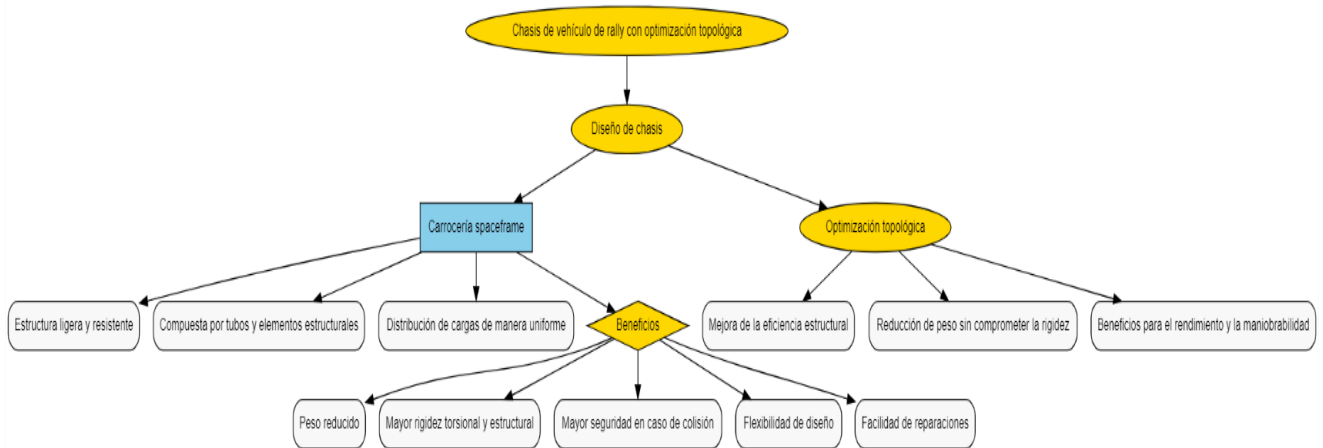


Imagen 24. Esquema conceptual para el modelo Spaceframe

7.4.2 Estructura 3D

Dentro de las consideraciones del chasis Spaceframe se planteó un sistema de sujeciones 4 suspensiones de doble horquilla propio de estos sistemas de rally y además, la estructura para distribuir mejor el centro de gravedad del vehículo para así obtener más estabilidad como se evidencia en la Imagen 25.

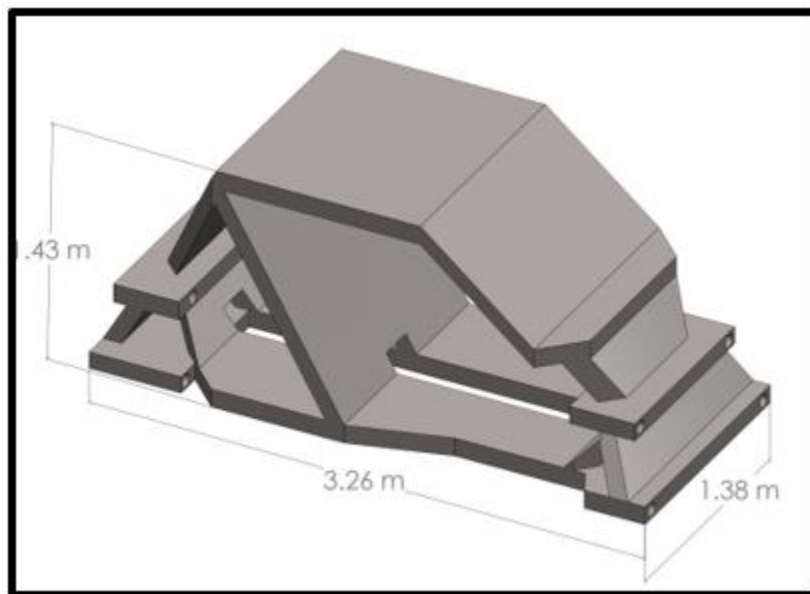


Imagen 25. Modelo 3D del chasis Spaceframe

7.5 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL CHASIS

Dentro del proceso de optimización topológica es necesario entender las siguientes consideraciones, al momento de realizarse el proceso de optimización se puede comprender el usar los elementos TET10, TET4, HEX20 y HEX8 cada tipo de elemento mejora consecuentemente de sus antecesores, pero la selección de cada uno de estos depende de la geometría de la estructura y los requisitos de precisión a la hora de trabajar ya por eso según la geometría de la estructura del chasis, donde se comprenden zonas con redondeos, es necesario optar por un modelo TET del orden tetraédrico para así corresponder a estos sistemas con geometrías complejas, y luego a esto irnos por el sistema TET10 que comprende un número mayor de nodos por elemento así garantizando mayor precisión y mejores respuestas a la hora de realizar una optimización topológica.

Por consecuentemente se plantean dentro de las simulaciones diversos tipos de soportes distribuidos en la geometría que representan las cargas y sujeciones que serán aplicadas en el chasis para la simulación.

7.5.1 Condiciones de Frontera en Ansys Workbench

En el proceso de optimización topológica de los chasis, se utilizó un modelo similar al de las simulaciones previas. Se importó la geometría construida en Solidworks mediante el software SpaceClaim de Ansys. Se planteó una simulación estructural con cargas y sujeciones, y se llevó a cabo una optimización topológica para reducir el volumen de las estructuras.

Por lo consiguiente para el chasis Spaceframe mostrada en la Imagen 27. se procede a ubicar dentro de las simulaciones cargas sobre dimensionadas a torsión en los extremos delanteros del armazón, y una sujeción en el extremo contrario del chasis, y cargas distribuidas de 2000 N y 1000 N dentro del habitáculo y estructura del chasis. En esta situación se consideraron cargas de 0.1 N dentro de zonas de soportes que no fueron consideradas en la simulación pero que de igual forma

debían ser conservadas dentro del proceso, estas conocidas como Boundary Conditions.

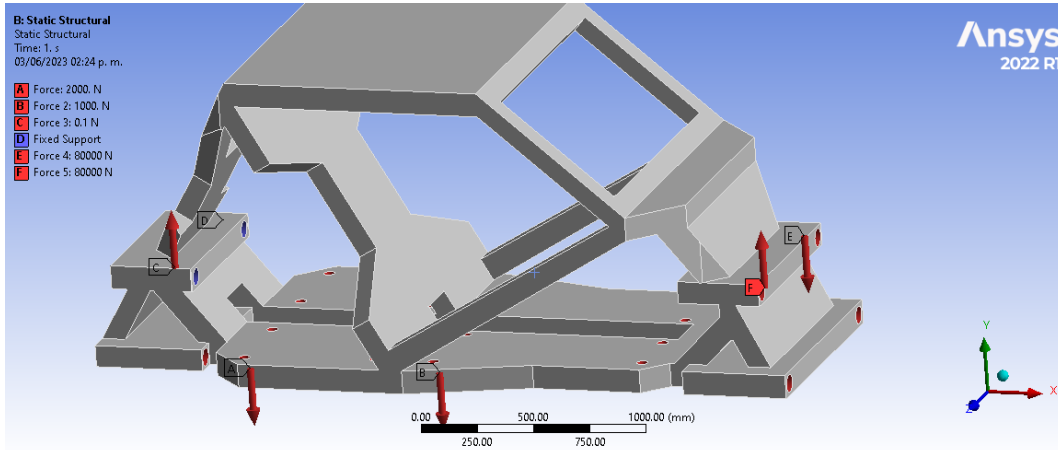


Imagen 26. Diseño 3D del chasis Monocasco en ANSYS con sus cargas

Para las condiciones dentro del chasis Monocasco en la Imagen 26, se consideraron las siguientes cargas y condiciones de frontera, se distribuyeron dentro del chasis soportes estructurales para el habitáculo motor y componentes esenciales del vehículo con un aproximado de 3000 N como suma de ellos, y se distribuyeron direccionados en relación promedio entra la ubicación entre ellos, también se planteó el sistema de torsión y la sujeción en las zonas a los extremos del chasis.

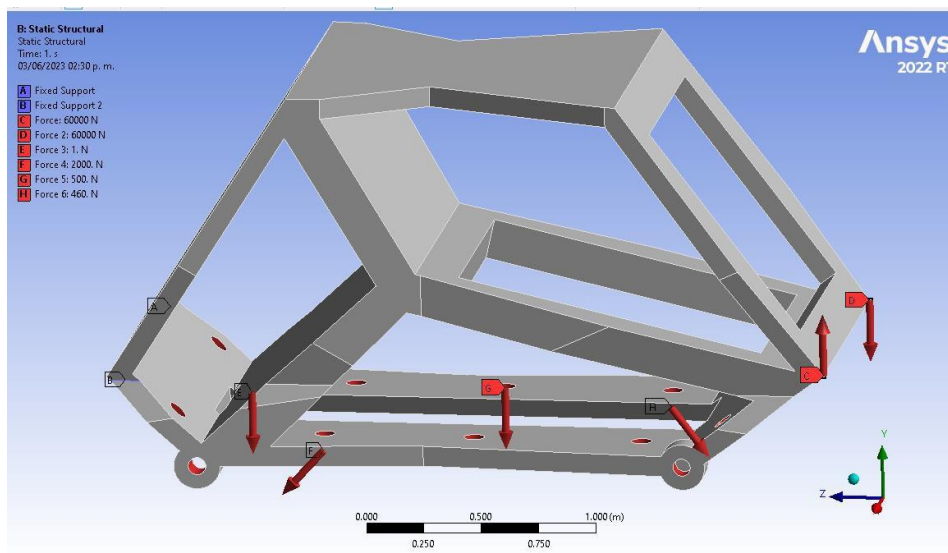


Imagen 27. Diseño 3D del Chasis Spaceframe en ANSYS con sus cargas

El mallado planteado para cada uno de ellos fue de 20mm como tamaño de elemento, donde en el chasis Spaceframe por su constitución correspondió a un número de 631.727 elementos con 972.424 nodos y en el monocasco de 631.727 elementos con 972.424 nodos, estos números con se consideran para plantear o considerar una mejor calidad de simulación o resultados en los chasis, pues dependen directamente de los tamaños y la geometría de cada uno. Dentro de cada mallado se planteó usar el método de de resolución de ANSYS para problemas físicos mecánicos, además se planteó no usar el método de tamaño adaptativo de ANSYS pues en secciones estructurales con dimensiones pequeñas provoca errores de convergencia.

Es de considerar que el uso de elementos TET10 en la simulación como lo muestra la Imagen 28, esto garantiza la uniformidad en zonas donde los elementos tienen que comprender geometrías más complejas como se ve a continuación en soportes cilíndricos del chasis SpaceFrame, donde con la herramienta de selección de nodos se puede identificar el trazado de estos en la geometría.

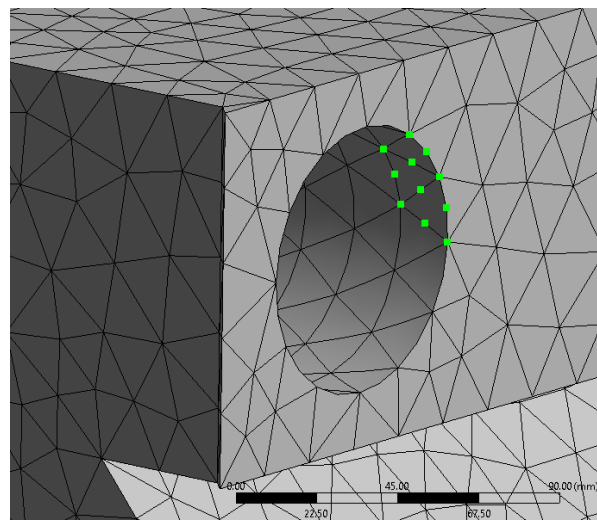


Imagen 28. Geometría de la malla y ubicación de los nodos

Para corroborar el cumplimiento de la normativa Dakar de los 2 diseños conceptuales de chasis propuestos, se procede a hacer una simulación estática para conocer valores como deformación total, esfuerzos equivalentes y factor de seguridad, que deben ir coincidentes a valores dados por la normativa, las 2 simulaciones se presentan en la Imagen 29 e Imagen 30.

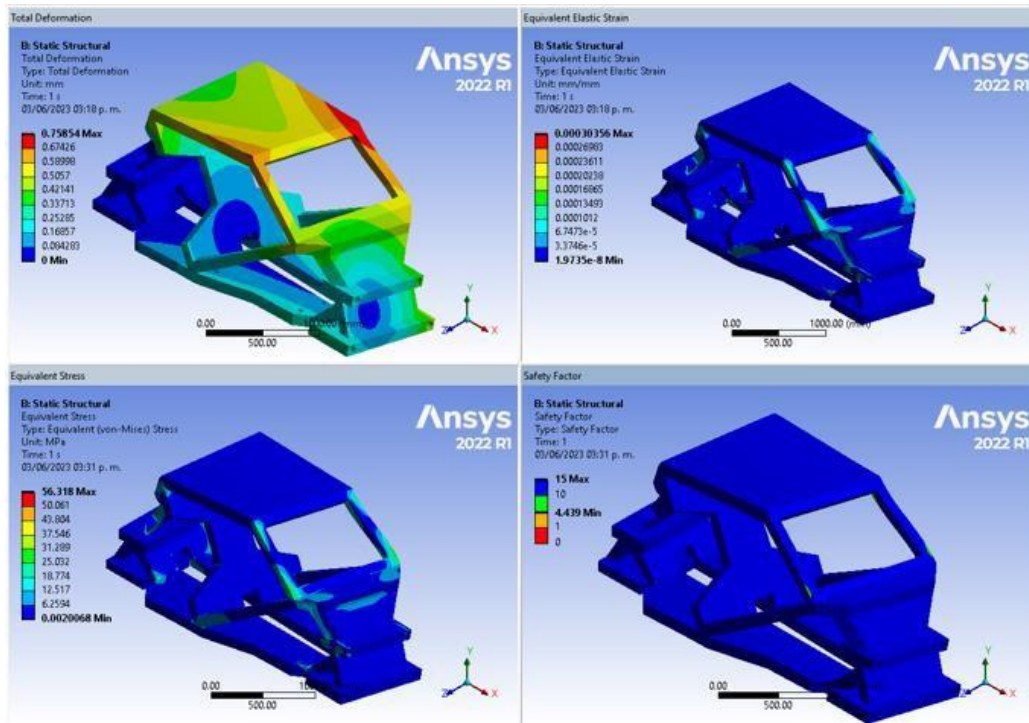


Imagen 29. Simulaciones estáticas del chasis Spaceframe

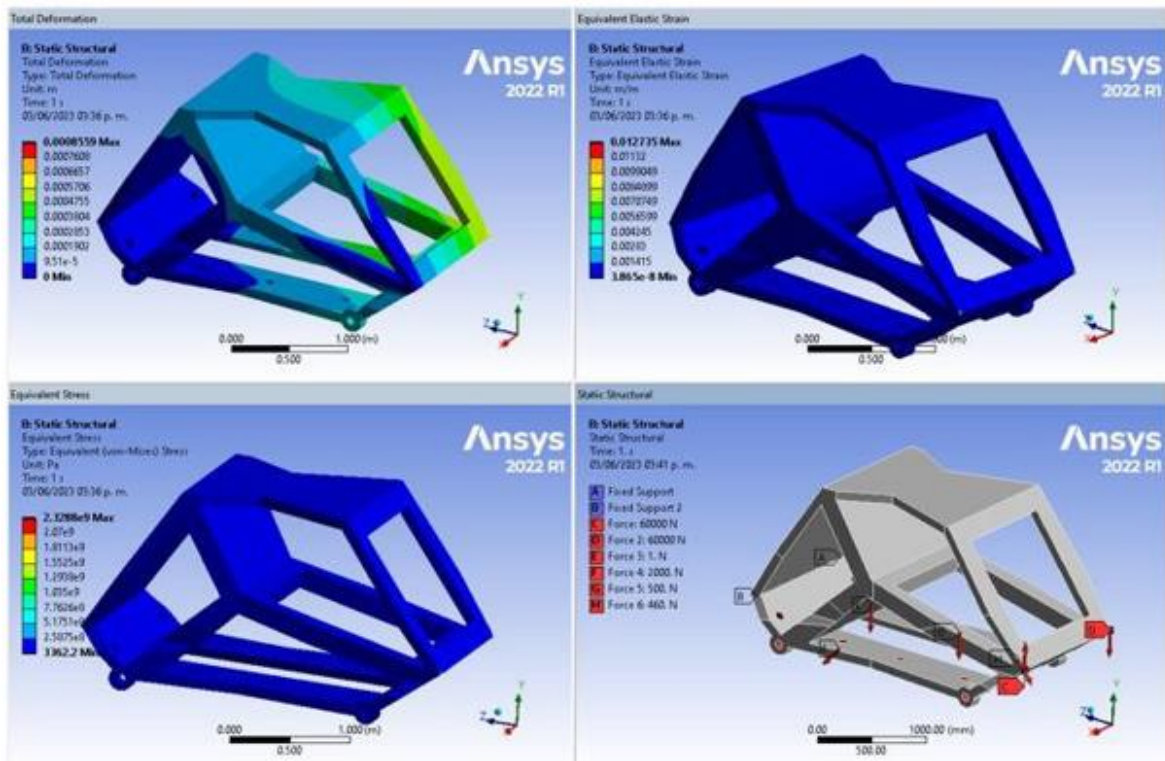


Imagen 30. Simulaciones estáticas del chasis Monocoque

Dentro de estas simulaciones se pudo comprobar la resistencia de las bases estructurales para optimización a las cargas presentadas y la distribución de cargas sobre ellas, así identificándose que el material planteado Acero DualPhase 960 cumple estructuralmente para soportar las cargas aplicadas en el sistema y las situaciones de estrés que pueda presentar el diseño.

7.5.2 Condiciones de Optimización Topológica

Dentro del módulo de optimización topológica se consideraron las mismas condiciones que en la simulación del ejemplo planteado anteriormente, la densidad normalizada, penalty factor, convergencia entre otros fueron datos que fueron asimilados dentro del mismo sistema con las mismas condiciones para así garantizar que las simulaciones sigan el mismo modelo y confirmar los resultados.

7.5.3 Simulación de Optimización Topológica en Ansys Workbench

7.5.3.1 Optimización en Chasis Spaceframe

Se conto con una restricción máxima del 35% de volumen en donde el tiempo de cálculo fue de 2 horas 56 minutos, se consumieron aproximadamente 8Gb de memoria del computador y un archivo de resultados de 20Gb en el proceso y fue una simulación de 21 iteraciones, donde se dan a ver estructuras triangulares que serían funcionales para la distribución y resistencia ante grandes cargas.

Dentro de los procesos de optimización también se encontró que las simulaciones estructurales tuvieron que ser realizadas por pasos, iterando de 90% a 30% pues en condiciones donde se iniciaba un archivo desde 0 y se restringía inmediatamente a dar resultados con volúmenes bajos ANSYS presentaba errores de convergencia y las simulaciones en muchos casos no eran útiles para estudio o postproceso, en la Imagen 31 se muestra el proceso.

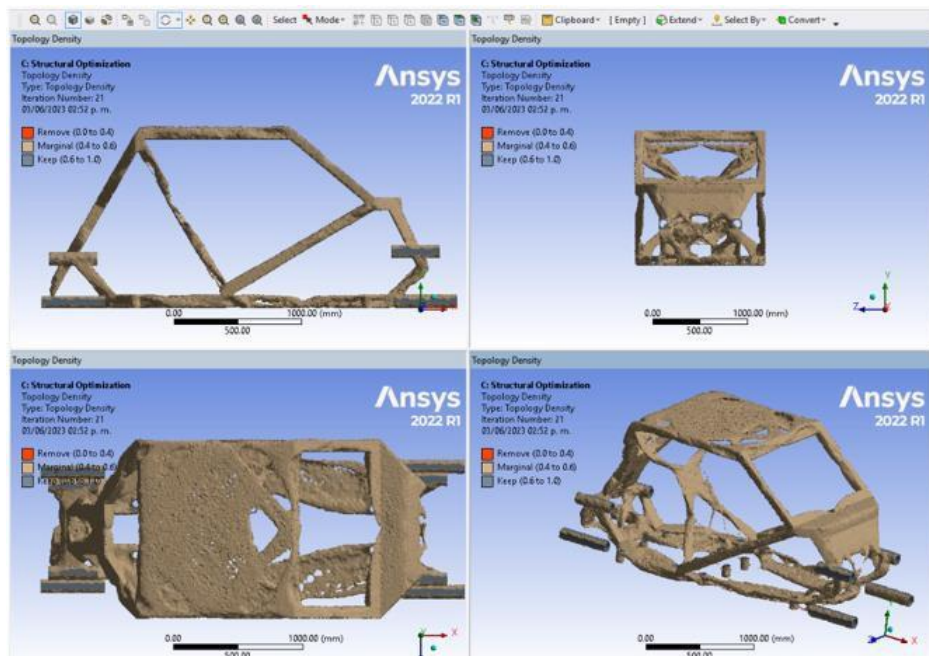


Imagen 31. Optimización del chasis Spaceframe

Como resultado de los detalles de la optimización (Imagen 32), se encuentra también una reducción al 35% de la masa y volumen inicial. Donde el programa nos presenta datos como el volumen y peso iniciales y finales.

Details of "Solution (C6)"	
Solution	
Number Of Cores to Use (Beta)	Solve Process Settings
Adaptive Mesh Refinement	
Mesh Refinement (Beta)	No
Information	
Status	Solve Required
<input type="checkbox"/> MAPDL Elapsed Time	2 h 56 m
MAPDL Memory Used	8.751 GB
MAPDL Result File Size	20.987 MB
Post Processing	
Export Optimal Shape	Only Geometry
-- Topology Result	Topology Density
Distributed Post Processing (Beta)	Program Controlled
Definition	
Environment Selection List	B5

Imagen 32. Detalles de la optimización del chasis Spaceframe

7.5.3.2 Optimización en Chasis Monocasco

En esta simulación se plantearon restricciones de volumen de 35% y como función objetivo al igual que el anterior chasis se buscó por medio de la función objetivo minimizar el compliance para así garantizar una alta resistencia.

Esta simulación al contar con un mayor número de elementos, pero con una geometría menos compleja tuvo dos condicionantes dentro del gasto computacional del equipo usado, demora menos la simulación con un aproximado de 1 hora 9 minutos, pero consumió un total de 25 GB de memoria dentro del proceso.

Aparte de eso logro con 20 iteraciones reducir al 34% de volumen de masa y el volumen de la estructura, generando estas geometrías mostradas en la Imagen 33.

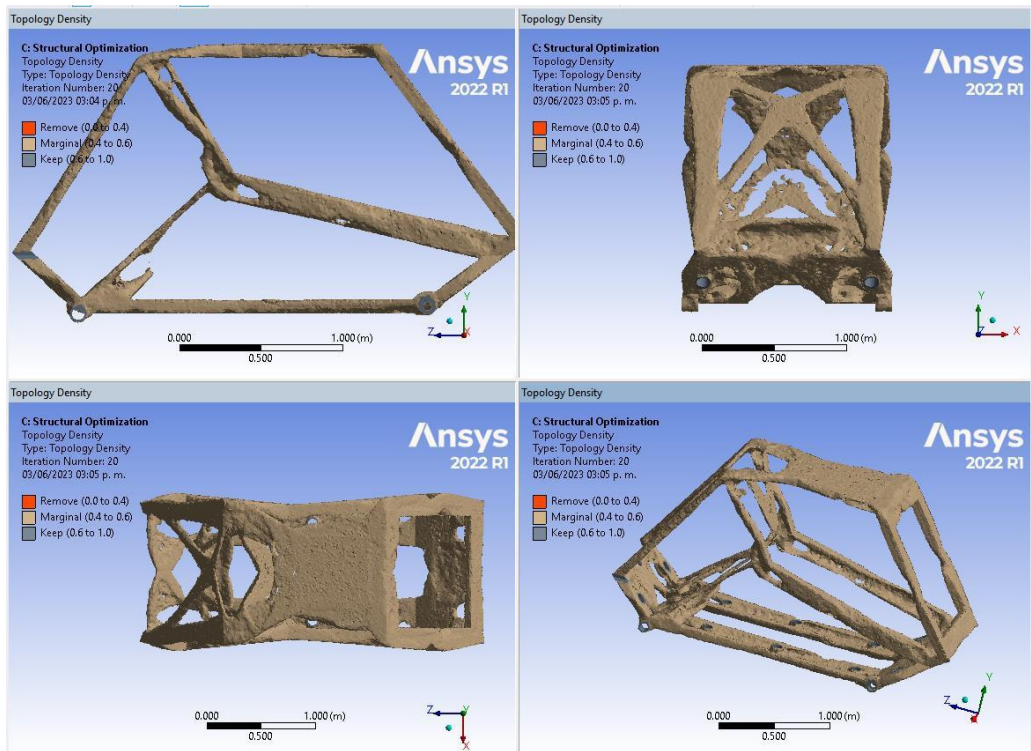


Imagen 33. Optimización del chasis Monocasco

7.5.4 Postproceso Blender - Ntopology

En el proceso de postproceso, se planteó utilizar la malla suavizada generada por Ansys como base para modelar orgánicamente, manteniendo las dimensiones y optimizando el tamaño de la estructura. Esta malla procesada en Blender CAD se exportó al software NTopology para transformarla de un modelo orgánico a un sistema CAD, permitiendo la aplicación de parámetros dimensionales para realizar simulaciones posteriores al postproceso.

Blender, siendo un programa de modelado orgánico que también puede usarse para geometrías CAD, nos permitió desarrollar modelos con una alta calidad y optimización de malla. Logramos una distribución de aproximadamente 12,000 elementos de diversos tamaños dentro de la geometría, mejorando así la calidad y precisión del modelo.

En primer lugar, se hizo el postproceso del chasis Monocasco como se muestra en la Imagen 34.

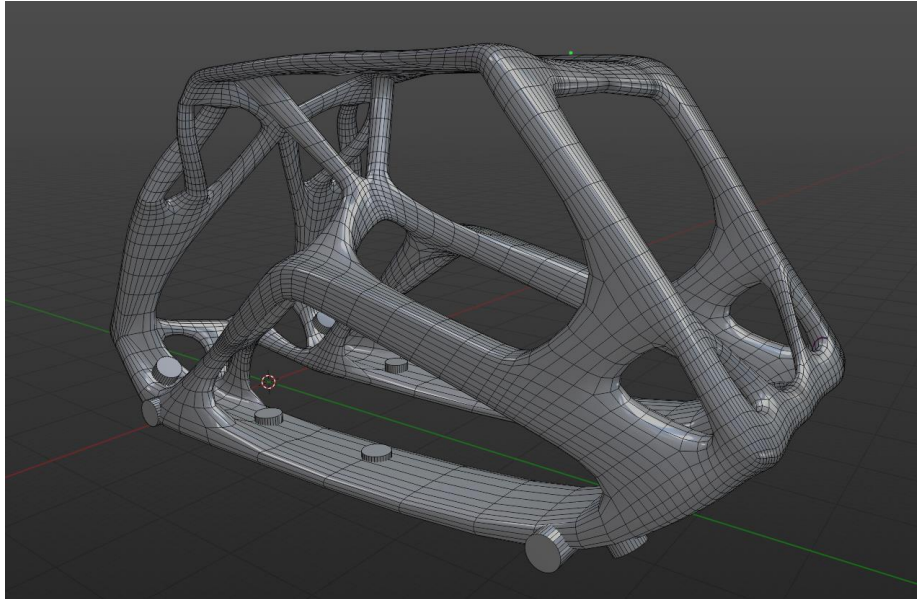


Imagen 34. Chasis Monocasco postprocesado en Blender

En el caso del postproceso de la optimización del chasis Spaceframe, es importante tener en cuenta que la optimización topológica generada por ANSYS presentaba áreas donde se requería la presencia recurrente de material. Sin embargo, debido a los valores de convergencia y tamaños de elementos, el programa eliminaba esas áreas. Por lo tanto, en Blender se llevó a cabo el proceso de completar esas zonas con las partes faltantes necesarias.

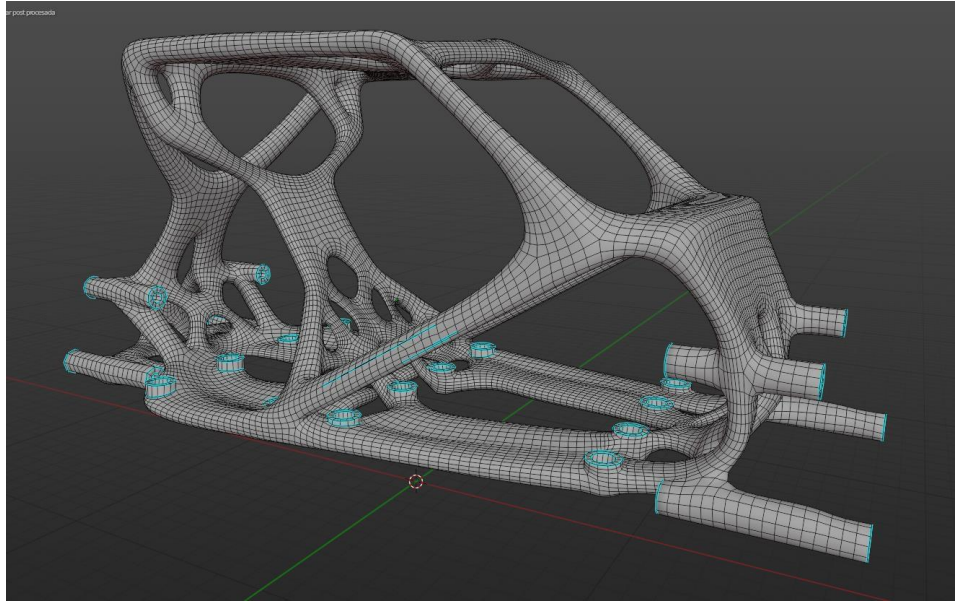


Imagen 35. Chasis Spaceframe postprocesado en Blender

En la reconstrucción del sólido en el programa NTopology, se utilizó el mismo modelo para ambas mallas. El programa plantea una nube de puntos que se distribuye sobre la superficie del sólido. A través de un proceso de algoritmos, se recrean y reconstruyen capas de superficie sobre el sólido, transformándolo de una malla sólida con elementos a un sólido implícito o un modelo CAD. NTopology es un software basado en la nube que recopila datos, como el tamaño de los elementos y las piezas sueltas dentro de la reconstrucción del sólido. Como resultado, se obtiene la malla del sólido SpaceFrame (Imagen 36) y Monocasco (Imagen 37).

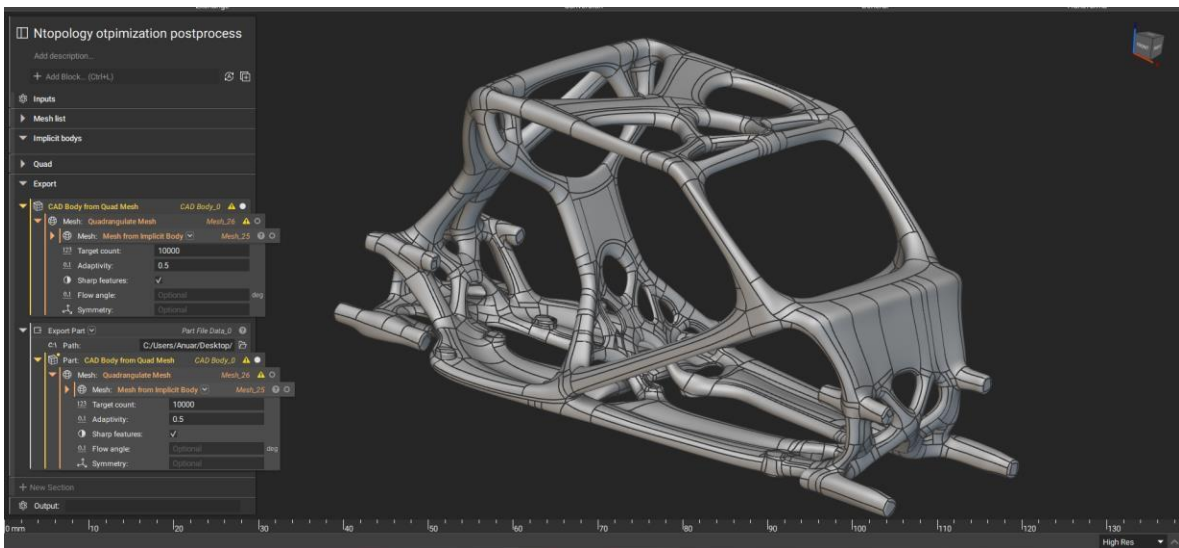


Imagen 36. Chasis Spaceframe postprocesado en Ntopology

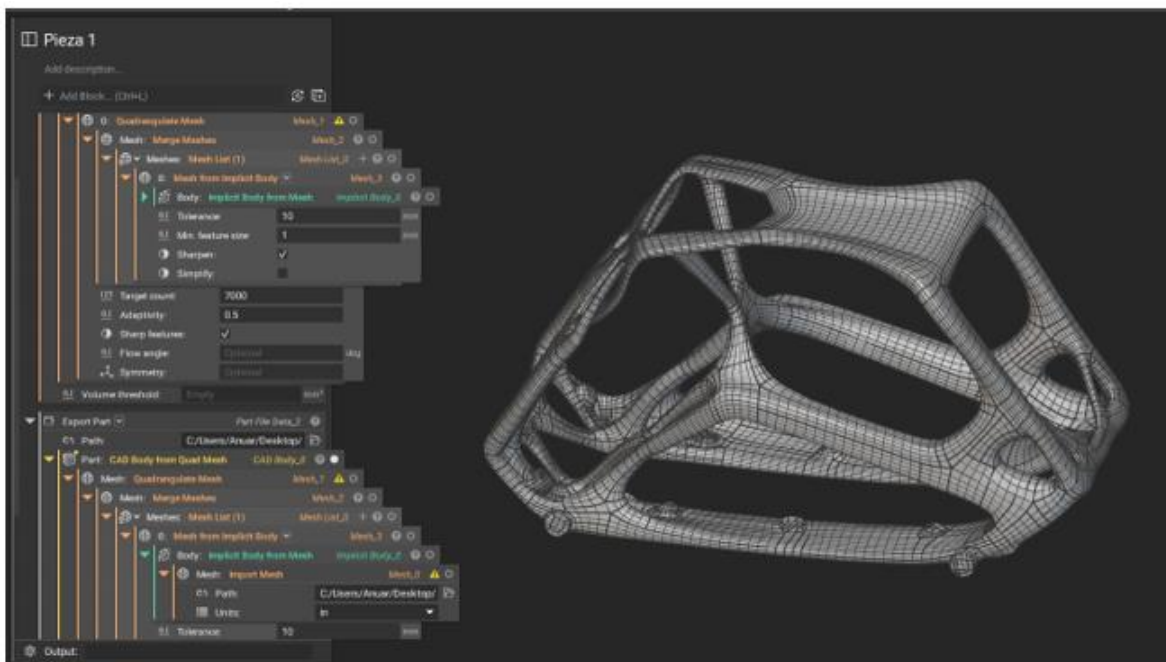


Imagen 37. Chasis Monocasco postprocesado en Ntopology

Ntopology Al desarrollar una nube de puntos sobre los sólidos en cuestión deja imperfecciones en la geometría que después pueden ser corregidas en SolidWorks

o cualquier programa CAD como lo son las aperturas y orificios de los soportes del vehículo, las que luego fueron corregidas dentro de SolidWorks.

7.5.5 Simulaciones Estáticas del Postproceso

Las simulaciones básicas que se deben realizar para cada chasis incluyen simulaciones estáticas y dinámicas con cargas distribuidas en todo el chasis. El mallado utilizado en estas simulaciones considera las mismas condiciones, pero varía el número de elementos y nodos para cada simulación debido a las nuevas geometrías. Las simulaciones incluyen deformaciones totales, equivalentes elásticos y de estrés para el Spaceframe (Imagen 38), así como también se calcula el factor de seguridad. En este caso, se obtuvo un valor mínimo de 5.17, lo que garantiza la calidad estructural del chasis.

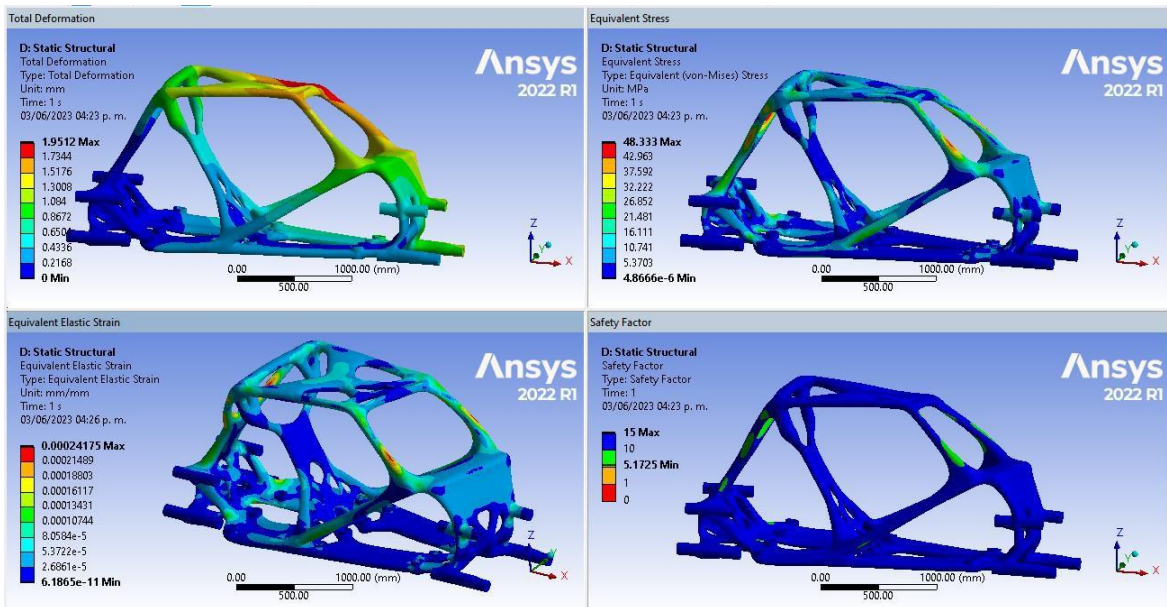


Imagen 38. Simulaciones estáticas del chasis SpaceFrame postprocesado

Para las simulaciones del Chasis Monocasco se planteó el mismo sistema, las mismas cargas aplicadas, con el mismo sistema de mallado, y con el mismo tamaño de elemento, por lo consiguiente se realizaron las simulaciones estáticas comprendidas por la deformación total, estrés equivalente, equivalente elástico y

factor de seguridad, en los cuales se identificó un factor de seguridad menor, de apenas 2.80 por lo que se considera seleccionar frente a características de resistencia y estructura el chasis SpaceFrame como selección frente a condiciones de alta exigencia y grandes requerimientos estructurales.

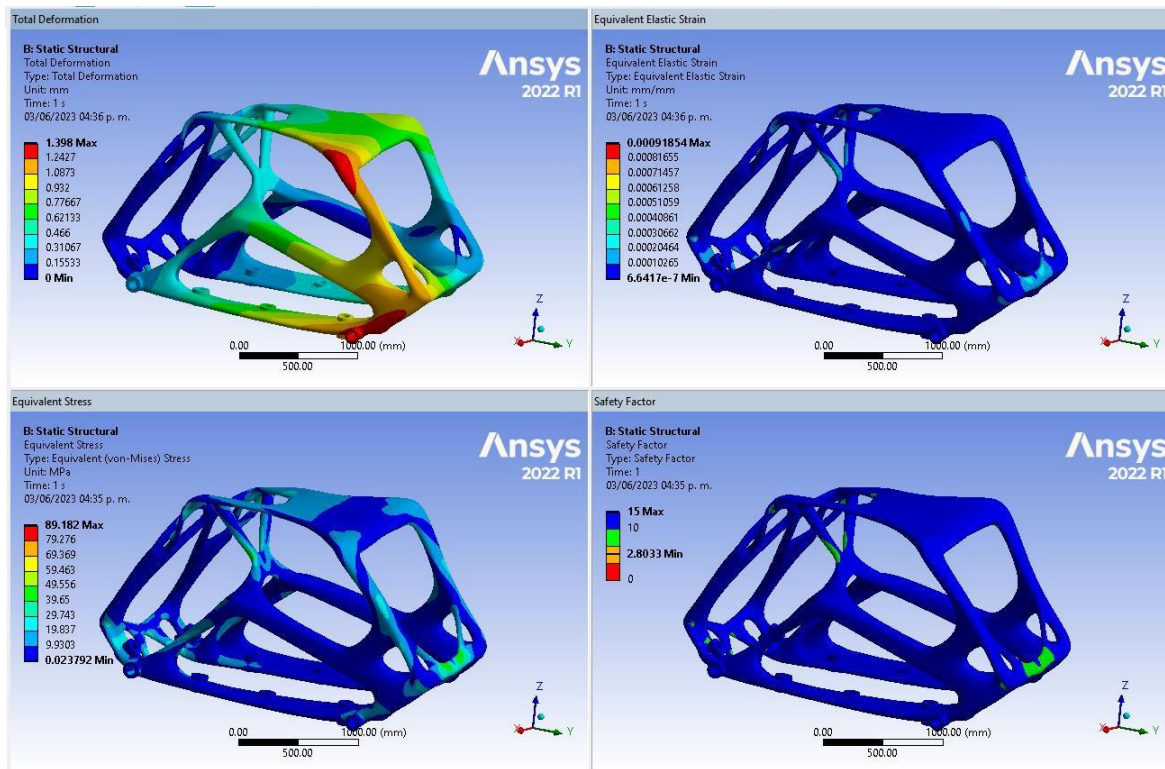


Imagen 39. Simulaciones estáticas del chasis Monocoque postprocesado

7.5.6 Simulaciones Dinámicas del Postproceso

Las simulaciones dinámicas en cuestión son simulaciones de impacto, regidas por la normativa IHHS en la normativa Crash Test Protocol Version IX, en la cual se procede a movilizar un cuerpo con la estructura de una barrera deformable de 1500 kg a una velocidad de 50 km/h paralelamente a la estructura del vehículo para así identificar las deformaciones del chasis frente a los impactos. Esto también aplicado para impactos frontales del vehículo. La deformación en cuestión del vehículo frente a los impactos será la que determinara la resistencia del vehículo a estas situaciones, Estas simulaciones fueron realizadas en el modulo

7.5.6.1 Simulación de Impacto Frontal del Chasis Monocasco

Las simulaciones de impacto frontal son computacionalmente intensivas y utilizan elementos TET4. Debido a estos altos requisitos computacionales, se utiliza el modelo de Adaptive Sizing de ANSYS, que aplica un algoritmo para distribuir el tamaño de los elementos en las zonas necesarias, lo que proporciona resultados más rápidos. En la simulación, se observaron deformaciones máximas de 191 mm, lo cual es aceptable. Además, se evidenció una distribución adecuada de la energía en el chasis, lo que resultó en una deformación mayoritariamente vertical y mantuvo la integridad del habitáculo principal. En general, se obtuvo un buen resultado en esta situación.

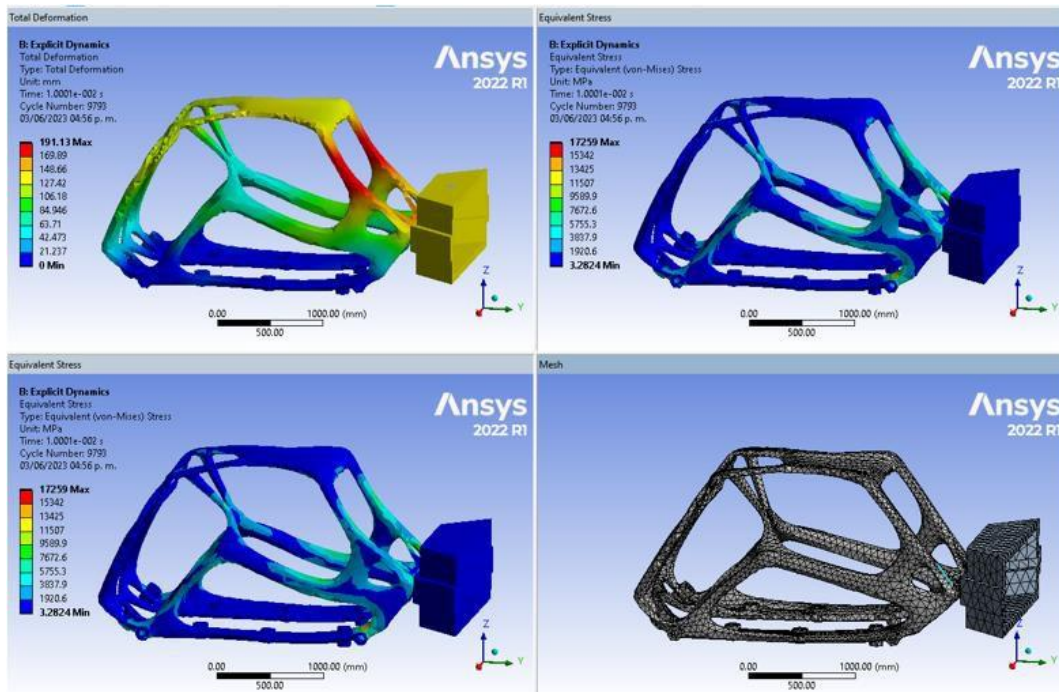


Imagen 40. Simulaciones de impacto frontal del chasis Monocasco

7.5.6.2 Simulación de impacto lateral del Chasis Monocasco

Dentro de esta simulación se observaron en la zona de impacto desplazamientos máximos de 211 mm medidas que ya rompen el umbral permisible y podrían en el caso distribuir la energía de la colisión directamente al ocupante, pues las cargas

impactaron en la zona inferior del chasis y luego en la media mostradas en la Imagen 41.

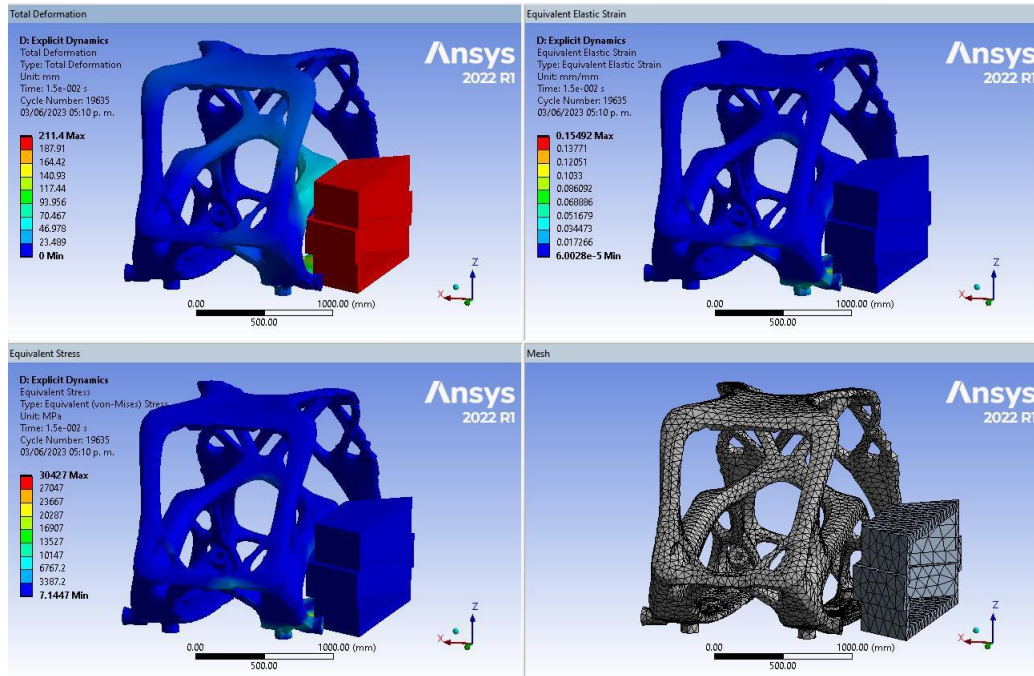


Imagen 41. Simulaciones de impacto lateral del chasis monocoque

7.5.7 Proceso de independencia de malla.

El proceso de independencia de malla se refiere a la capacidad de un modelo para proporcionar resultados precisos y convergentes a medida que se modifican los tamaños de los elementos, se refinan las mallas o se discretiza el dominio. Este proceso es crucial como verificación de la calidad del modelo matemático utilizado en simulaciones de análisis estático y optimizaciones topológicas. Logramos esto refinando gradualmente la malla. Para la simulación estática en ANSYS Workbench, se utiliza la opción de parametrizar el tamaño de los elementos en el proceso de mallado y guardar los valores resultantes que sean relevantes para el análisis del modelo. A continuación, se presenta el esquema del sistema de parametrización de ANSYS:



Imagen 42. Esquema de parametrización ANSYS Workbench.

En el análisis estructural, se consideraron varios valores, como el factor de seguridad, los valores mínimos, medios y máximos de esfuerzos equivalentes, deformaciones elásticas y deformaciones totales. Para evaluar estas magnitudes, se utilizó un enfoque estadístico y de agrupación de datos.

Se calculó la desviación estándar y el promedio de los conjuntos de datos para determinar el porcentaje de error, que indica las variaciones en el modelo. Los datos y resultados obtenidos muestran que la deformación elástica equivalente máxima y el esfuerzo elástico equivalente mínimo tienen valores porcentuales superiores a la media. Esto indica una alta sensibilidad de estos datos en el modelo, posiblemente debido a factores locales, concentraciones de tensiones o discontinuidades geométricas. En tales casos, se requiere una malla más fina en las secciones donde se concentran los esfuerzos y las deformaciones. Es necesario refinar la malla para obtener resultados que se encuentren dentro del rango esperado de respuestas.

Design Point	Tamaño de elemento [mm]	Factor de seguridad Minimo	Esfuerzo Equivalente Maximo [Mpa]	Deformación elástica equivalente máxima [mm mm⁻¹]	Deformación total máxima [mm]
DP 0	20	5.1724517	48.33	0.00024175	1.95120599
DP 1	22	5.2040212	48.04	0.0002763	1.95439127
DP 2	24	5.2003698	48.07	0.00036509	1.9579486
DP 3	26	5.2303602	47.8	0.00023913	1.96633199
DP 4	28	5.0113935	49.89	0.00024966	1.97251758
DP 5	30	5.0875733	49.14	0.00024581	1.97653373
DP 6	40	5.0939167	49.08	0.00024546	1.98153857
DP 7	50	5.0385417	49.62	0.00024816	1.98800951
DP 8	60	5.031966	49.68	0.00024851	1.9946646
<i>Error/Vari Aproximada</i>		2%	2%	15%	1%

Tabla 11. Valores máximos parametrizados del sistema de simulación estática.

Design Point	Tamaño de elemento [mm]	Factor de seguridad Minimo	Esfuerzo Equivalente Minimo [Mpa]	Esfuerzo elástico equivalente Mínimo [mm mm⁻¹]	Deformación total Media [mm]
DP 0	20	5.1724517	4.87E-06	6.19E-11	0.5285982
DP 1	22	5.2040212	6.25E-06	5.73E-11	0.5288754
DP 2	24	5.2003698	5.58E-06	7.51E-11	0.4821356
DP 3	26	5.2303602	7.71E-06	5.88E-11	0.5299806
DP 4	28	5.0113935	5.58E-06	7.05E-11	0.5285146

<i>DP 5</i>	<i>30</i>	<i>5.0875733</i>	<i>6.18E-06</i>	<i>6.93E-11</i>	<i>0.527957</i>
<i>DP 6</i>	<i>40</i>	<i>5.0939167</i>	<i>6.72E-06</i>	<i>5.79E-11</i>	<i>0.5192025</i>
<i>DP 7</i>	<i>50</i>	<i>5.0385417</i>	<i>7.34E-06</i>	<i>5.86E-11</i>	<i>0.5109735</i>
<i>DP 8</i>	<i>60</i>	<i>5.031966</i>	<i>6.01E-06</i>	<i>5.24E-11</i>	<i>0.5105193</i>
<i>Error/Varianza Aproximada</i>		<i>2%</i>	<i>14%</i>	<i>12%</i>	<i>3%</i>

Tabla 12. Valores mínimos parametrizados de la simulación estática.

Dentro del proceso de optimización topológica también es necesario recurrir directamente a los modelos de independencia de malla esto para conseguir precisión en los resultados pues garantiza que la convergencia de la solución sea más efectiva y que la simulación converja a medida que se realicen procesos de discretización de dominio y refinado de la malla. Por eso dentro de ANSYS Workbench se optó por parametrizar el modelo de optimización con el mismo esquema antes visto en la Imagen 42, donde por medio de variaciones en el mallado y el tamaño de los elementos se pudieron encontrar los siguientes resultados.

En el proceso de independencia de malla de la optimización topológica, se utilizan herramientas disponibles en ANSYS para optimizar y discretizar la malla, así como para emplear sistemas de tamaño adaptativo. Estos sistemas adaptativos generan elementos de diferentes tamaños según la complejidad geométrica de la estructura, lo que permite ahorrar recursos computacionales y acelerar los tiempos de obtención de resultados.

<i>Mesh Element Size [mm]</i>	<i>Topology Density Final Mass [kg]</i>	<i>Topology Density Percent Mass of Original</i>	<i>Topology Density Percent Volume of Original</i>	<i>Topology Density Final Volume [m³]</i>
--------------------------------------	--	---	---	---

20	3250.8897	44.123853	44.123853	0.4141261
22	3304.2328	44.845959	44.845959	0.4209214
Adaptative Size	418	5.68	5.68	0.00533
% Error	1.15%	1.15%	1.15%	1.15%

Tabla 13. Parametrización de proceso de optimización topológica en chasis Spaceframe en base a la distancia de malla

Topology Density Original Volume [m³]	Topology Density Average	Topology Density Maximum	Topology Density Minimum	Topology Density Original Mass [kg]
0.9385538	0.3010464	1	0.001	7367.6471
0.9385938	0.2922103	1	0.001	7367.9612
0.9385938	0.29171	1	0.001	7367.9
0.00%	2.11%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 14. Variabilidad de la optimización en base a la independencia de malla

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso inadecuado de estas soluciones puede generar modelos no convergentes. Un ejemplo de ello es cuando la optimización topológica elimina por completo la masa del sistema, conservando únicamente las regiones correspondientes a las "boundary conditions" que representan cargas o restricciones. En esta situación, el modelo resultante puede carecer de densidad de material y no cumplir con los volúmenes aceptables para las condiciones de simulación. Por lo tanto, es fundamental aplicar correctamente las herramientas y los parámetros de la optimización topológica. Se debe encontrar un equilibrio entre la reducción de masa y la conservación de la integridad estructural para garantizar que los diseños optimizados sean factibles desde el punto de vista práctico y cumplan con los requisitos de las condiciones de simulación.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el proceso de optimización topológica, se diseñaron bases estructurales que pudieran soportar las cargas especificadas, incluyendo sistemas de transmisión de potencia y sistemas de desplazamiento. Se desarrollaron modelos con capacidades de carga excedentes y conceptos estructurales para mejorar la seguridad en caso de impactos. Se estableció como objetivo en el diseño de la optimización topológica reducir la masa de las estructuras en un 35%, para obtener modelos procesados por algoritmo que cumplieran con los requisitos y maximizaran la resistencia estructural del vehículo.

Además, al comprender las características de producción y construcción de un vehículo, ya sea monocasco o Spaceframe, se llega a las siguientes conclusiones:

El proceso de selección y diseño de un chasis monocasco o Spaceframe implica considerar los métodos de manufactura utilizados, como conformado, soldadura, extrusión o ensamblaje. El monocasco corresponde a procesos de fabricación en masa, mientras que el Spaceframe utiliza métodos de manufactura más detallados y costosos. Ambos modelos son acertados en términos de las consideraciones del mercado, ya sea para sistemas de producción en masa o para competiciones exigentes. El chasis Spaceframe es compatible con la normativa FIA y Rally Dakar, cumpliendo con los requisitos de tamaño y estructura, así como con factores de seguridad. Tanto el monocasco como el Spaceframe superan las pruebas de impacto y resistencia propuestas por las normativas EURO INCAP e IHHS en su versión 2023 y en cuanto a la resistencia a la torsión, ambos modelos ofrecen valores aceptables dentro de los estándares del mercado 39000 Nm/grado y 60000 Nm/grado respectivamente para el Monocasco y el Spaceframe.

En cuanto al método de producción, se considera que el chasis seleccionado puede utilizar métodos de manufactura aditiva en secciones estructurales complejas, empleando acero 960 Dual Phase y conexiones tubulares del mismo material.

Además, el proceso de independencia de malla utilizado en los modelos de optimización topológica ha demostrado una precisión aproximada del 2% al 3% en los cálculos y simulaciones realizadas, brindando resultados confiables y precisos para respaldar las decisiones de diseño y optimización.

En resumen, la selección y diseño de un chasis monocasco o Spaceframe considera aspectos de producción, métodos de manufactura, normativas de seguridad y rendimiento. Ambos modelos cumplen con los requisitos establecidos y ofrecen opciones adecuadas para el mercado. El método de producción puede involucrar la utilización de técnicas de manufactura aditiva en secciones estructurales complejas, y el proceso de independencia de malla garantiza resultados precisos en los cálculos y simulaciones realizadas.

9. BIBLIOGRAFÍA

Budynas, R., & Nisbett, K. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley - novena edición. MCGRAW-HILL.

Hiller, J., & Lipson, H. (2019). Multi material topological optimization of structures and mechanism. Computational Synthesis Laboratory Cornell University.

Krzikalla, D., Mesicek, J., Petru, J., Sliva, A., & Smiraus, J. (2019). Analysis of Torsional Stiffness of the frame of a formula student vehicle. Journal of applied Mechanical Engineering.

Lafuente Ibanez, A. (2017). Comportamiento estático de un chasis multitubular de un vehiculo tipo formula SAE.

Lopez Paris, J. (2007). Restricciones en tensión y minimización del peso: una metodología general para la optimización topológica de estructuras. Universidad Da Coruña.

Padilla, C., Pozo, E., Ballin, F., & Herrera, D. (2020). Optimización topológica de las manguetas delanteras y posteriores para un vehiculo prototipo fórmula SAE. Dominio de las ciencias.

Poma, A., & Quezada, P. (2018). Diseño y fabricación del chasis para un kart KF4 según la normativa CIK/FIA. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.

Reglamento Dakar. (2020). Obtenido de <https://competitors.dakar.com/es/reglamentos> ROTAX. (2021). ROTAX ACE 900 TURBO. Obtenido de

<https://www.rotax.com/es/Productos/Rotax-Motores/Detalle-de-Motores/Rotax-900-Ace-Turbo.html>.