



Diseño del chasis de un vehículo eléctrico para la II Competencia Nacional de Vehículos de Tracción Eléctrica

Design of the chassis of an electric vehicle for the II National Competition of Electric Traction Vehicles

Arley Villa Salazar ^a, Elkin González Montoya ^b & Andrés Romero Maya ^c

^a Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, a.villasa@pascualbravo.edu.co

^b Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia, elkin.gonzalez@pascualbravo.edu.co

^c Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, andres.romero@pascualbravo.edu.co

Recibido: septiembre 30, 2022. Aceptado: enero 23, 2023

Resumen

Este artículo presenta las etapas del diseño y construcción del chasis de un vehículo eléctrico. Se inicia con el diseño conceptual, donde se definieron la geometría y el material utilizado; posteriormente, se procedió a realizar simulaciones mediante el software paramétrico de elementos finitos (FEM) Solidworks, con el objetivo de establecer las condiciones de frontera, carga y contactos, para finalmente realizar la planimetría de las piezas y su fabricación. Se analizó el comportamiento mecánico bajo una carga de 1500 N en el frente, posterior y lateral del chasis. En la zona frontal, se alcanzó un valor de 80.93 MPa, mientras que el límite del material está alrededor de 268 MPa para el material ASTM 500 grado B que fue utilizado. En cuanto a la deformación que sufre el chasis, se alcanzó un valor máximo de 0.29 mm, garantizando que la jaula de seguridad del chasis mantiene la integridad del piloto, considerando que las velocidades alcanzadas por este tipo de vehículo no superan los 60 Km/h. Finalmente, se generó la información técnica (planimetría), con el fin de continuar con la etapa de producción y construcción. El artículo es el resultado del trabajo interdisciplinario de estudiantes y profesores de diferentes ramas de la ingeniería: mecánica, eléctrica, electrónica y automotriz de la Institución Universitaria Pascual Bravo, y forma parte de las iniciativas para incentivar la movilidad eléctrica a través del diseño y fabricación de un vehículo para la 2da Competencia Nacional de Vehículos de Tracción Eléctrica (IICNVTE).

Palabras clave: Análisis por elementos finitos, CAD, CAE, Solidworks, Cargas estáticas, Jaula de seguridad.

Abstract

This article presents the stages of design and construction of the chassis for an electric vehicle. It begins with the conceptual design, where the geometry and materials used were defined. Next, simulations were conducted using the finite element method (FEM) parametric software Solidworks, with the aim of establishing boundary conditions, loads, and contacts, and finally, the planimetry of the parts and their manufacture was carried out. The mechanical behavior under a load of 1500 N on the front, rear, and sides of the chassis was analyzed. In the front area, a value of 80.93 MPa was reached, while the material limit is around 268 MPa for the ASTM 500 grade B material that was used. Regarding the deformation the chassis undergoes, a maximum value of 0.29 mm was reached, ensuring that the safety cage of the chassis maintains the integrity of the driver, considering that the speeds reached by this type of vehicle do not exceed 60 km/h. Finally, the technical information (planning) was generated, to proceed with the production and construction stage. This article is the result of interdisciplinary work by students and professors from different branches of engineering: mechanical, electrical, electronics, and automotive at the Institución Universitaria Pascual Bravo and is part of the initiatives to encourage electric mobility through the design and manufacturing of a vehicle for the 2nd National Competition of Electric Traction Vehicles (IICNVTE).

Keywords: Finite element analysis, CAD, CAE, Solidworks, Static loads, Roll cage.

Citar como:

A. Villa, E. González & A. Romero. "Diseño del chasis de un vehículo eléctrico para la II Competencia Nacional de Vehículos de Tracción Eléctrica". Revista CINTEX, Vol. 27(2), pp. 16-31. 2022. DOI: <https://doi.org/10.33131/24222208.385>

1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la Institución Universitaria Pascual Bravo ha participado en diversas competencias de vehículos, tanto de tracción humana como eléctrica, lo que ha requerido el diseño y construcción de un chasis como estructura principal encargada de soportar y unir diferentes componentes como el motor, sistema de frenos, sistema de dirección, brazos de suspensión, asiento, entre otros, así como los elementos periféricos de electrónica y control. El chasis también constituye el habitáculo del piloto y, por lo tanto, debe ofrecer condiciones de seguridad y protección en caso de colisión. Para ello, debe ser capaz de absorber impactos frontales y laterales y tener una estructura que soporte condiciones de volcamiento, manteniendo la integridad del piloto. Además, el diseño del chasis está directamente asociado al desempeño y comportamiento del vehículo en competencia.

Es por esto que el diseño y construcción de estructuras como el chasis de un vehículo permiten aplicar, reforzar y adquirir conocimientos, como lo demuestran trabajos realizados por otros autores: en [1] se muestra el diseño de un chasis para la competencia "Eco-Challenge", en [2] se evalúa el comportamiento del chasis de un vehículo urbano bajo determinados factores operativos, como la carga externa, el material y las dimensiones; la referencia [3] describe el diseño y el análisis de los largueros del bastidor del chasis para vehículos de carga, que deben resistir choques y torsión; en [4] se realiza un análisis estático y modal del chasis de un automóvil de cuatro ruedas aplicando el método de elementos finitos, y en [5] se propone el diseño de un chasis para vehículo eléctrico que cumpla las normas y reglamentos de la Fórmula Varsity de Malasia.

A partir de esta experiencia, se espera en un futuro próximo diseñar múltiples medios de transporte sencillos y no contaminantes, como bicicletas, patines, patinetas, motos y vehículos eléctricos, buscando contribuir a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono generadas por los sistemas de movilidad tradicionales [6]. En este sentido, el desarrollo de un chasis resulta ser una herramienta interesante ya que permite llevar a cabo proyectos innovadores desde el punto de vista del diseño mecánico y posibilita un primer contacto con esta área de estudio de la ingeniería. Por tanto, este trabajo presenta las etapas del diseño y construcción del chasis de un vehículo eléctrico, comenzando desde el diseño conceptual, donde se definieron la geometría y el material utilizado, pasando por las simulaciones hasta la construcción y pruebas de carga de la estructura.

2 METODOLOGÍA

Para el diseño y construcción del chasis del vehículo eléctrico se plantearon las etapas del proceso de diseño que se detallan a continuación:

- Identificación de la necesidad. Se plantean los requerimientos del chasis del vehículo, teniendo en cuenta la reducción del peso, una baja propensión al volcamiento, sus subsistemas y el cumplimiento de las restricciones dadas por el reglamento de la competencia [7].
- Investigación preliminar. Se realiza una investigación detallada de los chasis existentes para competencias similares, incluyendo la investigación del estado del arte, la cual está asociada con productos similares y tecnologías usadas en su desarrollo.
- Diseño preliminar. A partir de un diseño conceptual, se determinan y concretan las componentes en su forma específica, materiales propuestos, funcionamiento, subsistemas asociados y dimensiones de los elementos, ya sean simples o complejas [8].
- Modelado geométrico. Mediante el uso de Solidworks, se realiza el modelado geométrico de las piezas que conforman el chasis. En el dimensionamiento de los planos de conjunto, se aplican las diferentes ecuaciones asociadas a las pruebas de tensión, flexión y desplazamiento. Sus respectivos análisis y comprobaciones se aplican mediante dicho software.
- Diseño detalle. Comprende el ensamble total del chasis, documentos de diseño realizados por la herramienta CAD, cada uno de los elementos especificados con las dimensiones y el material [9].
- Documentación. Se recopila toda la información procesada, de forma ordenada, para la presentación final.
- Solución. Se procede a la fabricación del chasis dadas las condiciones establecidas en las etapas

previas.

- Pruebas estáticas y dinámicas. Se establecen los lineamientos a seguir en las pruebas realizadas para verificar el cumplimiento de los requerimientos establecidos por la competencia.

3 DISEÑO CONCEPTUAL

El diseño conceptual se realizó a partir de una búsqueda en la web de vehículos desarrollados para competencias similares. En la Figura 1 se muestra un ejemplo del tipo de vehículo. Aunque se analizaron vehículos de cuatro ruedas, se optó por usar una configuración Tadpole, es decir, dos ruedas adelante y una rueda motriz atrás, buscando reducir el peso y mantener una baja tendencia al riesgo de volcamiento. Además, se buscó que pudiera adaptarse a una serie de características, algunas determinadas en un comité de diseño y otras basadas en las restricciones impuestas por el reglamento de la competencia [7].



Fig. 1. Modelos para el diseño conceptual [10], [11].

Una vez definido el concepto del vehículo en su parte externa, se procedió a diseñar el chasis o bastidor, elemento que confiere soporte tanto a la carrocería como al piloto y a los subsistemas de dirección, frenado y eléctricos que también deben adaptarse a las características de la competencia. A continuación, se llevó a cabo una etapa de simulación paramétrica en un software de diseño CAD/CAE, que se aprecia en la Figura 2. Posteriormente al diseño conceptual y mediante el uso de software, se generó el diseño preliminar de los componentes del vehículo (chasis y soporte de ruedas) que se muestra en la Figura 3.

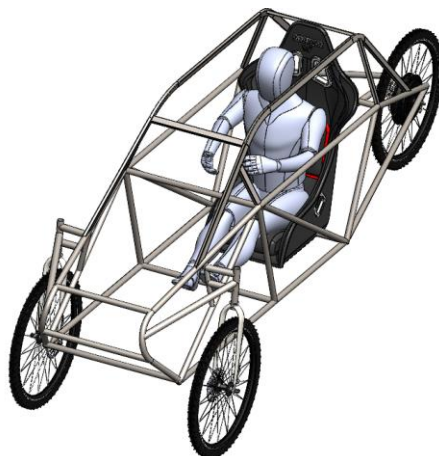


Fig. 2. Simulación CAE del chasis. (Elaboración Propia)

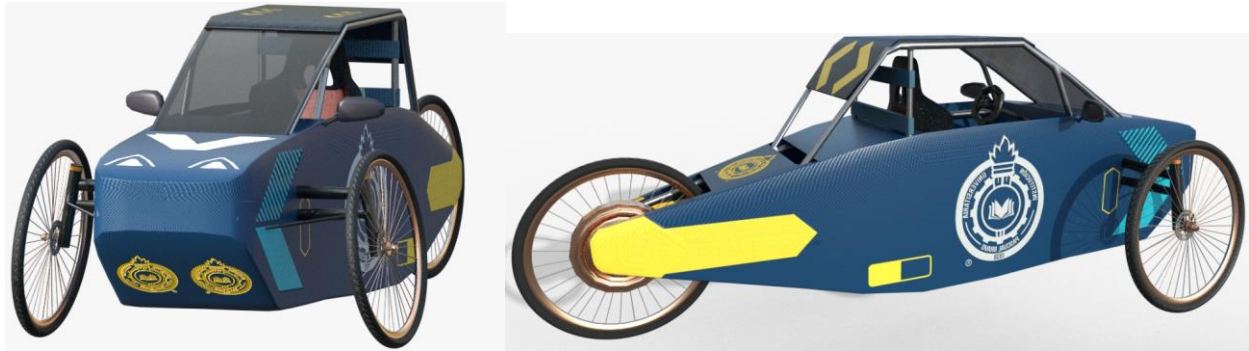


Fig. 3. Diseño Gráfico del vehículo. (Elaboración Propia)

4 MODELADO Y SIMULACIÓN

El modelado se concibe como una representación de un sistema físico [12], [13]. En este caso particular, se considera una representación idealizada, pues se analiza la respuesta estructural del chasis para un vehículo de competencia. Esto implica resolver las ecuaciones de elasticidad en tres dimensiones para medios isotrópicos, que sólo aplican bajo ciertos supuestos ideales, como son:

- Las propiedades del material no cambian con la orientación.
- Las deformaciones unitarias son pequeñas.
- En la zona elástica, el comportamiento del material se puede describir mediante la Ley de Hooke generalizada.

De esta forma, el presente problema de modelamiento se basa en la idealización del sistema físico mediante las ecuaciones de la teoría de la elasticidad, permitiendo transformar el modelo físico en uno matemático. Una vez considerado el modelo matemático del problema, se debe proceder a la solución numérica de las ecuaciones gobernantes para un dominio determinado y bajo ciertas condiciones de frontera.

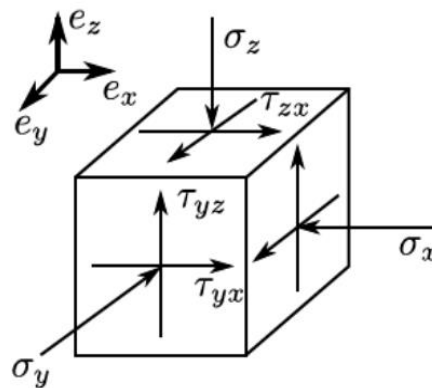


Fig. 4. Estado de esfuerzos en tres dimensiones [14].

En un espacio de tres dimensiones, los esfuerzos desarrollados en un elemento diferencial sometido a las cargas se muestran en la Figura 4, donde se distinguen tres componentes de esfuerzos normales (σ_x , σ_y , σ_z) y seis componentes de esfuerzos cortantes (τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{xz} , τ_{zx} , τ_{yz} , τ_{zy}). Por conservación del momento angular, se puede demostrar que $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ y $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ [14], por lo tanto, el número de variables independientes del sistema se reduce a seis: tres esfuerzos normales y tres esfuerzos cortantes.

En las ecuaciones (1), (2) y (3) se muestran las relaciones de equilibrio de un elemento diferencial:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0 \quad (3)$$

Donde f_x , f_y y f_z son las fuerzas de cuerpo en las direcciones coordenadas, las cuales pueden despreciarse en este análisis. Para definir el problema elástico son requeridas leyes constitutivas y ecuaciones cinemáticas. Las primeras de ellas se muestran en (4), la cual es la Ley Generalizada de Hooke, donde C es la matriz de rigidez del material, definida en (5), esta se da en términos del módulo elástico (E) y el módulo de Poisson (ν) [15].

$$\sigma = C\epsilon \quad (4)$$

$$C = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{vmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{vmatrix} \quad (5)$$

Por otro lado, las ecuaciones cinemáticas, que se muestran en (6), relacionan las deformaciones unitarias con los desplazamientos. Donde d_1 , d_2 y d_3 corresponden a los desplazamientos en x , y , z , representados también como u , v , w , respectivamente; donde, x_1 , x_2 , x_3 una representación de los ejes x , y , z [15].

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial d_i}{\partial x_j} + \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \right), i, j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

Una vez establecidas las ecuaciones de equilibrio del sistema, se procede a la simulación computacional, que consiste en la operación numérica del modelo que permite obtener la representación temporal del comportamiento del sistema físico descrito por dicho modelo [15]. En este caso, el método de simulación empleado es el de elementos finitos (FEM), que se muestra en la Figura 5.

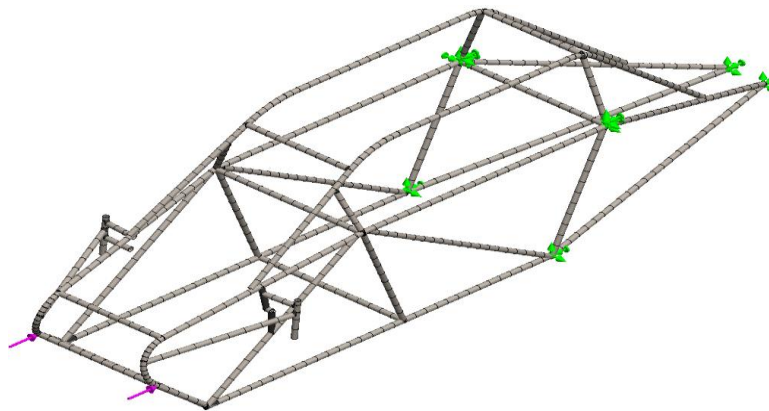


Fig. 5. Método de los Elementos Finitos (FEM), para malla tipo viga (Elaboración Propia)

La simulación por FEM se utiliza para resolver las cargas aplicadas en el chasis mediante una malla de viga. El programa reconoce automáticamente una malla de viga e identifica juntas para miembros estructurales que se

tocan o interfieren, así como miembros estructurales que no se tocan dentro de una cierta distancia (tolerancia). Un elemento de viga es un elemento lineal definido por dos puntos finales y una sección transversal. Los elementos de viga pueden resistir cargas axiales, de flexión, cortantes y de torsión. Las cabezas de armadura, por su parte, solo resisten cargas axiales. Cuando se utiliza con piezas soldadas, el software define las propiedades transversales y detecta las juntas. Este método es ampliamente aceptado en aplicaciones de ingeniería para resolver ecuaciones diferenciales parciales sobre dominios sometidos a fuerzas de cuerpo y condiciones de frontera. El método consiste en dividir el dominio en elementos finitos, cuya respuesta está expresada en términos de funciones de interpolación y de un número finito de grados de libertad, que en este caso corresponden a los desplazamientos u , v y w . La respuesta de cada uno de los elementos se ensambla en un sistema discreto final, cuya solución depende de las condiciones de frontera impuestas. En este trabajo, se utilizó el software Solidworks para implementar dicha aplicación.

5 ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

5.1 Geometría y materiales

La geometría y dimensiones del chasis, denominado “furtivo 01”, son analizadas en este artículo y se muestran en la Figura 6. La modelación se realizó mediante el software Solidworks 2021. Para la base del chasis se utilizó una estructura tubular con un diámetro de 19.05 mm y un calibre de 1.5 mm, y tubería rectangular de 20 mm x 10 mm con calibre de 1.6 mm para la jaula de seguridad. Esta tubería se forma en frío a partir de lámina rolada en caliente y es soldada por inducción de alta frecuencia. Este material se eligió para los elementos estructurales, ya que las secciones transversales varían de forma redonda a rectangular en algunas partes del chasis.

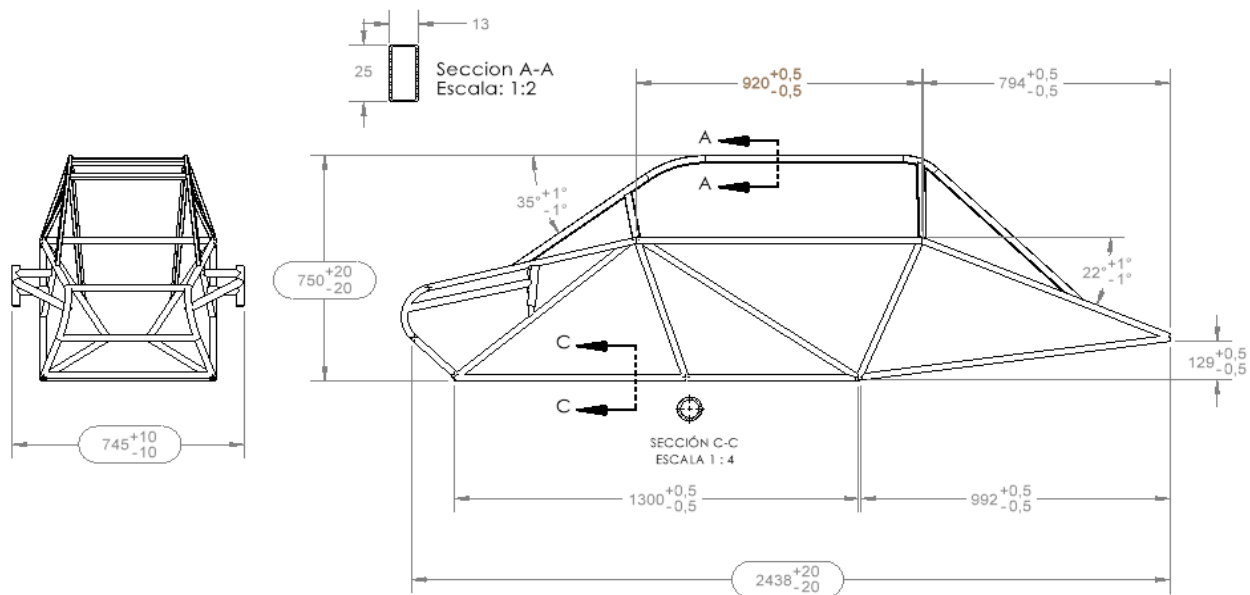


Fig. 6. Geometría y Dimensiones generales furtivo 01 (Elaboración Propia)

Tanto para la jaula de seguridad, mostrada en la Figura 7, como para la base del chasis, se utilizó un material conforme a las normas NTC 4526 [16], [17] y 1560 [18], [19]. Este material posee una composición química que se muestra en la Tabla 1 y propiedades mecánicas que se detallan en la Tabla 2. Los espesores de las tuberías seleccionadas, tanto para el chasis como para la barra antivuelco, difieren significativamente porque se requiere mayor resistencia en la jaula, ya que esta tiene la función de proteger al piloto en caso de volcamiento [20].

TABLA 1
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA TUBERÍA DE CERRAMIENTO BAJO NORMA NTC 1560 [18]

Elemento	Composición en porcentaje	
	Mínimo	Máximo
Carbono	-	0.15
Manganeso	0.30	0.60
Fósforo	-	0.04
Azufre	-	0.05
Silicio ^A	-	0.03

TABLA 2
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA TUBERÍA DE CERRAMIENTO BAJO NORMA NTC 1560 [18]

Característica	Mínimo
Resistencia a la fluencia, ksi (MPa)	25 (176)
Resistencia a la rotura, ksi (MPa)	38 (268)
Elongación en 2 pulgadas o 50 mm, %	21

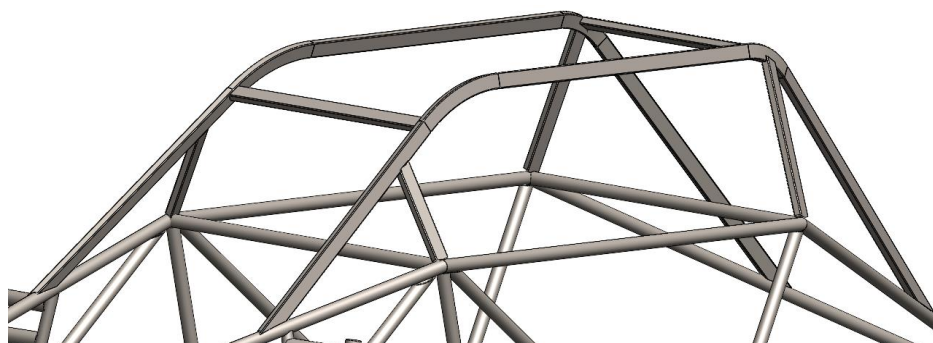


Fig. 7. Jaula de seguridad tubería de sección rectangular (Elaboración Propia)

En cuanto al diseño de la geometría del chasis, se optó por una estrategia de estructuras triangulares, ya que esta figura geométrica presenta la mayor rigidez frente a cargas puntuales y, en general, frente a cargas distribuidas generadas por una colisión. Las diagonales que forman los triángulos están sometidas a tensión y compresión, dependiendo de la zona del chasis. Según [21], el uso de diagonales con una sección transversal de diámetro mayor permite generar una mayor rigidez estructural. Sin embargo, esto complica el montaje del chasis, ya que se crean muchas superficies irregulares debido al cambio de sección que ocurre cuando se sueldan tubos de diferentes diámetros.

5.2 Simulación

Para la geometría y dimensiones anteriormente dadas, se creó un modelo al que se le realizaron simulaciones mediante el software SolidWorks 2021. Este software analiza miembros estructurales usando el método de elementos finitos para vigas, mostrando la deflexión máxima y las deformaciones en los tramos de cada segmento analizado. En la Figura 8 se aprecian las juntas de los elementos de intersección de cada tramo de

tubería redonda y rectangular; los puntos magentas representan la cantidad de uniones presentes en el modelo, que en este caso es de 56. Posteriormente, se procedió a realizar las interacciones de los componentes que sirven como soporte para los brazos laterales, en los cuales se realizan las uniones de los sistemas de giro de las llantas frontales, como se muestra en la Figura 9. La configuración adoptada es de unión rígida entre componentes con el fin de simular la soldadura presente entre ellos. Las restricciones utilizadas en la aplicación de la carga frontal se realizaron teniendo en cuenta los puntos de giro de la rueda trasera y algunos componentes estructurales laterales, con el objetivo de confinar el movimiento del chasis en la dirección del eje z y el plano inferior zx para evitar su rotación.

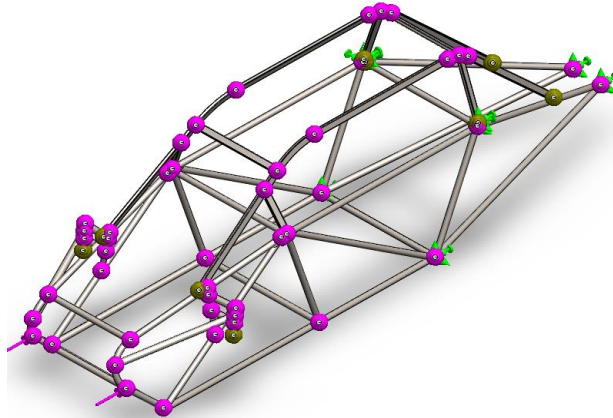


Fig. 8. Puntos de unión en tramos de tubería (Elaboración Propia)

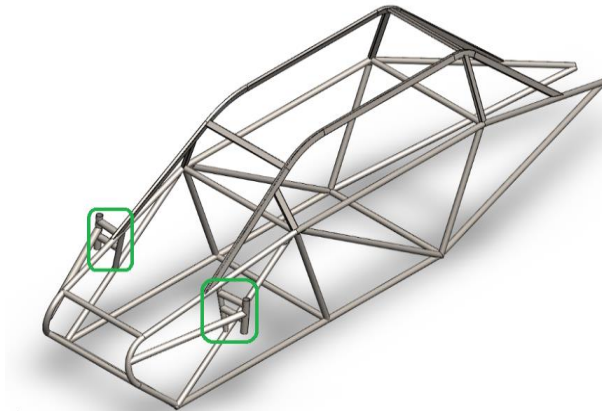


Fig. 9. Interacción brazos laterales soporte de dirección (Elaboración Propia)

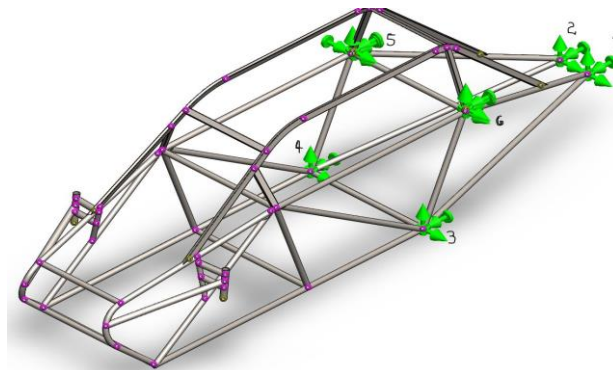


Fig. 10. Puntos de fijación del chasis restricción del desplazamiento y rotación en eje Z (Elaboración Propia)

En la Figura 10 se observan los puntos de fijación en color verde: los posteriores 1 y 2 para la restricción del

eje z positivo y negativo, y los puntos 3, 4, 5 y 6 para la rotación en el mismo eje. En la parte frontal del chasis se aplicó carga continua de 1500 N, en dirección negativa de eje z, con el fin de simular la compresión, tal como se aprecia en la Figura 11.

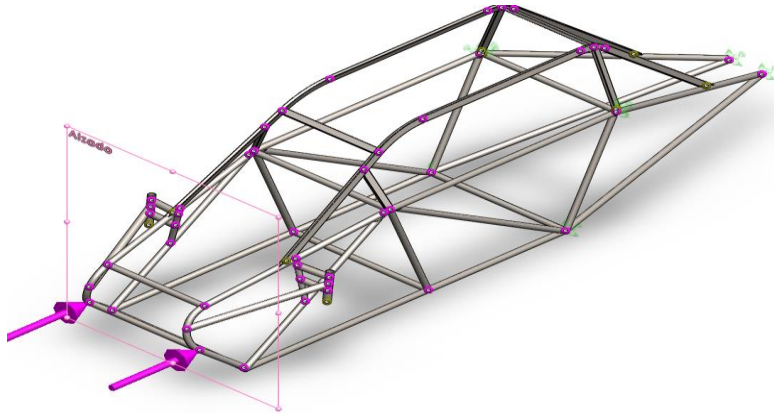


Fig. 11. Carga aplicada en los nodos frontales tangente a la curva del tubo curva Frontal (Elaboración Propia)

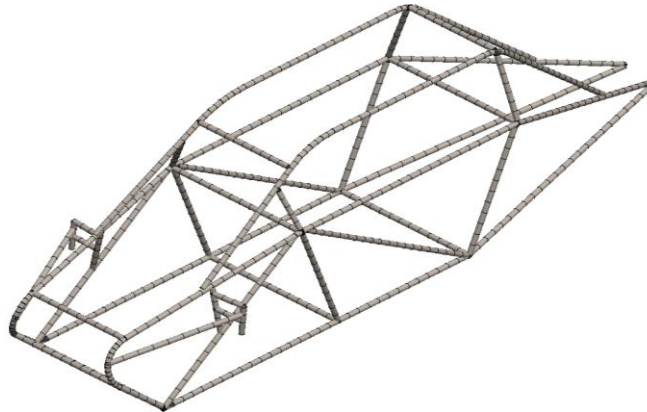


Fig. 12. Elementos fraccionados para aplicar método de mallado de viga (Elaboración Propia)

Los detalles de la malla utilizada para el modelo se presentan en la Tabla 3. La malla usada es de tipo mixta; el mallado utiliza el método de malla de viga, como se muestra en la Figura 12, el cual consiste en fraccionar cada tramo de tubería en segmentos más pequeños con el propósito de calcular la deformación y deflexión del segmento.

TABLA 3
 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Tipo de malla	Mixta
Puntos jacobianos para malla	16
Tamaño del elemento	7.41962 mm
Tolerancia	0.370981 mm
Calidad de la malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	62647
Número total de elementos	30960

Para los parámetros mencionados anteriormente en la configuración de las variables de entrada al modelo, tales como juntas, conexiones, sujeciones, cargas y mallado, se presentan los resultados en la Figura 13. En ella, se aprecia que el modelo sometido a compresiones con carga frontal no excede el límite elástico del material, presentando una deformación de 81.93 MPa en la zona de aplicación de la carga, lo que equivale a un 32% de la deformación de los componentes frontales. En este caso, no representa peligro para la integridad del conductor, dado que el límite elástico del material es de 256 MPa, según la Tabla 2.

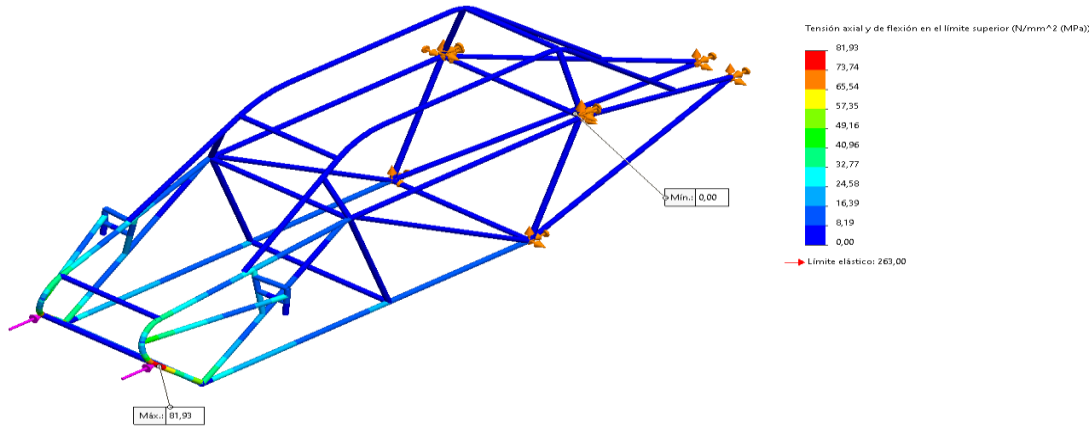


Fig. 13. Resultado simulación con carga frontal (Elaboración Propia)

En cuanto a la deformación del material mostrada en la Figura 14, esta alcanza un valor de 0.29 mm en el travesaño que une los segmentos de aplicación de la carga. Dicha deformación se presenta en dirección del eje Z negativo y, al igual que el límite elástico, estas deformaciones no representan daño considerable en la estructura del chasis y, por consiguiente, en la integridad del piloto.

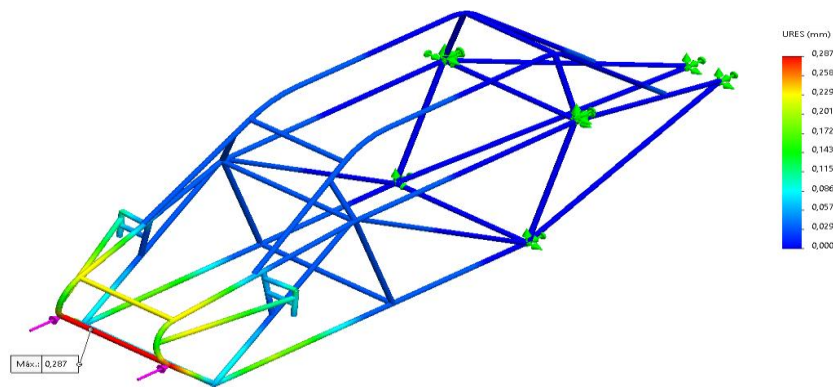


Fig. 14. Deformación del material con carga frontal (Elaboración Propia)

Además, se realizaron pruebas de compresión y deformación para las partes lateral y posterior, obteniendo valores de 179.27 MPa, 251 MPa, 2.002 mm y 76 mm respectivamente, como se muestra en las Figuras 15, 16, 17 y 18. Al igual que en las cargas frontales, la simulación muestra que estas no representan peligro para la integridad del conductor, dado el límite elástico del material. En caso de deformación seria, esta sería de un máximo de 7 cm.

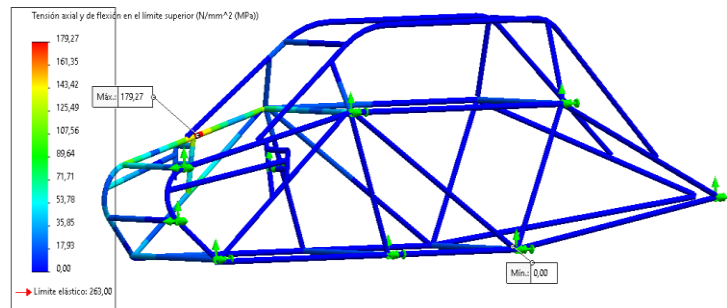


Fig. 15. Resultado simulación con carga lateral (Elaboración Propia)

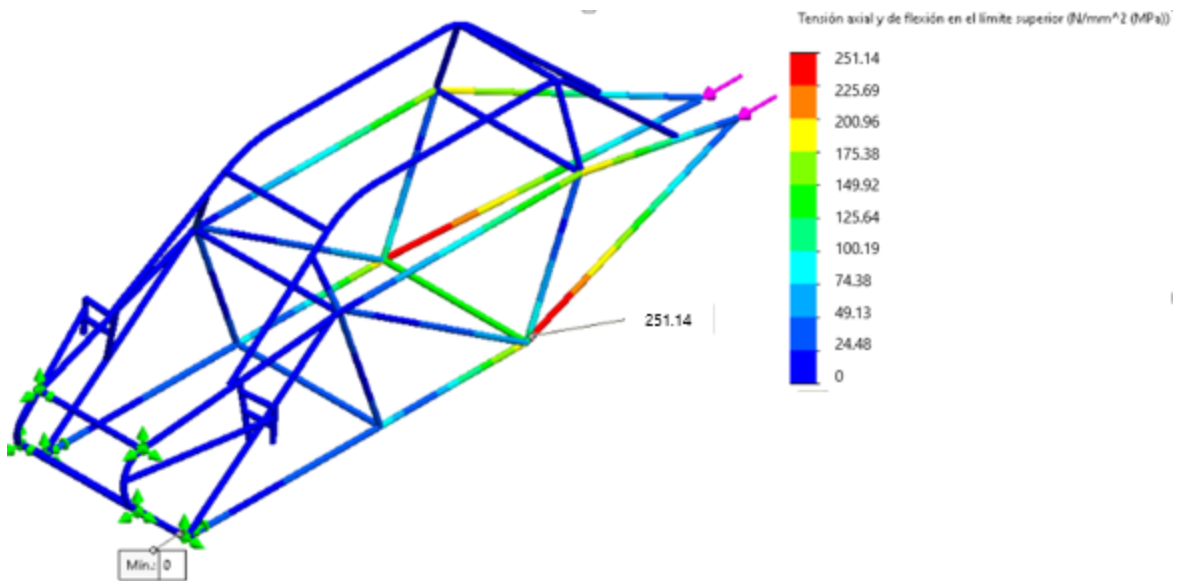


Fig. 16. Resultado simulación con carga posterior (Elaboración Propia)

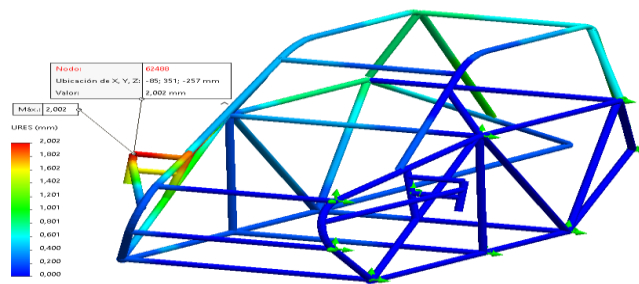


Fig. 17. Deformación del material con carga lateral (Elaboración Propia)

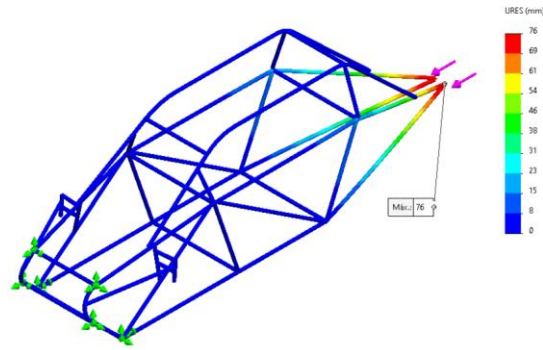


Fig. 18. Deformación del material con carga posterior (Elaboración Propia)

6 DISEÑO DE DETALLE Y CONSTRUCCIÓN

En la Figura 19, se muestra el plano se donde se observa la configuración y dimensiones del chasis, así como la ubicación del piloto al interior de la Jaula de seguridad.

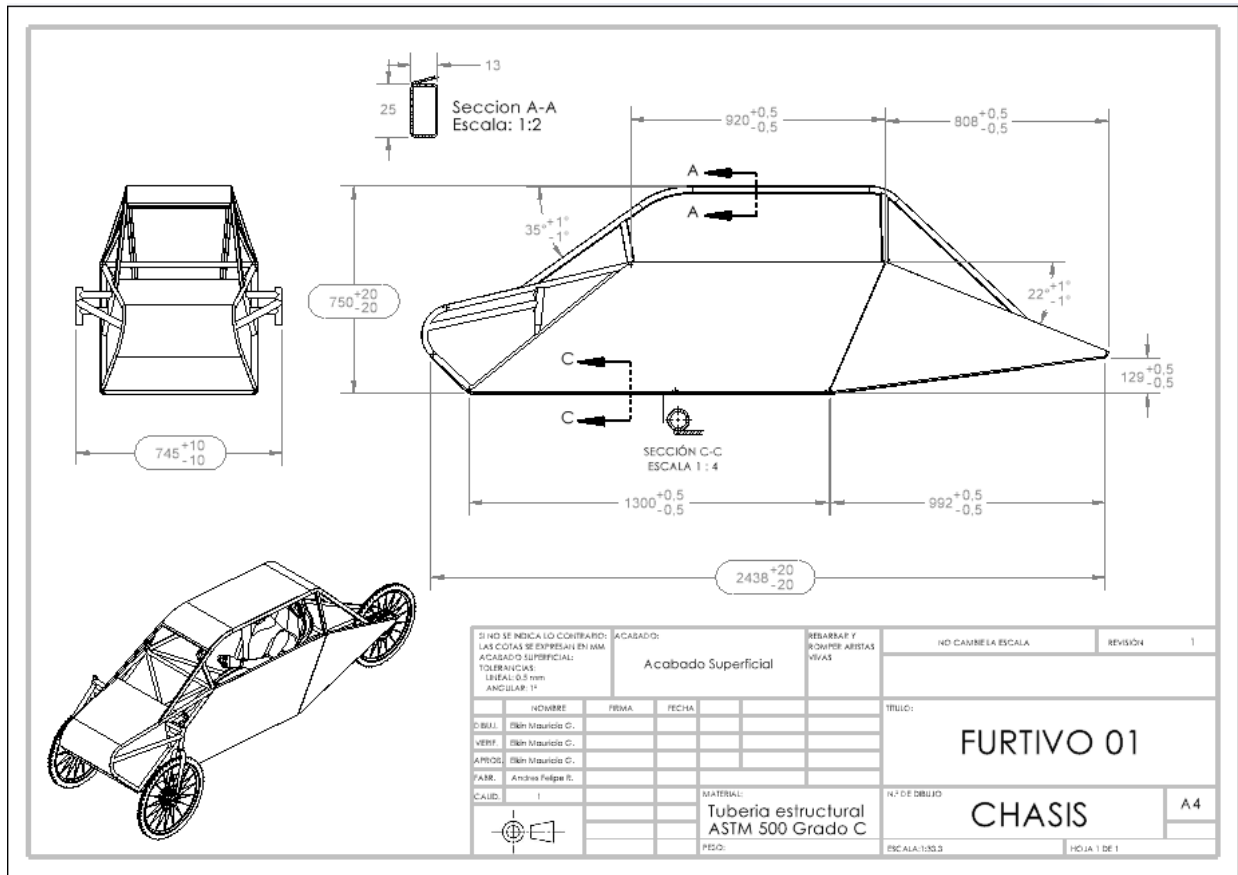


Fig. 19. Plano Furtivo 01 (Elaboración Propia)

Después de realizar los planos de detalle en Solidworks, se construyó un modelo 3D a escala 1:10. Este modelo permite tener una idea clara antes de pasar a la etapa de producción y construcción, para la cual se siguieron los pasos descritos en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 20. En esta figura se observan las actividades realizadas para construir el chasis del Furtivo 01.

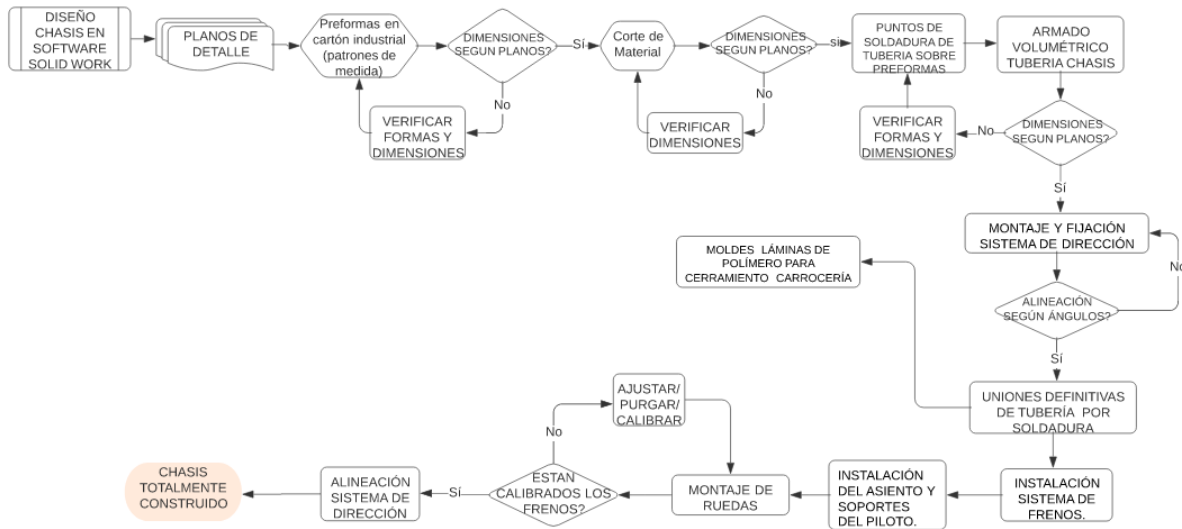


Fig. 20. Diagrama de Flujo proceso de construcción Furtivo 01 (Elaboración Propia)

7 RESULTADOS DE PRUEBAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS

Para verificar el correcto funcionamiento del chasis, se realizaron pruebas tanto estáticas como dinámicas, lo que implicó someter al chasis a una serie de esfuerzos determinados por la aplicación de cargas reales sobre un punto en particular o sobre una superficie que distribuyera esa carga de forma uniforme. Entre las pruebas realizadas se incluyen:

- Pruebas estáticas de carga lateral en vacío (soporte de impacto lateral).
- Prueba estática de carga superior (soporte de jaula antivuelco).
- Prueba de ajuste del sistema de dirección.
- Prueba de carga frontal sobre brazos de soporte del sistema de dirección.
- Prueba dinámica del vehículo con piloto en el suelo.

Para las pruebas estáticas, se sometió al chasis a una serie de esfuerzos determinados por la aplicación de cargas reales, siendo el valor mínimo de referencia solicitado por el reglamento de la competencia de 1500N [7]. Para estas pruebas se utilizaron tres (3) yunques de 50 kg y uno (1) de 70 kg, montados sobre una lámina de aluminio estriada de 3 mm y 10 kg, con un peso total combinado (PTC) de 230 kg, equivalentes a 2255.53 newtons, lo cual es un 66% mayor que el valor de referencia.

La prueba de carga estática lateral (aproximación a un impacto lateral) se realizó ubicando el chasis sobre tres soportes rígidos, de tal manera que el conjunto de dirección-rueda no quedase sometido a la carga debida al PTC usado en ese costado. En la Figura 21 se observa el montaje realizado. Tomando las dimensiones desde el piso como punto de referencia hasta cada uno de los miembros estructurales del costado, antes y después de la aplicación de la carga, se obtuvo un valor de deformación (deflexión) de 2.3 mm. Al quitar la carga aplicada, los valores de deformación medidos regresaron a cero, lo que evidencia que el material permaneció dentro de su rango elástico. Dado que el valor de la carga utilizada para las pruebas fue mayor que el valor de referencia de 1500 N, queda claro que la tubería sometida a valores inferiores de carga lateral siempre se encuentra dentro del rango elástico del material utilizado. Todo el proceso se repite cambiando de costado y corroborando el valor de deflexión alcanzado, que en el otro costado tuvo un promedio de 2.5 mm.



Fig. 21. Prueba de carga estática lateral Furtivo 01 (Elaboración Propia)

En la Figura 22, se observa que el chasis con el sistema de dirección y sus respectivas ruedas, es decir, directamente sobre la jaula antivuelco, y la prueba relacionada con la resistencia de los brazos de dirección con cargas verticales se realizan con el mismo sistema de carga distribuida. Se tomaron las respectivas mediciones con respecto al piso, obteniendo valores promedio de deflexión, luego de haber restado el efecto debido a la deformación del sistema rueda neumático, alcanzando valores con un máximo de 7 mm, lo cual es menor que la máxima deflexión permitida de 15 mm de referencia obtenida de las simulaciones. La prueba de carga estática directamente sobre la jaula antivuelco se realizó montando el chasis sobre los soportes rígidos ya mencionados, conservando el montaje con los cuatro yunques. En este caso, el valor de deformación de la jaula antivuelco fue de 1.5 mm en la parte que presentó la mayor deflexión, lo cual permite mantener un espacio seguro para el piloto en caso de volcamiento.



Fig. 22. Prueba de carga estática Superior y sistema de dirección Furtivo 01 (Elaboración Propia)

Luego de realizar las pruebas estáticas de carga, se realizó una inspección detallada de cada elemento de unión, se calibraron llantas, frenos y se realizó la primera alineación del sistema de dirección del vehículo. Con el sistema eléctrico totalmente montado, se realizaron las pruebas de funcionamiento en vacío, es decir, que el vehículo se puso a funcionar montado sobre los soportes para que la rueda de tracción girara libremente a diferentes velocidades (15 km/h, 25 km/h y 45 km/h) por periodos de 5 minutos y se observó el comportamiento de todos los elementos. Como el desempeño fue correcto durante estas pruebas, se procedió a la realización de las primeras pruebas con piloto (carga) en el vehículo ya puesto en tierra, estas consistían en desplazamientos de 100 m con pendiente cero y diferentes velocidades, después desplazamientos con diferentes radios de giro, tanto a derecha como a izquierda, se realizaron recorridos en subida de 50 m con pendiente del 20%. Al final de

cada prueba se revisaron tanto componentes de soporte del chasis como todos los elementos periféricos de control y de funcionamiento, haciendo las respectivas correcciones antes de cada nueva prueba si era necesario, la velocidad máxima para estos desplazamientos fue de 25 km/h.

Una vez corroborados y revisados los aspectos básicos para el desplazamiento seguro del piloto al interior del chasis, se aumentaron las distancias de recorrido y la velocidad hasta 35 km/h, teniendo en cuenta las revisiones después de cada prueba, la realización de una gran cantidad de ensayos permitió encontrar una falla catastrófica en una de las columnas de dirección vertical que soportaba el eje de la rueda delantera derecha. El análisis posterior del elemento mostró una falla en el procedimiento de soldadura empleado para este elemento, lo que generó repetir el procedimiento de soldadura para las dos columnas verticales de dirección.

8 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La propuesta de chasis relacionada con la parte mecánica cumple con la lista de requerimientos establecidos por las reglas de la 2da competencia nacional de vehículos eléctricos. A partir de los resultados y el análisis de las simulaciones, se pudo concluir que las especificaciones del acero ASTM 500 grado B satisfacen los requerimientos de esfuerzo y deformación en las partes frontal y lateral del chasis. Esto se debe a que la deformación para la carga aplicada no supera los 10 mm, lo cual garantiza la integridad del piloto.

En cuanto a las cargas aplicadas en la parte posterior, el análisis de las simulaciones indica que estas podrían alcanzar el límite de rotura del material. Para corregir esto, se propone agregar elementos que formen una estructura cerrada, lo que haría más rígidos los costados laterales que sirven de soporte al motor en la parte trasera. La falta de restricción en el movimiento lateral de los soportes del eje del motor implica que cualquier carga aplicada sobre estos podría maximizar el esfuerzo en el punto de anclaje al chasis.

De acuerdo con el análisis de las simulaciones, se ve necesario añadir un tramo de conexión de tubería en la parte frontal que enlace los brazos de suspensión, ya que se observa un punto de concentración de esfuerzos en la base de estos, derivados de las cargas que se transmiten desde las ruedas hasta el chasis.

En trabajos futuros, se evaluará el desempeño mecánico de esta misma configuración de chasis considerando materiales con mejores propiedades mecánicas, dos cargas adicionales y cargas de impacto para tratar de replicar las condiciones reales de operación de la estructura del chasis.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Institución Universitaria Pascual Bravo por el apoyo económico y administrativo durante la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] M. H. Mat y A. R. Ab. Ghani, «Design and Analysis of 'Eco' Car Chassis», *Procedia Eng.*, vol. 41, pp. 1756-1760, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.379.
- [2] A. K. Ary, A. R. Prabowo, y F. Imaduddin, «Structural Assessment of an Energy-Efficient Urban Vehicle Chassis using Finite Element Analysis – A Case Study», *Procedia Struct. Integr.*, vol. 27, pp. 69-76, 2020, doi: 10.1016/j.prostr.2020.07.010.
- [3] B. Stalin, M. Ravichandran, C. Ramesh Kannan, y K. Sathiya Moorthi, «Design and Analysis of Stringer on the Chassis Frame in Load Carrying Vehicle», en *Advances in Manufacturing Technology*, S. S. Hiremath, N. S. Shanmugam, y B. R. R. Bapu, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 219-225. doi: 10.1007/978-981-13-6374-0_26.
- [4] K. Santa Rao, G. Musalaiah, y K. Mohana Krishna Chowdary, «Finite Element Analysis of a Four Wheeler Automobile Car Chassis», *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, n.º 2, feb. 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i2/83339.
- [5] M. S. bin Ab Razak, M. H. bin Hasim, y N. A. bin Ngatiman, «Design of Electric Vehicle Racing Car Chassis using Topology Optimization Method», *MATEC Web Conf.*, vol. 97, p. 01117, 2017, doi: 10.1051/mateconf/20179701117.

- [6] D. Rúa-Usme, A. Ospina, C. Ramírez, P. Ortiz, y J. A. Patiño-Murillo, «Escenario para el desarrollo de línea de productos financieros verdes en la economía colombiana», *Rev. CINTEX*, vol. 24, n.º 2, pp. 64-90, dic. 2019, doi: <https://doi.org/10.33131/24222208.352>
- [7] UNAL, «Reglamento II competencia nacional de vehículos de tracción eléctrica». Universidad Nacional de Colombia, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1enYzBYb6oM6ZTWQ1GaBtAdWQzOK7Dlyf/edit>
- [8] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, y J. E. Shigley, *Shigley's mechanical engineering design*, Eleventh edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2020.
- [9] R. A. Isaza Escobar, C. A. Paramo Velasquez, F. Oviedo Sierra, y H. F. Ripoll de la Barrera, «Una alternativa para la producción de superficies de doble curvatura en láminas de fibrocemento a través de mecanizado de tres ejes», *Rev. CINTEX*, vol. 24, n.º 1, pp. 51-63, dic. 2019, doi: <https://doi.org/10.33131/24222208.345>
- [10] BENTLEY, «Lot #646.2 2007 BENTLEY ZER-SILVER GRAVITY RACER», *Barrett-Jackson the World's Greatest Collector Car Auctions*, 2007. <https://www.barrett-jackson.com/Events/Event/Details/2007-BENTLEY-ZER-SILVER-GRAVITY-RACER-91094>
- [11] H. P. Zwijgers, «Motocicleta Triciclo», *Pinterest*, 2019. <https://www.pinterest.es/pin/404479610278430013/?mt=login>
- [12] Y. A. Lenis, J. R. Garzón, I. Portnoy, A. Verdeza, y C. E. Lins de Oliveira, «Modelamiento dinámico de un sistema de gasificación de lecho fijo estratificado», *Rev. CINTEX*, vol. 26, n.º 2, pp. 47-54, dic. 2021, doi: <https://doi.org/10.33131/24222208.380>
- [13] P. Ortiz-Grisales, J. Patiño-Murillo, y E. Duque-Grisales, «Comparative Study of Computational Models for Reducing Air Pollution through the Generation of Negative Ions», *Sustainability*, vol. 13, n.º 13, p. 7197, jun. 2021, doi: 10.3390/su13137197.
- [14] R. J. Atkin y N. Fox, *An introduction to the theory of elasticity*, Dover ed. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2005.
- [15] C. Tobón Cadavid, I. D. Patiño Arcila, y K. Lemmel Vélez, «Análisis por elementos finitos del desempeño estructural de jaula de seguridad para vehículo Renault Logan bajo normatividad FIA», *Rev. CINTEX*, vol. 23, n.º 2, pp. 35-53, dic. 2018, doi: <https://doi.org/10.33131/24222208.312>
- [16] ICONTEC, *NTC 4526:2021 Norma Técnica Colombiana para Tubería estructural de acero al carbono formada en frío, con y sin costura, redonda y de otras formas*. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-tuberia-estructural-de-acero-al-carbono-formada-en-frio-con-y-sin-costura-redonda-y-de-otras-formas-ntc4526-2021.html>
- [17] Y. González, B. Jiménez, S. Rojas, y S. Hernández, «Diseño de Remolque de Dos Pisos con Plataforma Móvil para el Transporte de Ganado Pequeño», *Ingenio Magno*, vol. 12, n.º 2, pp. 105-125, 2022.
- [18] ICONTEC, *NTC 1560:2019 Norma Técnica Colombiana para Tubos de acero al carbono laminados en caliente soldados por resistencia eléctrica para uso general*. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-tubos-de-acero-al-carbono-laminados-en-caliente-soldados-por-resistencia-electrica-para-uso-general-ntc1560-2019.html>
- [19] I. F. Acosta y D. D. Pareja, «CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO AL DESGASTE DE LOS SISTEMAS DE FRENOS DE DISCOS AUTOMOTRICES», Bachelor Thesis, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ufpso.edu.co/handle/123456789/2465>
- [20] D. Marin, «Evaluación técnica y económica del diseño de un prototipo de carro porta muestras para la Litoteca del Centro de Innovación y Tecnología - ICP Ecopetrol», Bachelor Thesis, Unidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/8027>
- [21] J. Happian-Smith, Ed., *An introduction to modern vehicle design*. Warrendale, PA : Oxford: SAE International ; Butterworth-Heinemann, 2002.