



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDISEÑO DE ESTRUCTURA LIGERA PARA
UN VEHÍCULO ELÉCTRICO DE REPARTO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

EDUARDO RODRÍGUEZ MOSQUEDA

TUTOR DE TESIS:

DR. FERNANDO VELÁZQUEZ VILLEGAS



MÉXICO, D.F.

FEBRERO 2013

AGRADECIMIENTOS

A mis padres René y Esperanza.

A mis hermanos René, Rafael y Gerardo.

Al Dr. Fernando Velázquez Villegas por todo su apoyo para la realización de este trabajo, además de su amistad.

Agradecimiento especial a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo a través del proyecto PAPIIT TA100112 “Diseño de estructuras ligeras para vehículos urbanos de bajo consumo energético aplicando métodos de optimización”

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	
1.1 Chasis	2
1.2 Estructuras automotrices	3
1.2.1 Chasis tipo escalera	3
1.2.2 Chasis backbone	3
1.2.3 Chasis marco espacial tubular	4
1.2.4 Chasis tipo monocasco	5
1.3 Seguridad en un vehículo	6
Capítulo 2. Metodología	8
2.1 Marco espacial en elemento finito	9
2.1.1 Ecuaciones de los elementos en el sistema de coordenadas locales	11
2.1.2 Transformación del sistema local a global	14
2.1.3 Solución por elemento	17
2.2 Tipos de análisis en el campo estructural	17
2.2.1 Análisis lineal	17
2.2.2 Análisis no lineal	18
2.3 Rigidez	18
2.4 Factor de seguridad	20
2.5 Descripción de los casos de carga	20
2.6 Casos de carga	22
2.7.1 Impacto en anclaje delantero	23
2.7.2 Impacto en anclaje trasero	23
2.7.3 Impacto por torsión delantera	24

2.7.4 Impacto por torsión trasera	24
2.7.5 Impacto frontal	24
2.7.6 Impactos traseros	25
2.7.4 Impactos laterales	26
2.4 Características del acero estructural	29
2.5 Diseño y optimización del VER	29
Capítulo 3. Resultados	31
3.1 Etapa 0	31
3.2 Etapa 1	31
3.3 Etapa 2	38
3.4 Etapa 3	39
3.4 Etapa 4	41
3.6 Etapa 5	45
Conclusiones	51
Bibliografía	52
Anexo	53

Introducción

En un esfuerzo por evitar el calentamiento global, los países de todo el mundo han establecido objetivos para reducir las emisiones de dióxido de carbono. La industria automotriz está contribuyendo a este esfuerzo. Un método para lograr la reducción de emisiones es mejorar la eficiencia de combustible durante la operación del vehículo, y una forma eficaz de hacer esto último es diseñar vehículos ligeros sin comprometer otros atributos como la seguridad, el costo, etc.

En esta tesis se desarrolló una estructura ligera de un Vehículo Eléctrico de Reparto (VER) con base en el diseño conceptual propuesto en la tesis “Diseño Conceptual de un Vehículo Eléctrico de Reparto, Modelado como un Monocasco” [1], en la cual el autor generó el concepto de solución del vehículo de reparto aplicando optimización topológica. Con la información de la optimización topológica se sabe cuál es la mejor distribución de material para soportar un conjunto de cargas dado; sin embargo, al ser una solución conceptual, las dimensiones reales y su adaptación a medidas comerciales son incógnitas. De lo anterior, se definió el objetivo de este trabajo como: **“Rediseñar la estructura de un Vehículo Eléctrico de Reparto Ligero, con base en una propuesta de diseño óptimo conceptual, seleccionando perfiles comerciales para cada elemento estructural de ésta”**

En el capítulo 1 se describe de manera básica qué es un chasis, los tipos de chasis y las pruebas de seguridad que se somete un vehículo.

El capítulo 2 contiene teoría y metodología. La parte teórica corresponde al análisis de marcos estructurales empleando el método de los elementos finitos, los tipos de análisis que existen en el campo estructural, la rigidez y el factor de seguridad. En la metodológica se describen los casos de carga que simulan impactos por choque.

En el capítulo 3 se expone el uso del software para el análisis por elementos finitos y se describen las distintas etapas que se llevaron a cabo.

Se finaliza este trabajo con un apartado para las conclusiones del mismo.

Capítulo 1. Antecedentes.

1.1 Chasis.

El chasis es el elemento estructural de un vehículo que está compuesto por varios sistemas, cada sistema contiene un número predefinido de elementos.

Los principales sistemas que componen a un chasis son:

*Un bastidor formado por largueros y travesaños, al que se fijan:

- El motor
- La transmisión
- La dirección
- Los frenos

* Los ejes delanteros y traseros, y las ruedas.

* La suspensión, que une las ruedas o ejes al bastidor.

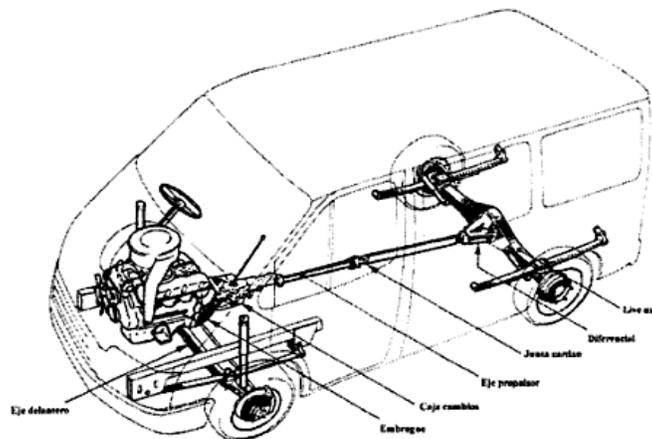


Figura 1.1 Esquema del chasis de un vehículo [2]

Sin embargo en este trabajo se refiere el término “chasis” solamente al bastidor.

Por lo que la definición de chasis en este trabajo es la siguiente. El chasis o bastidor de un vehículo es la estructura donde están fijados los componentes mecánicos, motor, suspensión, transmisión, carrocería, etc.

1.2 Estructuras automotrices.

A lo largo de la historia han aparecido distintas estructuras automotrices mejor conocidas como chasis. A continuación se mencionan algunas de ellas:

1.2.1 Chasis tipo escalera.

Este chasis es llamado así por su parecido a una escalera, este chasis es el más simple y el más antiguo de todos. Se trata de dos perfiles longitudinales laterales de grandes dimensiones que están conectados por varios perfiles llamados travesaños. En los perfiles laterales es donde habrá mayores esfuerzos.

Ventaja: Fácil y barato de manufacturar.

Desventaja: Poca rigidez a la torsión.

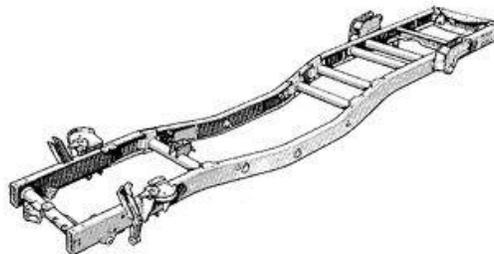


Figura 1.2. Chasis tipo escalera.

1.2.2 Chasis backbone.

La estructura del chasis backbone es muy simple, es un perfil tubular de grandes dimensiones (usualmente de sección rectangular) que conecta el eje delantero y trasero y proporciona casi toda la rigidez.

Ventajas: Fácil de hacer a mano por lo que tiene un bajo costo en la producción.

Desventajas: Este tipo de chasis no ofrece protección contra impactos laterales.



Figura 1.3. Chasis backbone.

1.2.3 Chasis marco espacial tubular.

Como el chasis tipo escalera no era lo suficientemente rígido, los ingenieros de carreras desarrollaron un modelo en 3 dimensiones. Uno de los primeros modelos fue la jaula de pájaro en el coche de carreras Maserati 61. Este chasis emplea varios de perfiles de sección circular (algunos pueden utilizar tubos de sección cuadrada para facilitar la conexión de las cubiertas de la carrocería aunque la sección circular proporciona mayor rigidez), la posición de los perfiles en diferentes direcciones da rigidez a las distintas cargas que pueda estar sometido. Estos perfiles están soldados entre sí y forman una estructura muy compleja.

Ventajas: Muy rígido en cualquier zona del chasis.

Desventajas: Muy complejo, costoso, mucho tiempo para la construcción, imposible para la producción automatizada.



Figura 1.4. Chasis marco espacial tubular.

1.2.4 Chasis tipo monocasco.

Hoy en día la mayor parte de los automóviles son hechos de acero con un chasis tipo monocasco, gracias a su bajo costo de producción y que es idóneo a su producción automatizada.

El chasis tipo monocasco es una estructura de una sola pieza que define la forma general del coche. Mientras que las estructuras tipo escalera, marco espacial tubular y backbone se caracterizan por tener los perfiles soldados entre sí y posteriormente anexar la carrocería, el chasis monocasco incorpora aparentemente a la carrocería en una sola pieza como se puede observar en la figura 1.5.



Figura 1.5. Chasis tipo monocasco.

El chasis tipo monocasco no es una sola pieza ya que varias piezas están soldadas. El piso que es la pieza más grande y otras piezas son manufacturadas por prensas mediante el proceso de estampado. Estas piezas están soldadas por puntos unidos por brazos de robot en una línea de producción. Todo el proceso solo lleva unos minutos. Después de eso, algunos accesorios como puertas, cofre y techo se agregan.

Ventajas: Buena protección contra choques.

Debido a que la estructura es un tipo de carcasa hay mucho espacio que lo hace atractivo para los automóviles de producción masiva.

Desventajas: Es muy pesado debido a la gran cantidad de metal utilizado.

La relación de la rigidez con el peso es baja.

Aunque el monocasco es adecuado para la producción automatizada, es casi imposible para la pequeña producción debido al costo de la herramienta. [3]

1.3 Seguridad en un vehículo.

La estructura de un vehículo es de gran importancia ya que dependiendo de la rigidez de la estructura ésta sufrirá deformaciones y desplazamientos, y dependiendo de esto los pasajeros podrán sufrir lesiones.

La seguridad en un automóvil se divide de dos formas, seguridad activa y seguridad pasiva. La pasiva busca minimizar el daño a los pasajeros y peatones una vez se ha producido un accidente, mientras que la activa intenta conseguir que el accidente no se produzca.

Para saber que tan seguro es un vehículo instituciones mundiales crean varios programas que evalúan la seguridad de los vehículos. Estos programas definen varios escenarios de choque para los vehículos que salen al mercado.

Algunos de las organizaciones que definen tales programas son: EURO-NCAP, US-NCAP, JNCAP entre otras. [4]

En Europa las pruebas de choque las lleva a cabo la EURO-NCAP (European New Car Assessment Programme) y en Estados Unidos las realizan tanto el organismo público NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*) como el IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) que es un organismo privado.

Los resultados de la seguridad pasiva de la EURO-NCAP se representan por medio de una clasificación en estrellas basada en el comportamiento del automóvil en pruebas de impacto frontal y lateral.

Algunas de las pruebas de choque de la EURO-NCAP se describen a continuación.

La prueba de impacto semifrontal (*off-set*) consiste en impactar el 40% del ancho de la parte más ancha del vehículo a 64 km/h (40 mph) contra una barrera deformable.

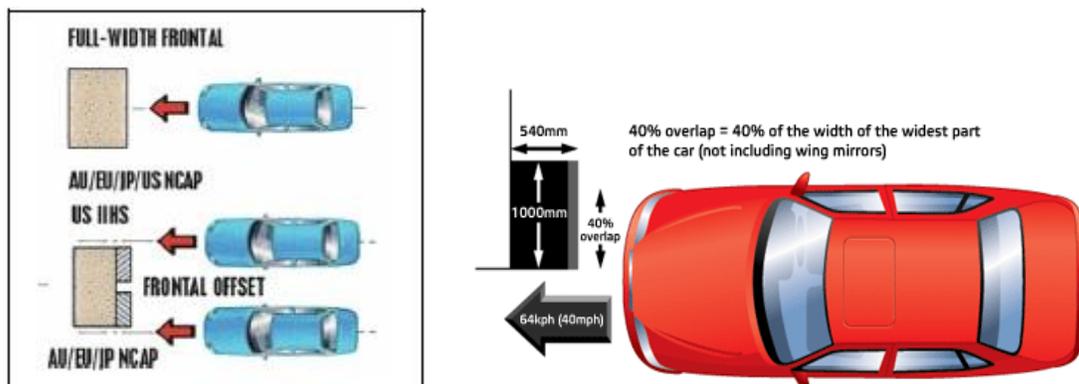


Fig.1.6 Impacto frontal.

La prueba de impacto lateral consiste en impactar el vehículo contra una barrera deformable móvil que impacta contra la puerta del conductor a 50 km/h (30 mph).

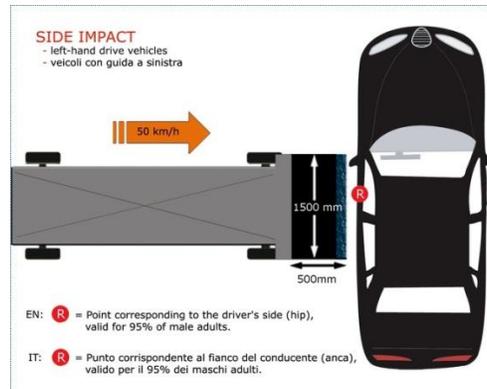


Fig.1.7 Impacto lateral.

Los patrones de accidentes varían en cada país, pero aproximadamente un cuarto de todas las lesiones graves y mortales se producen en colisiones de impacto lateral. Muchas de estas lesiones tienen lugar cuando un coche embiste lateralmente a otro o contra un objeto fijo de poco grosor, como un árbol o un poste. En el ensayo, el vehículo es impulsado a 29 km/h (18 mph) contra un poste rígido. El poste es relativamente estrecho, por lo que la penetración es mayor en la parte lateral del coche.

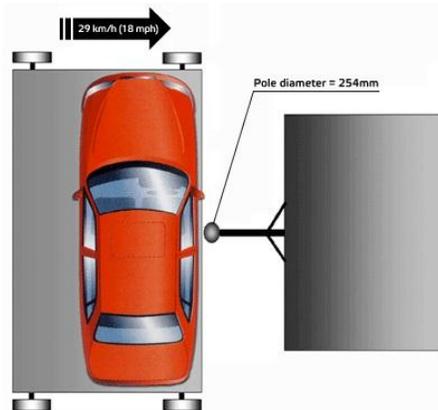


Fig. 1.8 Impacto lateral contra poste. [5]

Una vez descrito el tipo de estructura que será materia de este trabajo, en el siguiente capítulo se continúa con la revisión de los aspectos teóricos necesarios para su estudio y análisis.

Capítulo 2. Metodología.

Este capítulo contiene dos partes, una teórica y otra metodológica.

La teórica describe brevemente lo que es el elemento finito y el marco espacial en el elemento finito, las ecuaciones que se emplean para describir su comportamiento en el sistema local, la transformación del sistema local al sistema global y la solución por elemento. Posteriormente se describen los tipos de análisis, los tipos de rigidez y el factor de seguridad.

En la parte metodológica se explica la descripción de los casos de carga al que fue sometido el VER (Vehículo Eléctrico de Reparto), las condiciones de frontera, las propiedades del acero con que se modela el VER y el diagrama de flujo del diseño.

El método por elemento finito es un método computacional que permite modelar y estudiar como un objeto reacciona a problemas de Ingeniería en general.

El análisis de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y facilidad. Además es fácilmente adaptable a distintos problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos; análisis de esfuerzo en automóviles, aviones, barcos, edificios y estructuras de puentes en el campo de análisis estructural y otros campos de ingeniería.

El método de los elementos finitos predice el comportamiento de fenómenos físicos como por ejemplo:

El esfuerzo mecánico (análisis de esfuerzo).

Vibración mecánica.

Transferencia de calor (conducción, convección y radiación).

Flujo de fluidos (líquidos y gaseosos).

Otros.

La aplicación del método del elemento finito consta de 6 pasos. [6]

1. Desarrollo de ecuaciones del elemento.
2. Discretización del dominio de soluciones en una malla de elementos finitos.

3. Ensamble de las ecuaciones de los elementos.
4. Introducción de las condiciones de frontera.
5. Solución de los nodos desconocidos.
6. Cálculo computacional de la solución y de las cantidades relacionadas en cada elemento.

La clave del elemento finito es discretizar el dominio de la solución en un número finito de elementos llamados nodos. [6]

2.1 Marco espacial en elemento finito.

Los marcos se encuentran en un sistema coordenado local r-s-t, este sistema es ortogonal. El eje t es el eje longitudinal del marco. Los ejes s y r son conocidos como ejes de mínima y máxima inercia respectivamente.

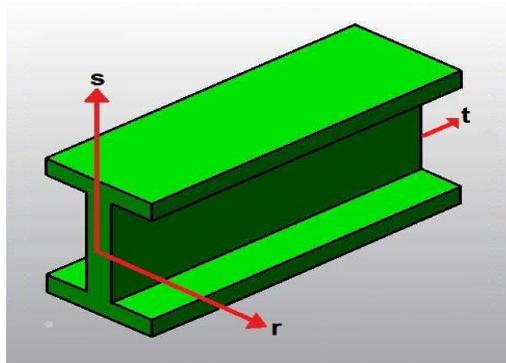


Fig. 2.1 Ejes locales r-s-t.

El marco podrá estar sometido a distintas cargas. Estas cargas podrán ser cargas puntuales o distribuidas y tendrán la dirección de los ejes anteriormente mencionados. Además de las cargas axiales (Ft_1, Ft_2, qt) y cortantes ($Fs_1, Fs_2, qs, Fr_1, Fr_2, qr$), el marco podrá sufrir momentos. En cada nodo habrá tres momentos cada uno con la dirección de cada eje.

Como consecuencia de las cargas y momentos que actúan en cada nodo, cada nodo tendrá desplazamientos axiales y flexiones en los planos r-t y s-t, y torsión en el plano r-s; si los desplazamientos y rotaciones generados sobre un marco son pequeños éstos permanecen independientes entre sí.

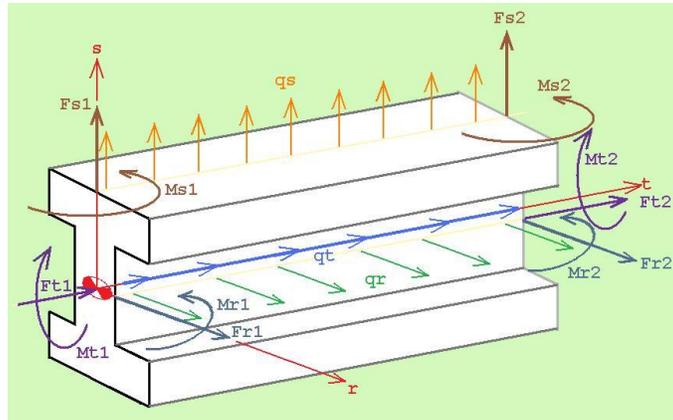


Fig. 2.2 Cargas y momentos. [7]

En el marco espacial, las coordenadas inicial y final que son los extremos del marco no son suficientes para establecer la orientación del marco es necesario de información adicional. Ésta información adicional es conocer ya sea la dirección del eje r (máxima inercia), o el eje s (mínima inercia).

El método con que se obtendrá tal información se llama “**Método de los tres puntos**”. Éste método se describe a continuación. [6]

Se establece un punto en el plano local r - t ; la longitud del marco ya está definida por el nodo inicial (nodo 1) y nodo final (nodo 2) que son los extremos del elemento marco. Usando estos tres puntos, los ejes locales se establecen de la siguiente forma:

- i) Primeramente se establece el eje local t para definirlo se crea un vector que tenga una dirección del nodo 1 al nodo 2.
- ii) Posteriormente se define el eje local s . La dirección del eje local s se define por la dirección del producto cruz de los vectores que forman los puntos 1-2 y 1-3.
- iii) Por último se define el eje local r . La dirección del eje local r se obtiene del resultado del producto cruz de dos vectores, un vector con la dirección del eje local s y el otro con la dirección del eje local t .

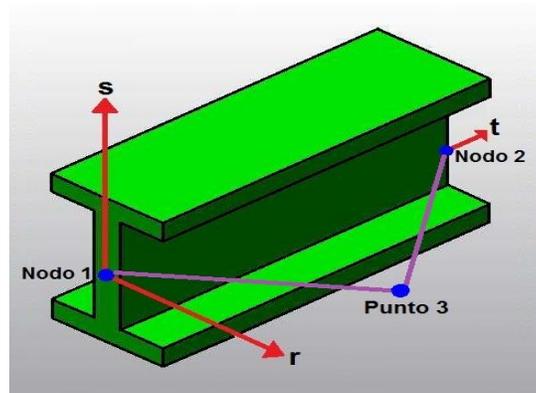


Fig. 2.3 Método de los tres puntos.

El tercer punto definido en el plano r-t es arbitrario ya que puede ser tanto en el plano r-t como en el plano s-t, es decir, no hay una convención establecida. De tal manera que cuando se use un programa es muy importante averiguar que convención se está usando de lo contrario los resultados podrían ser incorrectos.

La notación que se usa para describir las propiedades de la sección transversal y del material es la siguiente:

E Módulo de Young

G Módulo de corte

A Área de la sección transversal

J Constante de torsión

I_p Momento polar de inercia

I_s Momento de inercia (mínima) de la sección transversal en el eje s

I_r Momento de inercia (máxima) de la sección transversal en el eje r

2.1.1 Ecuaciones de los elementos en el sistema de coordenadas locales.

Como resultado de las fuerzas y momentos en el marco espacial, cada nodo tendrá 6 grados de libertad; tres de translación (desplazamiento) y tres de rotación, como se muestra en la figura 2.4.

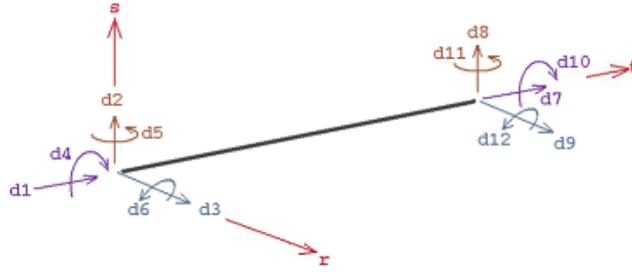


Fig. 2.4 Desplazamientos y rotaciones

Donde: d_1, d_2, d_3 Desplazamientos en el nodo 1
 d_4, d_5, d_6 Rotaciones en el nodo 1
 d_7, d_8, d_9 Desplazamientos en el nodo 2
 d_{10}, d_{11}, d_{12} Rotaciones en el nodo 2

Los desplazamientos y cargas aplicadas en el marco son positivos cuando éstas actúan en las direcciones positivas de los ejes. Los momentos y rotaciones siguen la regla de la mano derecha.

Los desplazamientos axiales están relacionados a los grados de libertad d_1 y d_7 de la siguiente forma:

$$u(t) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{t}{L} & \frac{t}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_7 \end{pmatrix}; \quad 0 \leq t \leq L \quad (2.1)$$

$$N_u^T = \begin{pmatrix} 1 - \frac{t}{L} & \frac{t}{L} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

donde L es la longitud del marco.

Las cargas aplicadas en el plano local s-t causan desplazamientos $v(t)$ en la dirección local s y rotaciones $\theta = \frac{dv}{dt}$ alrededor del eje r. Para la flexión el desplazamiento está relacionado con los grados de libertad d_2, d_6, d_8 y d_{12} con la siguiente ecuación:

$$v(t) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{3t^2}{L^2} + \frac{2t^3}{L^3} & t - \frac{2t^2}{L} + \frac{t^3}{L^2} & \frac{3t^2}{L^2} - \frac{2t^3}{L^3} & -\frac{t^2}{L} + \frac{t^3}{L^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_2 \\ d_6 \\ d_8 \\ d_{12} \end{pmatrix}; \quad 0 \leq t \leq L \quad (2.3)$$

$$N_v^T = \begin{pmatrix} 1 - \frac{3t^2}{L^2} + \frac{2t^3}{L^3} & t - \frac{2t^2}{L} + \frac{t^3}{L^2} & \frac{3t^2}{L^2} - \frac{2t^3}{L^3} & -\frac{t^2}{L} + \frac{t^3}{L^2} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Esta carga causa momentos flectores alrededor del eje r y fuerzas cortantes normal en la dirección del eje t:

$$M_r(t) = EI_r \left(\frac{d^2v}{dt^2} \right) \quad (2.5)$$

$$V_t(t) = \frac{dM_r}{dt} = E_r \left(\frac{d^3 v}{dt^3} \right) \quad (2.6)$$

Para la carga aplicada en el plano local r-t, el desplazamiento w(t) es en la dirección local r y sus rotaciones φ son alrededor del eje s.

$$\varphi(t) = -\frac{\partial w}{\partial t} \quad (2.7)$$

El desplazamiento w(t) está relacionado con los grados de libertad d_3, d_5, d_9 y d_{11} con la siguiente ecuación:

$$w(t) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{3t^2}{L^2} + \frac{2t^3}{L^3} & -\left(t - \frac{2t^2}{L} + \frac{t^3}{L^2}\right) & \frac{3t^2}{L^2} - \frac{2t^3}{L^3} & -\left(-\frac{t^2}{L} + \frac{t^3}{L^2}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_3 \\ d_5 \\ d_9 \\ d_{11} \end{pmatrix}; \quad 0 \leq t \leq L \quad (2.8)$$

$$N_w^T = \begin{pmatrix} 1 - \frac{3t^2}{L^2} + \frac{2t^3}{L^3} & -\left(t - \frac{2t^2}{L} + \frac{t^3}{L^2}\right) & \frac{3t^2}{L^2} - \frac{2t^3}{L^3} & -\left(-\frac{t^2}{L} + \frac{t^3}{L^2}\right) \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Ésta carga causa un momento flector alrededor del eje s y una fuerza cortante normal en la dirección r:

$$M_s(t) = -EI_s \left(\frac{d^2 w}{dt^2} \right) \quad (2.10)$$

$$V_t(t) = -\frac{dM_s}{dt} = EI_s \left(\frac{d^3 w}{dt^3} \right) \quad (2.11)$$

Los elementos en un marco espacial generalmente son sujetos a momentos de torsión. Considerando que los momentos de torsión actúan en los extremos del marco, la torsión se describe con la siguiente ecuación:

$$GJ \frac{d^2 \Psi}{dt^2} = 0 \quad (2.12)$$

Donde $\psi(t)$ es la rotación de la sección alrededor del eje t, G es el módulo cortante, y J es la constante torsional.

Una solución en términos de los grados de libertad d_4 y d_{10} se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\Psi(t) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{t}{L} & \frac{t}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_4 \\ d_{10} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Por otra parte, el momento de torsión por unidad de longitud está relacionado con el ángulo de torsión, la siguiente ecuación describe esto:

$$M_t(t) = GJ \frac{d\Psi}{dt} \quad (2.14)$$

Con el método de Galerkin se obtiene la matriz de rigidez local a partir de los resultados obtenidos de las fuerzas y momentos. Por lo que la matriz de rigidez es:

$$k_l = \begin{pmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_r}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_r}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_r}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_r}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_r}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_s}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_s}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_s}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_s}{L^2} & 0 & \frac{4EI_s}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_s}{L^2} & 0 & \frac{2EI_s}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_r}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_r}{L} & 0 & -\frac{6EI_r}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_r}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_r}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_r}{L^2} & 0 & \frac{12EI_r}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_r}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_s}{L^3} & 0 & \frac{6EI_s}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_s}{L^3} & 0 & \frac{6EI_s}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_s}{L^2} & 0 & \frac{2EI_s}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_s}{L^2} & 0 & \frac{4EI_s}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_r}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_r}{L} & 0 & -\frac{6EI_r}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_r}{L} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

2.1.2 Transformación del sistema local al global.

La matriz desarrollada queda referenciada en un sistema de coordenadas local, es decir, uno que coincide con la orientación del elemento. Puesto que los elementos de las estructuras frecuentemente están orientadas en varias direcciones, las matrices de rigidez de los elementos

tienen que estar referenciadas en un sistema común, éste es conocido como el sistema de coordenadas global.

En el sistema de coordenadas global x, y, z , los desplazamientos y rotaciones se representan como:

u_1, v_1, w_1	desplazamientos x, y, z en nodo 1
$\theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}$	rotaciones alrededor de los ejes x, y, z en nodo 1
u_2, v_2, w_2	desplazamientos x, y, z en nodo 2
$\theta_{x2}, \theta_{y2}, \theta_{z2}$	rotaciones alrededor de los ejes x, y, z en nodo 2

Las fuerzas y momentos en el sistema de coordenadas globales x, y, z se representa de la siguiente manera:

F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}	Fuerzas aplicadas con las direcciones x, y, z en nodo 1
M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}	Momentos aplicados alrededor de los ejes x, y, z en nodo 1
F_{x2}, F_{y2}, F_{z2}	Fuerzas aplicadas con las direcciones x, y, z en nodo 2
M_{x2}, M_{y2}, M_{z2}	Momentos aplicados alrededor de los ejes x, y, z en nodo 2

La transformación de la matriz local a la global se desarrolla considerando tres componentes de desplazamiento y de rotación en cada nodo como cantidades vectoriales. Por lo que matriz de transformación completa es una matriz 12x12 que consiste en cuatro matrices de rotación de 3x3 como se muestra a continuación:

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{H} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{H} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ \theta_{z2} \end{pmatrix} \Rightarrow d_l = Td \quad (2.16)$$

$$d = T^T d_l \quad (2.17)$$

donde \mathbf{H} es una matriz de rotación 3x3, el 0 es una matriz 3x3. La matriz \mathbf{H} transforma una cantidad vectorial del sistema de coordenadas local al sistema de coordenadas global.

Las componentes de un vector en las coordenadas locales x, y, z son simplemente la suma de las proyecciones de las componentes en coordenadas globales r, s, t . En forma matricial la transformación puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} t \\ s \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_t & m_t & n_t \\ l_s & m_s & n_s \\ l_r & m_r & n_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} l_t & m_t & n_t \\ l_s & m_s & n_s \\ l_r & m_r & n_r \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Donde l_t es el coseno del ángulo entre los ejes t y x (coseno director). Los otros términos tienen un significado similar. Por lo tanto los cosenos directores se necesitan para establecer la matriz \mathbf{H} para cada elemento en el marco.

Usando la transformación matricial, las ecuaciones de los elementos en el sistema de coordenadas local pueden estar relacionadas al sistema de coordenadas global como se muestra a continuación:

$$k_l d_l = r_l \implies k_l T d = r_l \quad (2.20)$$

Multiplicando ambos lados por T^T , obtenemos

$$T^T k_l T d = T^T r_l \quad (2.21)$$

Teniendo en cuenta que $T^T r_l$ es la transformación de cargas aplicadas del sistema de coordenadas local al global tenemos las ecuaciones de los elementos en términos de los grados de libertad globales y cargas aplicadas en los nodos en dirección de las coordenadas globales:

$$k d = r \quad (2.22)$$

donde

$$k = T^T k_l T \quad \text{y} \quad r = T^T r_l \quad (2.23)$$

Ya con la transformación de un sistema a otro lo que resta es obtener la solución por elemento del nuevo sistema de coordenadas.

2.1.3 Solución por elemento.

Para el cálculo de las soluciones por elemento se transforman los resultados del sistema global al sistema local multiplicándolos por la matriz T como se indica en la ecuación 2.16. Los desplazamientos se obtienen de los resultados en el sistema local y las funciones de interpolación.

El desplazamiento axial se calcula de la misma manera que se calculó en la ecuación 2.1, el desplazamiento en la dirección local s y en la dirección local r se calculan de la siguiente manera:

$$v(t) = (N_v^T) \begin{pmatrix} d_2 \\ d_6 \\ d_8 \\ d_{12} \end{pmatrix} + \frac{q_s(L-t)^2 t^2}{24EI_r}; \quad 0 \leq t \leq L \quad (2.24)$$

$$w(t) = (N_w^T) \begin{pmatrix} 3 \\ d_5 \\ d_9 \\ d_{11} \end{pmatrix} + \frac{q_r(L-t)^2 t^2}{24EI_s}; \quad 0 \leq t \leq L \quad (2.25)$$

2.2 Tipos de análisis en el campo estructural.

Los análisis del elemento finito en el campo de mecánica de sólidos o en la mecánica estructural se dividen en dos categorías que son: análisis lineal y análisis no lineal.

2.2.1 Análisis lineal.

En un análisis lineal estructural está basado en suposiciones estáticas y de linealidad por lo que solo es válido siempre y cuando dichas suposiciones sean válidas. Cuando una de estas suposiciones no cumple, el análisis produce resultados incorrectos y se debe utilizar el análisis no lineal para modelar las no linealidades.

En un análisis lineal estructural las cargas se aplican lenta y gradualmente hasta que alcanzan sus magnitudes completas y permanecen constantes (sin variación en el tiempo).

Para que un análisis lineal estructural sea válido tiene que cumplir con lo siguiente:

- EL o los materiales empleados en el modelo deben cumplir con la ley de elasticidad de Hooke, esta ley establece que la deformación es directamente proporcional al esfuerzo. Los materiales lineales pueden ser isotrópicos, ortotrópicos o anisotrópicos.

- Los desplazamientos de la estructura resultado del análisis de esfuerzos que sufre el modelo deben ser muy pequeños.
- Las condiciones de frontera no varían durante la aplicación de cargas. Las cargas deben ser constantes en magnitud, dirección y distribución. No deben cambiar mientras se deforma el modelo. [8]

2.2.2 Análisis no lineal.

En la industria, el análisis no lineal dinámico ofrece un sentido más realista a comparación del análisis lineal estático.

El análisis no lineal dinámico requiere de computadoras con mayor memoria y velocidad, es decir más potentes, además de que tanto el tiempo de cálculo y la complejidad de hacer el modelo son considerablemente mayores que los requeridos para los análisis lineales. Los modelos no lineales son capaces de simular un mayor número de características como son las regiones de contacto, comportamiento de las regiones elástica y plástica del material, piezas de plástico y de goma, esfuerzos residuales, análisis dinámicos donde las cargas varían con el tiempo donde el tiempo utilizado es el real, y grandes deformaciones. Los análisis no lineales proporcionan evaluaciones más detalladas de los problemas que los análisis lineales.

Algunos ejemplos de análisis no lineales son: análisis de impactos a vehículos (crashworthiness), diseño de procesos de conformado de piezas (forja, estampado, extrusión, laminación), análisis de contacto, análisis de esfuerzos con grandes deformaciones etc.

Como resultado de los análisis no lineales dinámicos, los ingenieros pueden determinar las características óptimas e ideales de desempeño del diseño del vehículo sin la necesidad de tomar riesgos físicos. Otro aspecto importante del análisis lineal no dinámico es que se han disminuido o se pueden evitar las costosas pruebas destructivas que se hacen para saber como se desempeñan los diseños.[9]

2.3 Rigidez.

La rigidez es la propiedad de un elemento estructural de soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos. Hay distintos tipos de rigidez como la rigidez axial, rigidez a flexión, rigidez torsional, etc.

La rigidez de un sólido depende del tipo de material y la geometría. En el caso de elementos estructurales tipo marco, las propiedades mecánicas de interés de los materiales son: módulo de Young (E) para los fenómenos de deformación axial y flexión; y el módulo cortante (G) en el caso de la torsión.

La rigidez axial es la capacidad del material de resistir alargamientos o acortamientos de esfuerzos a tensión o compresión, respectivamente. La rigidez axial se calcula con la siguiente ecuación:

$$K_{axial} = E A$$

Donde: E = Módulo de Young

A = Área de la sección transversal

La rigidez a flexión es la resistencia que brinda un cuerpo a ser flexionado y está caracterizada por la siguiente ecuación:

$$K_{flexión} = E I$$

Donde: E = Módulo de Young

I = Momento de inercia de la sección transversal.

Como se señaló anteriormente, son 2 los momentos de inercia de importancia: el máximo y el mínimo. Es por ello que un elemento marco tiene 2 valores de rigidez a la flexión, uno máximo y otro mínimo.

Se le llama rigidez torsional a la resistencia que opone un cuerpo a ser torcido. Ésta se calcula como:

$$K_{torsión} = G J$$

Donde: G = Módulo cortante

J = constante de torsión de la sección transversal del elemento marco. Para el caso de perfiles circulares esta constante es igual al momento polar de inercia. [10]

2.4 Factor de seguridad.

Para evitar una falla estructural, las cargas aplicadas a una estructura que es capaz de soportar deben ser mayores que las cargas a las que se va someter cuando este en operación por lo que se debe de añadir un factor de seguridad para que no falle.

El factor de seguridad se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{carga última}}{\text{carga permisible}} = \frac{\sigma_u}{\sigma_{permisible}}$$

Donde σ_u = esfuerzo de fluencia

$\sigma_{permisible}$ = esfuerzo máximo a la que opera el diseño [11]

2.5 Descripción de los casos de carga.

El objetivo de esta tesis es “Rediseñar la estructura de un Vehículo Eléctrico de Reparto Ligero, con base en una propuesta de diseño óptimo conceptual, seleccionando perfiles comerciales para cada elemento estructural de ésta”

“Rediseñar la estructura de un Vehículo Eléctrico de Reparto Ligero, con base en una propuesta de diseño óptimo conceptual, seleccionando perfiles comerciales para cada elemento estructural de ésta”

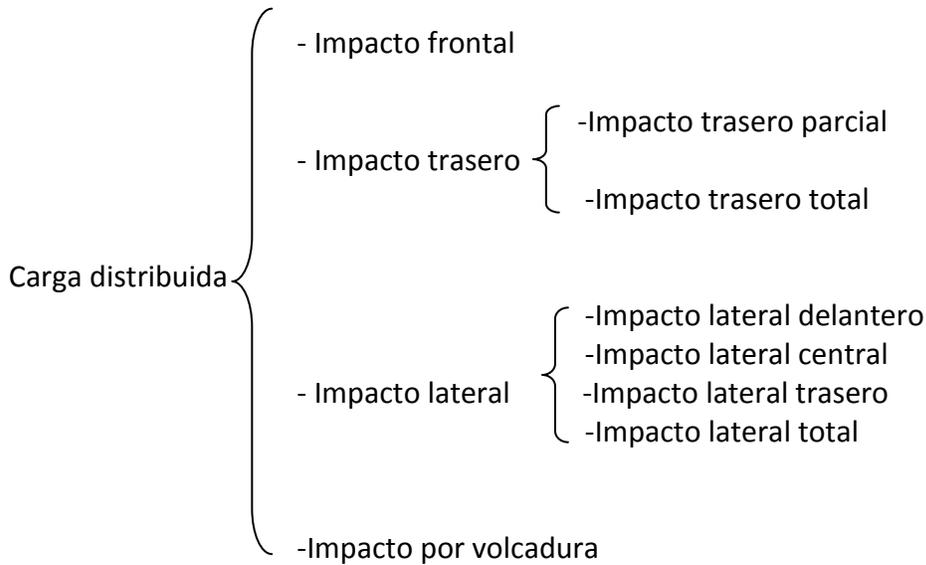
El VER fue sometido a varios análisis de esfuerzo los cuales fueron resumidos en 5 etapas.

Cada una de las 5 etapas tienen 12 distintos casos de carga: impacto en anclaje delantero, impacto en anclaje trasero, impacto por torsión delantera, impacto por torsión trasera, impacto frontal, impacto trasero, impacto trasero parcial, impacto lateral, impacto lateral delantero, impacto lateral central, impacto lateral trasero, e impacto por volcadura. Cada uno de estos casos se describe detalladamente más adelante.

De los impactos unos serán cargas distribuidas y otras cargas puntuales.

La clasificación de los impactos para las cargas puntual y distribuida queda de la siguiente manera:

Carga puntual $\left\{ \begin{array}{l} - \text{Impacto en anclaje delantero} \\ - \text{Impacto en anclaje trasero} \\ - \text{Impacto por torsión delantera} \\ - \text{Impacto por torsión trasera} \end{array} \right.$



En el trabajo de Camacho [1] se simuló el comportamiento del VER empleando diferentes casos de carga. En este trabajo se usaron las relaciones de carga empleadas por Camacho tomando como referencia la máxima de ellas, es decir la de impacto por volcadura. A continuación se muestra la tabla con las relaciones de magnitud.

Caso de Carga	Magnitud [N]	Relación
Impacto Frontal	514516	0.97714
Impacto Trasero	411780	0.78203
Impacto Lateral Derecho/Izquierdo	482885	0.91707
Impacto por Volcadura	526553	1

Tabla 2.1. Cálculo de cargas.

Las magnitudes de los impactos están relacionadas con el factor de carga por lo que primero definiremos lo que es un factor de carga.

Un factor de carga se puede definir simplemente como un factor de seguridad que incrementa el valor de la carga para cubrir cualquier posible error de análisis, construcción o de materiales.

En este trabajo para asegurar la rigidez de la estructura y dado que se suponen casos de carga por impacto, se emplea un factor de carga de 5. Otra de las razones para usar un valor tan elevado es que al simular la estructura como un marco tridimensional, aunque el tiempo de análisis es reducido, se tiene incertidumbre en el cálculo de los esfuerzos en las uniones de los elementos. Emplear el valor de 5 asegura que esta situación sea superada.

Para calcular la magnitud de cada carga puntual se utiliza la siguiente ecuación:

$$F_{VER} = F_{carga} + F_{baterías} + F_{motor} + F_{estructura} \quad (2.26)$$

$$F_{VER} = m_{carga} * g + m_{baterías} * g + m_{motor} * g + \rho_{acero} * g * \sum longitud_{perfil} * \sum área_{perfil} \quad (2.27)$$

Todos los valores se mantendrán constantes excepto el de la estructura que variará en cada etapa.

Para el peso de la carga, el peso es de 1000 kg (9810 N) que es la capacidad máxima de carga que el VER puede transportar; el VER tendrá 18 baterías cada una con un peso de 30 kg por lo que el total de peso de baterías es de 540 kg (5297.4 N); el peso del motor es de 150 kg (1471.5 N); el peso de la estructura variara en cada etapa.

Por lo que el peso del VER es la magnitud de las cargas puntuales, en cada etapa la magnitud de la carga puntual es:

$$F_{VER} = 9810 [N] + 5297.4 [N] + 1471.5 [N] + F_{estructura \ etapa} \quad (2.28)$$

La ecuación para la magnitud de las cargas distribuidas es:

$$F = \frac{F_{VER} * \text{factor de carga} * \text{relación de carga}}{\text{longitud}} \quad (2.29)$$

En este trabajo se estableció que los perfiles deben tener un factor de seguridad entre 1.3 – 1.5 o cercanos a estos.

2.6 Casos de carga.

Como ya se mencionó anteriormente son 12 casos de carga. La simbología para las restricciones y cargas es la siguiente:

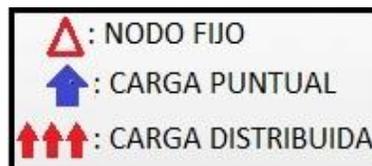


Fig. 2.9 Simbología.

2.6.1 Impacto en anclaje delantero.

El impacto en el anclaje delantero corresponde cuando el VER pase por un bache o por alguna imperfección del suelo. En este caso no habrá factor de carga, la carga será el peso del VER. La restricción de movimiento son los nodos que se encuentran en el anclaje trasero y la carga serán dos cargas puntuales sobre los nodos del anclaje delantero como se muestra en la fig. 2.10, cada carga puntual tendrá la magnitud del peso del VER en la dirección +z.

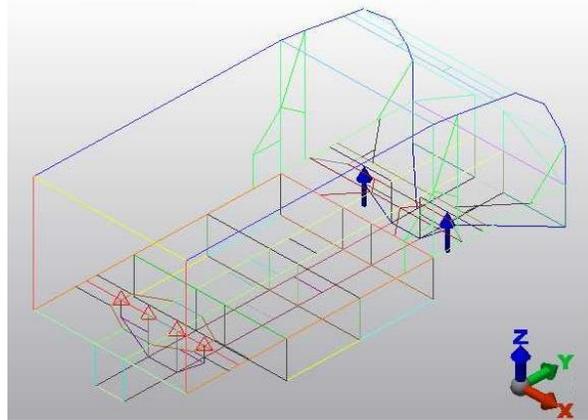


Fig. 2.10 Condiciones impacto en anclaje delantero.

2.6.2 Impacto en anclaje trasero.

El impacto en el anclaje trasero al igual que en el caso por impacto en anclaje trasero corresponde cuando el VER pasa por un bache o imperfección del suelo. Son las mismas condiciones que en el impacto en anclaje trasero, la diferencia es que las restricciones de movimiento son los nodos del anclaje delantero y los nodos donde se aplicara la carga son los nodos donde se encuentra el anclaje trasero.

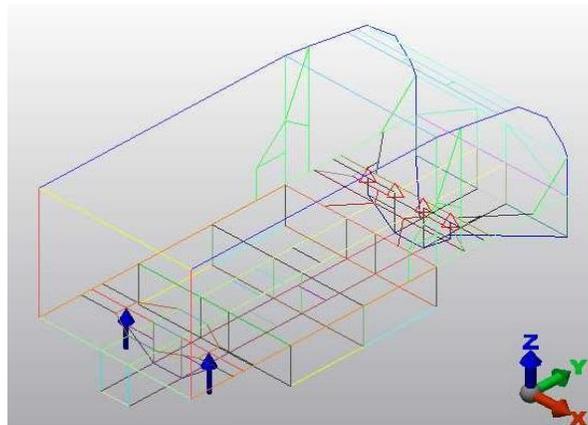


Fig. 2.11 Condiciones impacto en anclaje trasero.

2.6.3 Impacto por torsión delantera.

Igualmente que en los impactos en los anclajes, los impactos por torsión no tendrán factor de carga y la magnitud de la carga es el peso del VER. Las restricciones de movimiento son los nodos del anclaje delantero. Una carga tendrá una dirección $+z$ y la otra $-z$.

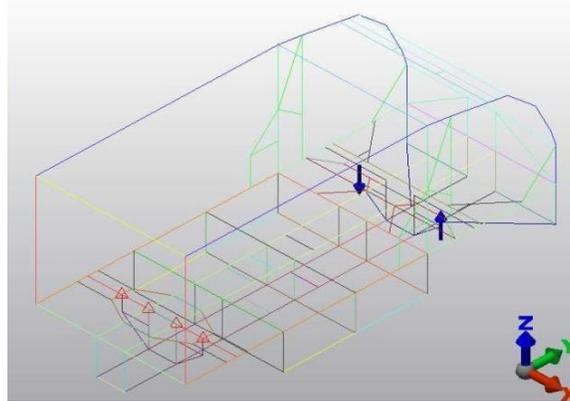


Fig. 2.12 Condiciones impacto por torsión delantera.

2.6.4 Impacto por torsión trasera.

El impacto por torsión trasera tendrá restringidos los nodos del anclaje delantero, la magnitud de sus cargas puntuales tendrán diferente dirección una $+z$ y la otra $-z$.

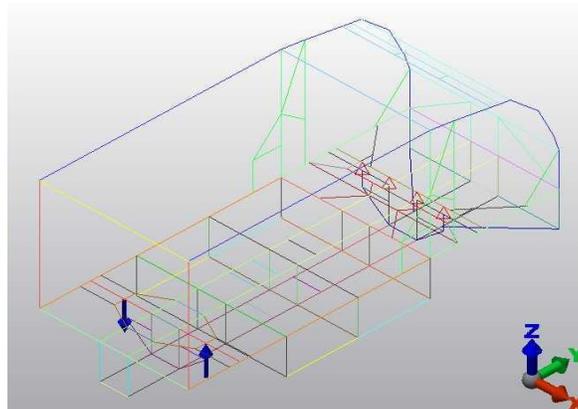


Fig. 2.11 Condiciones impacto por torsión trasera.

2.6.5. Impacto frontal.

La carga por impacto frontal corresponde a una carga distribuida sobre la parte frontal de la estructura, la restricción del movimiento corresponde a los nodos que se encuentran en la parte de la sección trasera sin incluir a los nodos de la sección trasera inferior del VER.

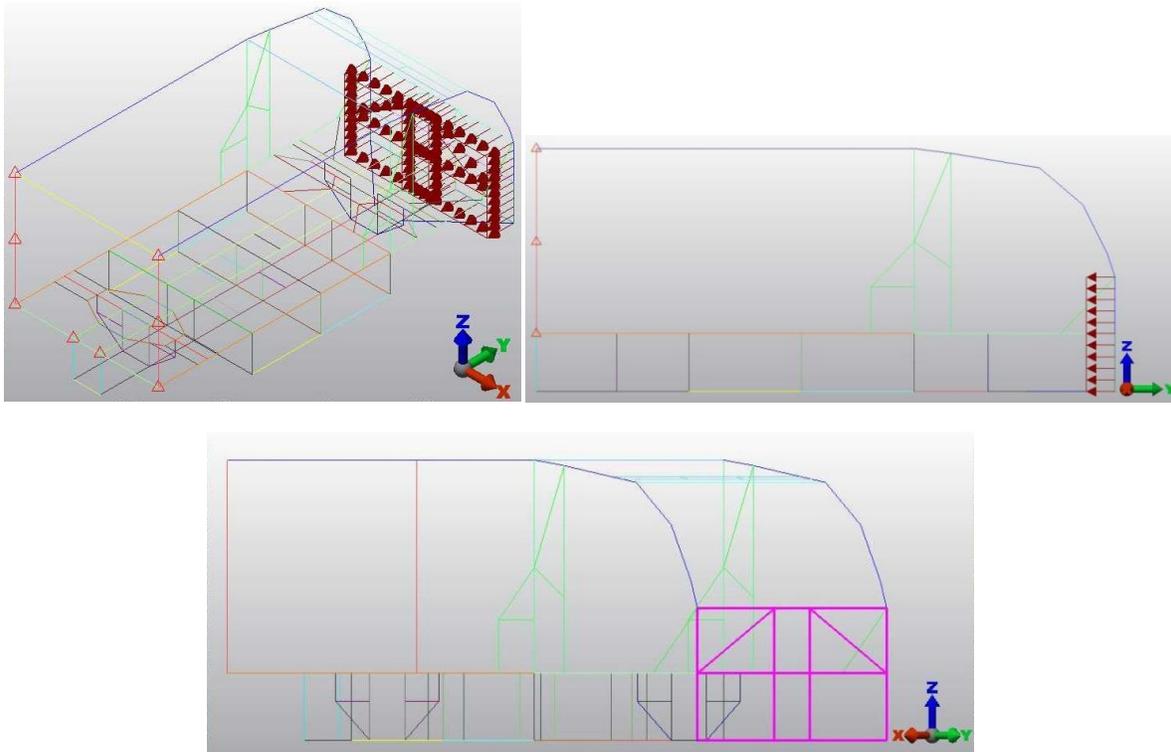
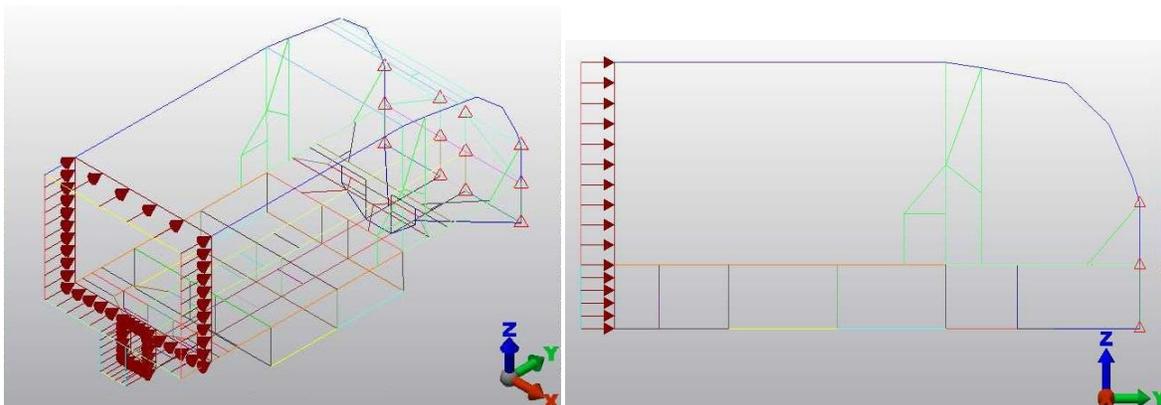


Fig. 2.12 Condiciones impacto frontal.

2.6.6 Impacto traseros.

Se hicieron dos impactos traseros los cuales son: impacto trasero total e impacto trasero parcial.

El impacto trasero total corresponde a la carga distribuida sobre toda la parte trasera del vehículo y su restricción de movimiento son los nodos que están en toda la sección frontal del VER.



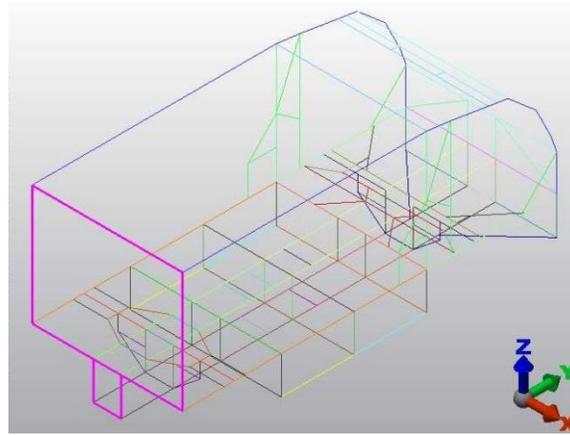


Fig. 2.13 Condiciones impacto trasero.

El impacto trasero parcial corresponde a la carga distribuida sobre la parte inferior trasera del vehículo y su restricción de movimiento es toda la sección frontal del VER.

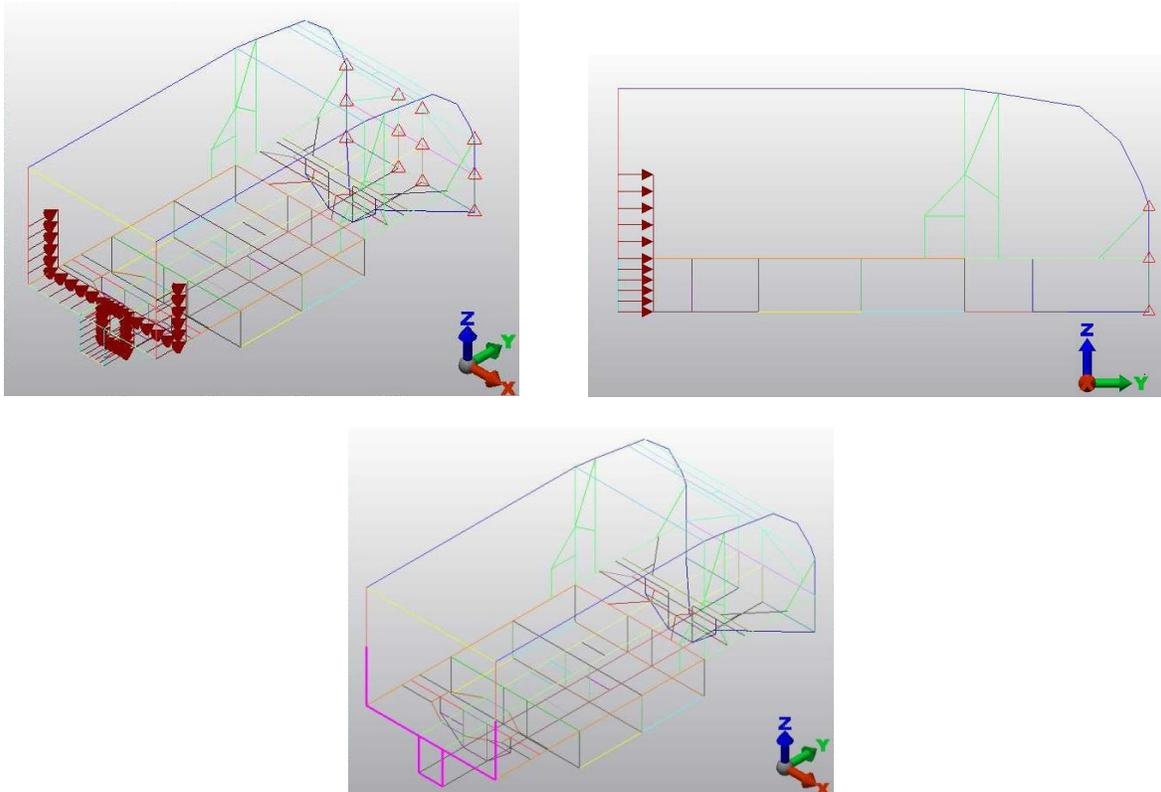


Fig. 2.14 Condiciones impacto trasero parcial

2.6.7 Impactos laterales.

Debido a que la sección lateral tiene una longitud de 3.6 [m] se hicieron tres casos de impacto laterales además del de impacto lateral total. Estos impactos son: carga lateral trasera, carga lateral central y carga lateral delantera. Lo que se simuló en este trabajo son diferentes situaciones

de impacto. Un vehículo que impactara lateralmente al VER difícilmente lo haría sobre toda su longitud, debido a que las dimensiones del vehículo que impacta no rebasarían las del VER, a menos que se tratara de un camión o vehículo grande. Ésta última situación se simula con el impacto lateral total.

Para todos los tipos de carga laterales el impacto lateral no importa si es izquierdo o derecho ya que el VER es simétrico con respecto al eje transversal.

Para todos los casos de carga laterales su restricción de movimiento son todos los nodos laterales del VER opuestos a los nodos laterales donde se está aplicando la carga lateral.

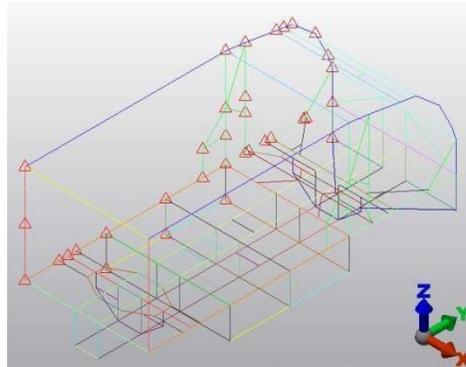


Fig. 2.15 Restricciones impactos laterales.

El impacto lateral trasero es la que se encuentra en la parte lateral de atrás del vehículo donde se encuentra la zona de carga. La longitud donde ocurre el impacto es de 0.95 [m].

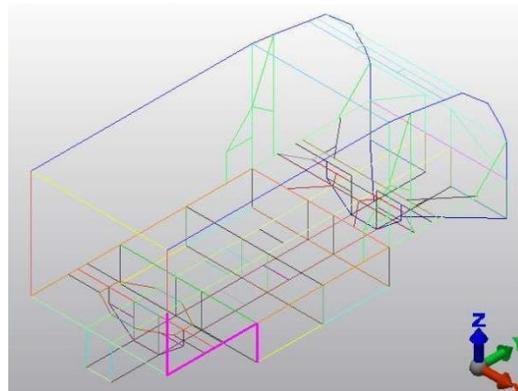


Fig. 2.16 Zona impacto lateral trasero.

El impacto lateral central es la carga distribuida sobre la parte lateral del VER que se encuentra sobre la parte de en medio del VER que es parte de la zona de carga, la zona de impacto está en la sección de 0.95 [m] a 2.35 [m] del vehículo.

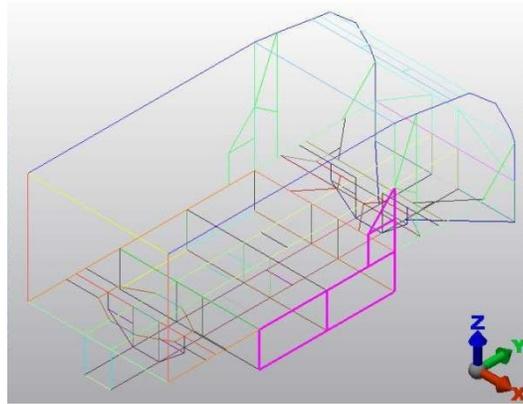


Fig. 2.17 Zona impacto lateral central.

El impacto lateral delantero es la carga distribuida que se encuentra en la zona de los pasajeros y el motor, está en la sección de 2.35 [m] a 3.6 [m].

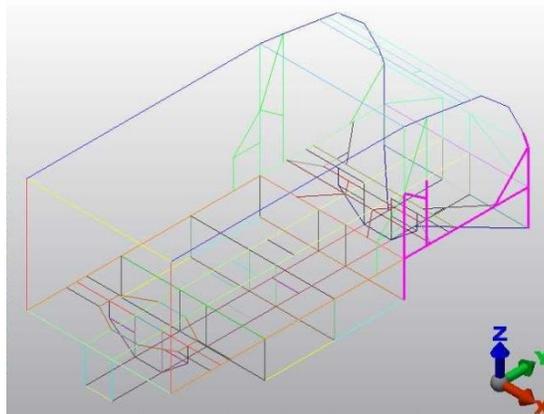


Fig. 2.18 Zona impacto lateral delantero.

El impacto lateral total es la carga distribuida que está sobre todos los perfiles laterales del VER, es decir, sobre lo largo del VER, 3.6 [m].

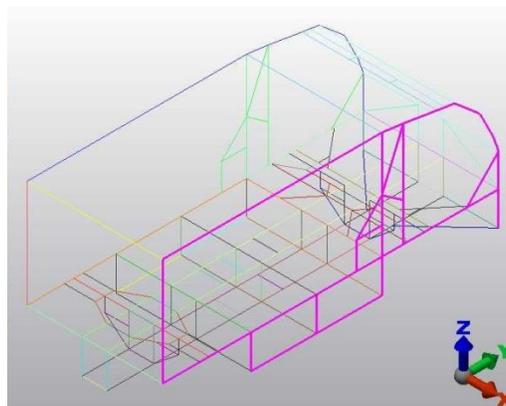


Fig. 2.19 Zona impacto lateral total.

2.7 Características del acero estructural.

El acero estructural es el material más usado para la construcción de estructuras a nivel mundial. Es una aleación de hierro (mínimo 98%), con contenidos de carbono menores del 1% y otras pequeñas cantidades de minerales como manganeso, para mejorar su resistencia, y fósforo, azufre, sílice y vanadio para mejorar su soldabilidad y resistencia a la intemperie. Entre sus ventajas está la gran resistencia a la tensión y compresión y tiene un costo razonable.

El material que se uso para el modelo VER es un acero estructural ASTM 36, donde el número 36 significa que tiene un límite de fluencia de 36,000 [psi] que equivaldría a 248.211 [MPa]

Las propiedades del acero A36 son:

Propiedades	Magnitud
Densidad [kg/m^3]	7854.8679
Módulo elástico [GPa]	199.947
Límite elástico [MPa]	248.211

Tabla 2.2. Propiedades del acero A36.

2.8 Diseño y optimización del VER.

EL siguiente diagrama de flujo ilustra el proceso que se siguió para el diseño y optimización estructural para el VER.

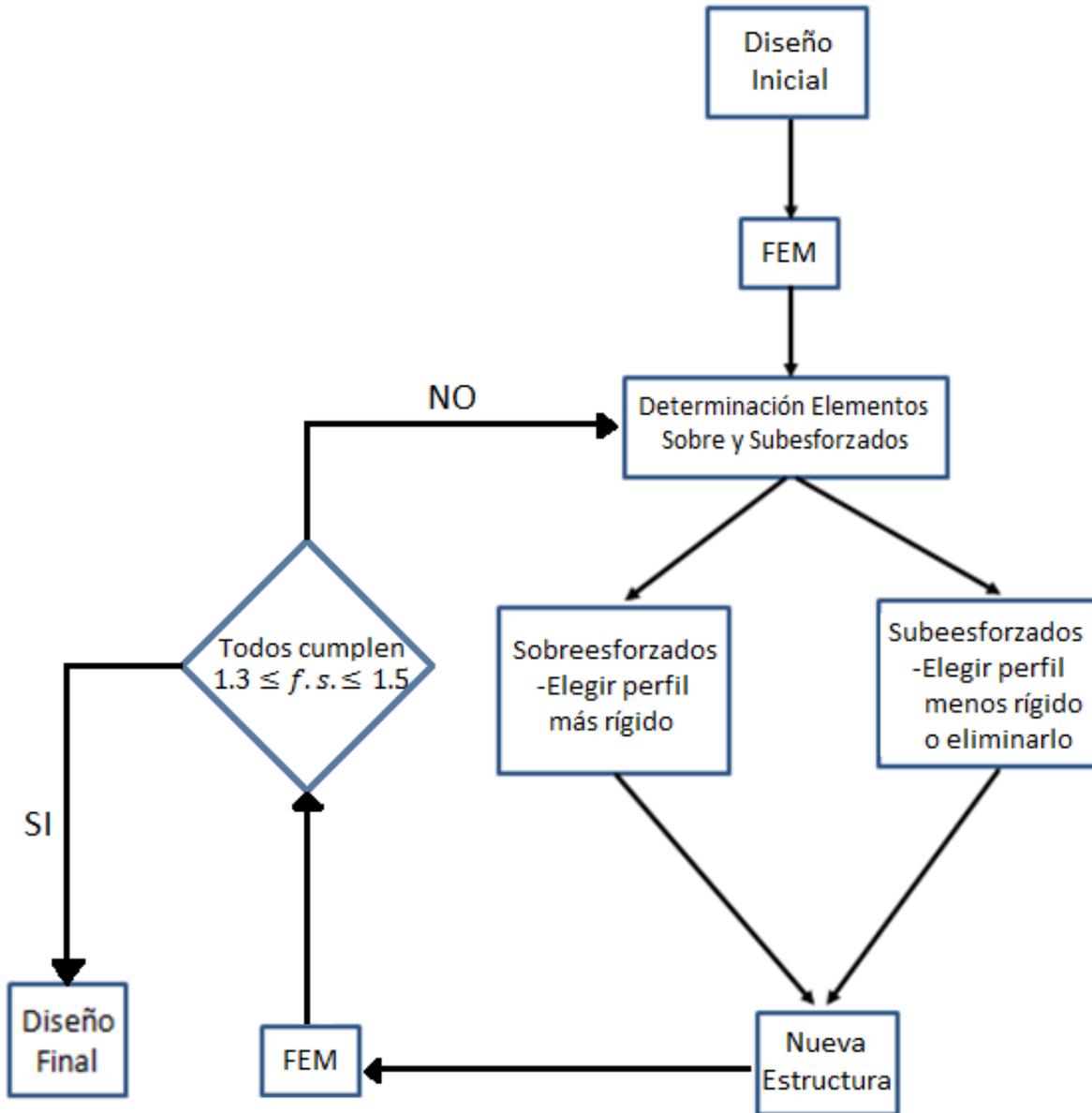


Fig. 2.20 Diagrama de flujo. Diseño

En el siguiente capítulo se aplica el método aquí descrito para determinar la estructura ligera del Vehículo Eléctrico de Reparto.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Etapa 0.

La etapa 0 consiste en modelar la estructura VER hecha en Siemens Unigraphics NX (figura 3.1) como un modelo alambre en Autodesk Algor (figura 3.2). Para el modelo en Autodesk Algor se utilizó las coordenadas del modelo de Siemens Unigraphics NX. El modelo en Siemens Unigraphics NX tiene unas dimensiones 1.5 m x 3.65 m x 1.57 m (ancho x largo x alto).

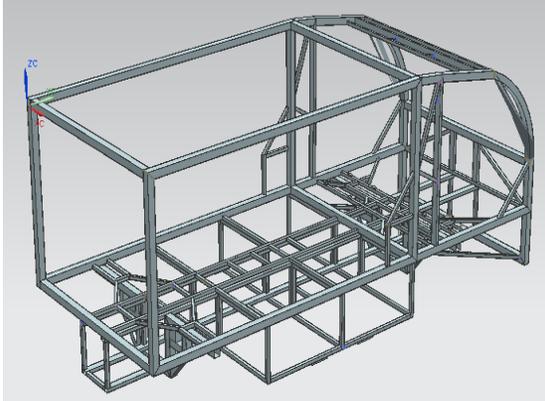


Fig. 3.1 Estructura en Siemens Unigraphics NX

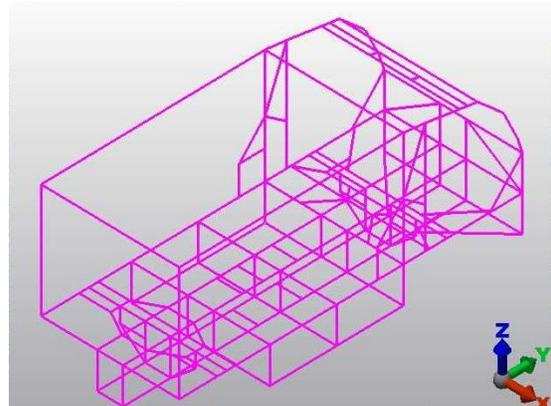


Fig. 3.2 Estructura alambre en Autodesk Algor

La estructura VER quedó definida por varios elementos que son los perfiles que componen al VER.

3.2 Etapa 1.

Ya definida la estructura se definió el tipo de elemento, la definición del elemento y el material.

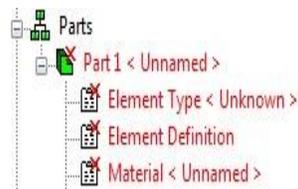


Fig. 3.3 Propiedades a definir del elemento

El programa Algor Autodesk 2011da a elegir distintos tipos de elementos:

- | | | |
|------------|---------------|-----------------------------|
| - Truss | - Plate | - Gap |
| - Beam | - Tetrahedron | - Thin Composite |
| - Membrane | - Spring | - Thick Coposite (Sandwich) |
| - Brick | - Rigid | |

Se seleccionó el elemento Beam que traducido al español es viga pero que en realidad el programa no lo modela como tal sino como un elemento tipo marco.

Posteriormente se definió el elemento. La definición del elemento se refiere a establecer las dimensiones del perfil. Para establecer las dimensiones se pueden hacer de dos formas, se pueden elegir de las diferentes librerías que tiene Algor Autodesk 2011 o se pueden definir por el usuario, en este caso se definió por el usuario; las dimensiones se sacaron de un catálogo de una empresa, estos perfiles son los PTR que son perfiles huecos por lo que se necesitaron sus dimensiones externas como internas.

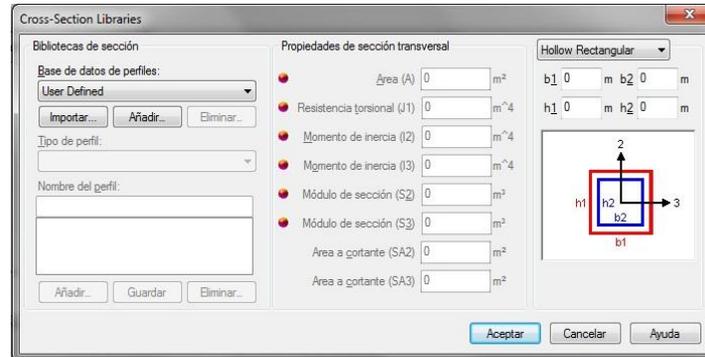


Fig. 3.4 Dimensiones del marco

Por último se escogió el material del elemento, Autodesk Algor 2011 da una lista de materiales, en ésta lista de materiales hay una clasificación de los diferentes tipos de material, se seleccionó el acero estructural ASTM A36.

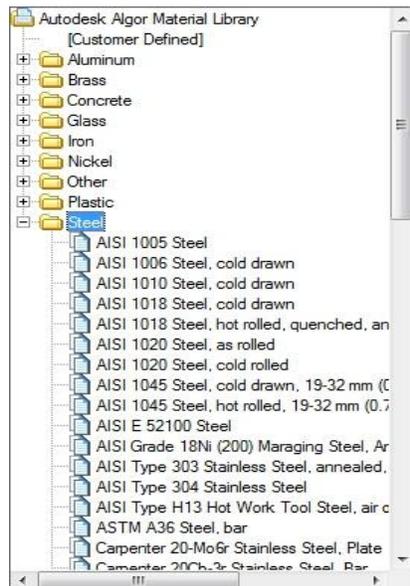


Fig. 3.5 Selección del material

Una vez definidas las propiedades del elemento se hizo dos modelos VER sometidos a los distintos tipos de impacto, los dos modelos tendrán el mismo perfil de 4"x6" y el mismo calibre 11, es decir,

0.12” de espesor; las mismas restricciones y cargas para los diferentes impactos, la única diferencia que existe en los modelos es la orientación de los perfiles, esto tuvo como objetivo saber cuál es la orientación en la que cada perfil tendrá un factor de seguridad mayor para las distintas pruebas de impacto.

Para las pruebas de impacto se consideró el peso del VER, el máximo peso de la carga que puede llevar el VER, el peso de las baterías y el peso del motor. La siguiente tabla muestra el peso y masa de cada parte:

Parte	Estructura VER	Carga	Baterías	Motor	Total
Peso [N]	11184.461	9810	5297.4	1471.5	27763.361
Masa [Kg]	1140.108	1000	540	150	2830.108

Tabla 3.1 Peso de las partes que conforman el VER en la etapa 1

Los casos de impacto lateral parcial, impacto lateral delantero, impacto lateral central e impacto lateral trasero se añadieron a esta tesis por lo que ahora el caso con mayor magnitud es el impacto lateral trasero y no el de impacto por volcadura.

En la siguiente tabla se muestran la magnitud de las cargas de los 10 casos:

Caso de Carga	Magnitud [N]
Impacto en anclaje delantero	27763.361
Impacto en anclaje trasero	27763.361
Impacto por torsión delantera	27763.361
Impacto por torsión trasera	27763.361
Impacto Frontal	15842.486
Impacto Trasero	17537.778
Impacto Trasero Parcial	33713.926
Impacto Lateral	7710.407
Impacto Lateral Trasero	67715.147
Impacto Lateral Central	23579.387
Impacto Lateral Delantero	29023.552
Impacto por Volcadura	18381.6323

Tabla 3.2 Magnitud de los casos de carga en la etapa 1

Para hacer eficiente el uso de tiempo de cómputo se hizo grupos en los que se agruparon los perfiles simétricos y los elementos que conforman un solo perfil.

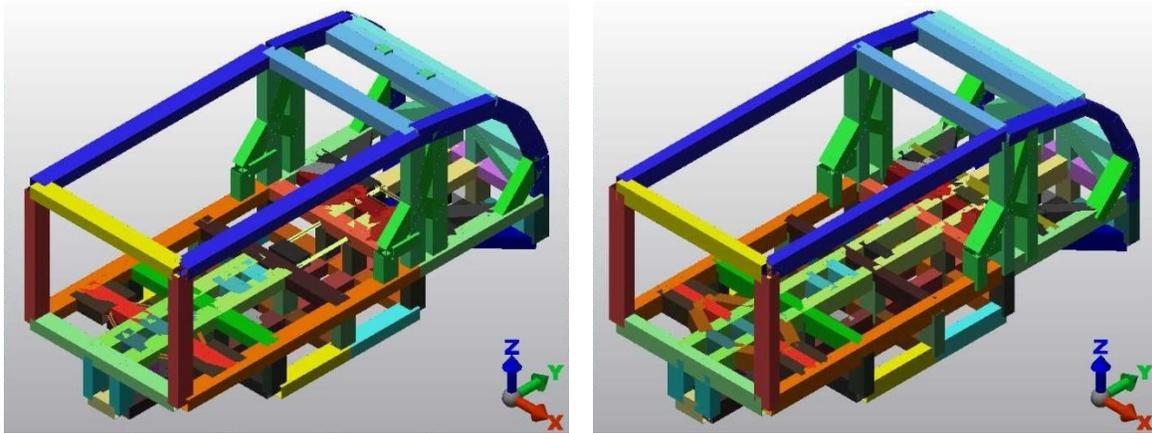


Fig. 3.6 Comparación entre los VER 4''x6'' (izq.) y VER 6''x4'' (der.)

Los esfuerzos obtenidos del análisis de cargas son la combinación de esfuerzos axiales, esfuerzos a flexión en la dirección 2 y esfuerzos a flexión en la dirección 3 que dan como resultado al peor esfuerzo (σ_{worst}). Los peores esfuerzos se obtienen con la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}\sigma_{worst} &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ &= \left| \frac{P}{A} \right| + \left| \frac{M_2}{S_2} \right| + \left| \frac{M_3}{S_3} \right|\end{aligned}\quad (3.1)$$

Cuando el marco tenga un esfuerzo axial positivo significa que está en tracción y cuando tenga un esfuerzo axial negativo está en compresión.

El esfuerzo a flexión se describe a continuación:

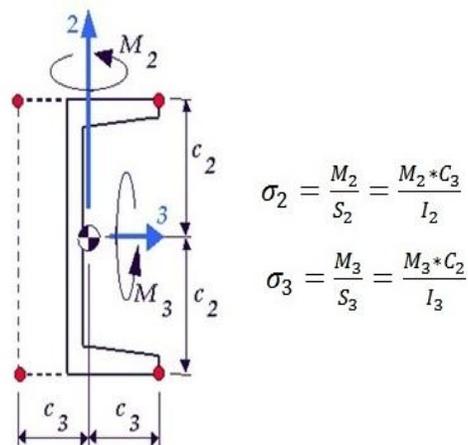


Fig. 3.7 Esfuerzos a flexión [12]

En el caso del VER con dimensiones 4'' x 6'' y 0.12'' de espesor el resultado con menor factor de seguridad fue el grupo 200 que corresponde a los perfiles centrales verticales que componen el anclaje delantero con un valor de 0.579 donde el caso de carga fue el impacto en anclaje trasero.

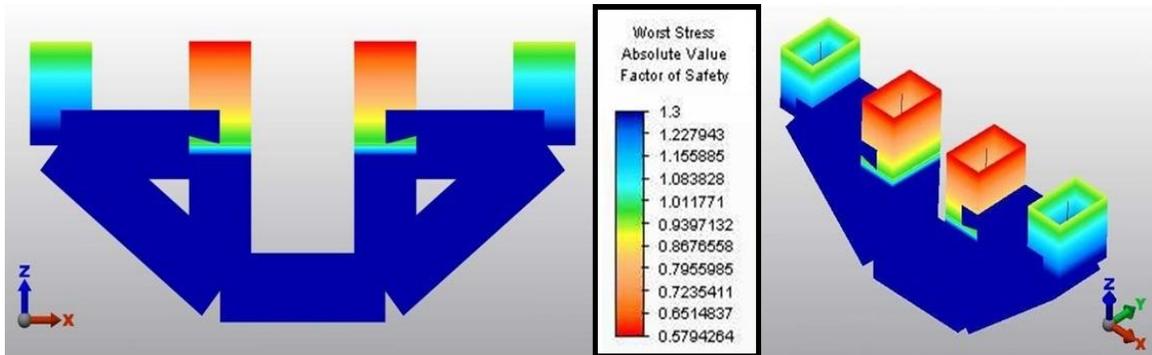


Fig. 3.8 Esfuerzos en anclaje delantero debido al impacto en anclaje trasero

En el caso del VER con dimensiones 6'' x 4'' y 0.12'', el resultado con menor factor de seguridad fue de igual manera que en la orientación 4''x6'' el grupo 200 ahora con un valor de 0.595.

Ejemplo de resultados de factor de seguridad del perfil 3.

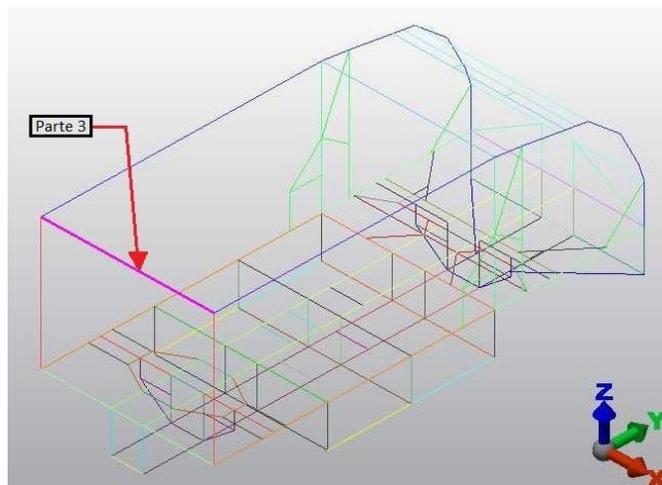


Fig 3.9 Parte 3 del VER

A continuación se ponen los distintos factores de seguridad obtenidos a los distintos casos de carga para la orientación 4''x6'' para la parte 3 del VER.

	Anclaje delantero	Anclaje trasero	Frontal	Lateral central	Lateral delantero	Lateral trasero	Lateral total	Trasero parcial	Trasero total	Volcadura
Part# 3	129.9	216	1.#INF	152	231	6.3	4.884	584	9.12	1.#INF
Part# 3	129.9	216	1.#INF	239	333	10	8.727	584	9.12	1.#INF

Tabla 3.3 Valores de los f.s. de los distintos casos de carga a la parte 3

Nota: 1.#INF significa que no hay valor para ese elemento porque es una restricción.

Se muestran dos resultados porque el grupo 3 tiene dos nodos. La casilla roja es el valor con menor factor de seguridad de todos los tipos de carga.

Los factores de seguridad menores de cada grupo de los dos modelos son los siguientes:

Grupo	4"x6"	6x4"
3	4.884	4.686
5	0.743	0.783
12	2.279	1.942
19	10.825	11.461
36	1.486	1.276
37	1.307	1.199
54	4.366	4.017
55	2.968	3.145
58	3.214	3.574
61	6.513	5.458
62	6.64	9.313
65	4.893	5.244
67	11.435	10.803
69	36.946	21.21
71	2.259	1.77
74	2.704	2.573
76	1.225	1.11
77	8.582	5.438
78	2.601	2.464
79	4.655	4.236
80	1.758	1.656
81	4.373	3.796
93	0.916	0.838
97	2.068	2.16
100	2.54	2.743
102	2.74	2.83
103	4.868	4.237
105	5.535	6.786
119	3.528	3.813
124	4.955	6.844
128	1.593	1.628
134	6.106	9.603
137	3.016	3.349
140	5.498	4.934
143	2.046	1.791
145	11.019	9.597
148	3.866	3.514
155	15.223	16.146
156	16.033	16.857
157	18.197	19.476
158	23.548	22.653
159	27.228	27.303
160	22.549	30.092
161	3.663	3.337
165	2.65	2.397
166	1.497	1.474
173	8.01	6.907
174	3.661	3.222
177	2.969	2.243
181	1.935	1.614
182	1.109	1.029
183	1.326	1.107
184	3.018	2.226
189	0.8	1.08
193	1.274	1.567
195	7.323	9.188
196	1.993	2.776
198	6.211	13.914
200	0.579	0.595
204	0.921	0.826
206	5.32	5.409
207	1.371	1.411
209	4.474	8.622
211	3.13	4.809
212	13.162	19.9
215	0.61	0.847
217	2.171	2.914
218	2.184	2.449
221	1.429	1.699
222	2.479	2.599
225	1.12	1.481
226	3.693	3.367
229	3.326	4.047
231	35.409	40.082
232	3.375	4.636
233	7.258	9.296
235	2.427	2.801
236	5.649	5.838
238	2.934	3.321
239	6.236	6.44
241	2.676	2.343
242	1.837	1.67
243	1.603	1.645
245	2.073	2.18
247	1.652	1.862
248	2.799	4.131
259	1.787	2.058
260	3.154	2.806
263	16.142	21.699
264	20.953	21.075
265	27.389	28.223
266	7.727	11.282
268	3.646	4.15
271	3.315	2.731

Tabla 3.4 Valores de los f.s. de los modelos 4"x6" y 6"x4"

Por lo que la correcta orientación para cada grupo es:

Grupo	4"x6"	6x4"
3	X	
5		X
12	X	
19		X
36	X	
37	X	
54	X	
55		x
58		X
61	X	
62		X
65		X
67	X	
69	X	
71	X	
74	X	
76	X	
77	X	
78	X	
79	X	
80	X	
81	X	
93	X	
97		X
100		X
102		X
103	X	
105		X
119		X
124		X
128		X
134		X
137		X
140	X	
143	X	
145	X	
148	X	
155		X
156		X
157		X
158	X	
159		X
160		X
161	X	
165	X	
166	X	
173	X	

174	X	
177	X	
181	X	
182	X	
183	X	
184	X	
189		X
193		X
195		X
196		X
198		X
200		X
204	x	
206		X
207		X
209		X
211		X
212		X
215		X
217		X
218		X
221		X
222		X
225		X
226	X	
229		X
231		
232		X
233		X
235		X
236		X
238		X
239		X
241	X	
242	X	
243		X
245		X
247		X
248		X
259		X
260	X	
263		X
264		X
265		X
266		X
268		X
271	X	

Tabla 3.5 Orientación de los perfiles

3.3 Etapa 2.

Ya que se supo la orientación adecuada de los perfiles para tener un mayor factor de seguridad se cambiaron las dimensiones de los perfiles y/o espesor hasta llegar al factor de seguridad deseado de 1.3 – 1.5 o cercanos a éstos.

Haciendo cambios a los perfiles el peso del VER sus magnitudes de peso y masa son:

Parte	Estructura obtenida	Carga	Baterías	Motor	Total
Peso [N]	7123.292	9810	5297.4	1471.5	23702.192
Masa [Kg]	726.126	1000	540	150	2416.126

Tabla 3.6 Peso de las partes que conforman el VER en la etapa 2

A continuación aparecen los factores de seguridad con menor valor y se indica el caso de carga con el que tuvieron dicho factor de seguridad, se remarcan los grupos con valores menores a un factor de seguridad de 1.3.

Grupo	Factor de seguridad	Caso de Carga
3	3.284	Lateral total
5	1.049	Volcadura
12	1.793	Anclaje trasero
19	4.709	Frontal
36	1.447	Volcadura
37	1.557	Volcadura
54	0.818	Volcadura
55	1.069	Volcadura
58	1.527	Volcadura
61	0.850	Volcadura
62	1.311	Frontal
65	1.287	Frontal
67	1.622	Frontal
69	1.115	Volcadura
71	1.573	Volcadura
74	1.690	Volcadura
76	0.987	Volcadura
77	3.292	Volcadura
78	1.263	Volcadura
79	2.728	Volcadura
80	1.053	Volcadura
81	3.313	Trasero total
93	1.033	Anclaje delantero
97	1.348	Anclaje delantero
100	1.627	Anclaje trasero
102	1.683	Anclaje trasero
103	2.346	Anclaje trasero
105	1.924	Frontal
119	2.026	Lateral central
124	2.327	Anclaje trasero
128	0.691	Anclaje trasero
134	2.856	Anclaje delantero
137	1.550	Volcadura
140	4.441	Anclaje trasero
143	1.289	Anclaje trasero
145	5.446	Lateral delantero
148	1.959	Anclaje trasero
155	2.913	Latera trasero
156	2.815	Lateral trasero
157	3.205	Lateral trasero
158	7.212	Torsión trasera
159	7.524	Torsión trasera
160	8.038	Torsión trasera
161	1.650	Anclaje delantero
165	2.335	Anclaje delantero
166	1.835	Anclaje delantero
173	4.482	Anclaje trasero
174	2.036	Anclaje trasero
177	2.204	Anclaje trasero
181	1.406	Anclaje trasero
182	1.385	Anclaje trasero
183	2.581	Anclaje trasero
184	2.272	Anclaje trasero
189	1.069	Anclaje delantero
193	1.672	Anclaje delantero
195	8.508	Torsión trasera
196	2.666	Anclaje delantero
198	10.101	Anclaje delantero
200	0.626	Anclaje trasero
204	0.949	Anclaje trasero
206	5.248	Anclaje trasero
207	1.432	Anclaje trasero
209	6.016	Anclaje trasero
211	1.572	Anclaje trasero

212	1.338	Frontal
215	1.206	Volcadura
217	1.341	Volcadura
218	1.281	Anclaje delantero
221	1.197	volcadura
222	1.077	Anclaje delantero
225	1.336	Volcadura
226	0.963	Anclaje delantero
229	2.291	Frontal
231	1.823	Trasero mitad
232	1.805	Anclaje delantero
233	3.46	Torsión trasera
235	1.594	Volcadura
236	2.824	Volcadura
238	1.773	Anclaje trasero
239	4.945	Volcadura
241	1.923	Volcadura
242	1.261	Anclaje delantero
243	1.261	Anclaje delantero
245	0.998	Anclaje trasero
247	0.817	Anclaje trasero
248	1.325	Anclaje trasero
259	1.908	Volcadura
260	2.404	Volcadura
263	2.463	Frontal
264	8.064	Torsión delantera
265	10.104	Torsión trasera
266	2.831	Anclaje trasero
268	1.520	Anclaje delantero
271	0.647	Lateral trasero

Tabla 3.7 Valores de los f.s. de la etapa 2

De nuevo el grupo con menor factor de seguridad fue la 200 con un valor de 0.626.

3.4 Etapa 3.

El grupo 69 se quito porque a los grupo 55 y 58 que está reforzando uno ya tienen el factor de seguridad necesario para que no sea reforzado y el otro está cercano al factor de seguridad de 1.3.

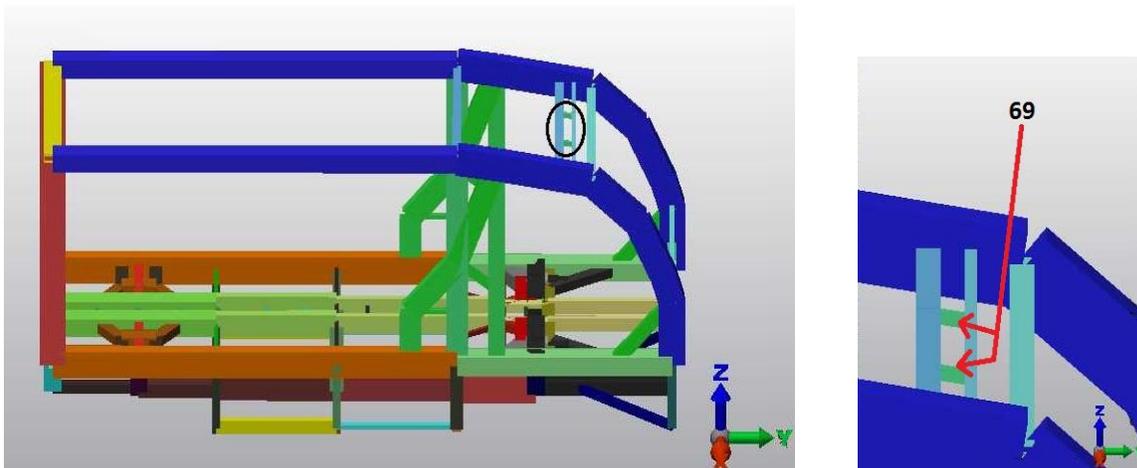


Fig 3.10 Parte 69

Los grupos de los anclajes se encuentran muy lejos del factor de seguridad de 1.3 por lo que se reforzó con perfiles. Los perfiles con los que se reforzó son 279,280, 281 y 282.

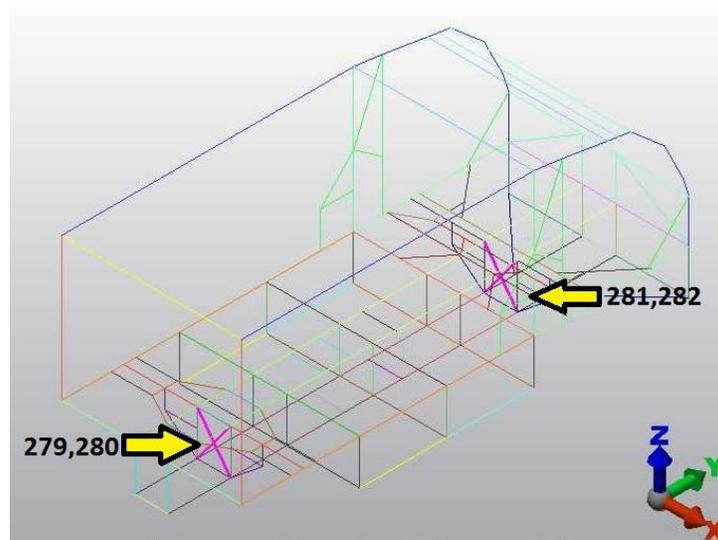


Fig 3.11 Refuerzos 279, 280, 281, 282

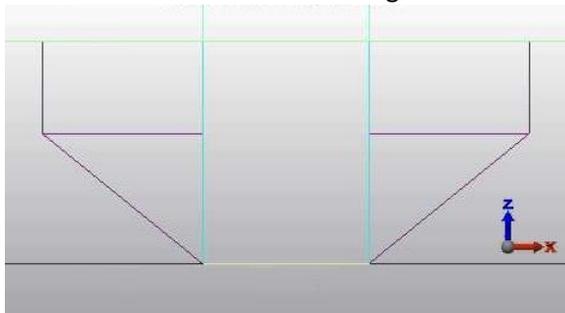


Fig 3.12 Anclaje sin refuerzo

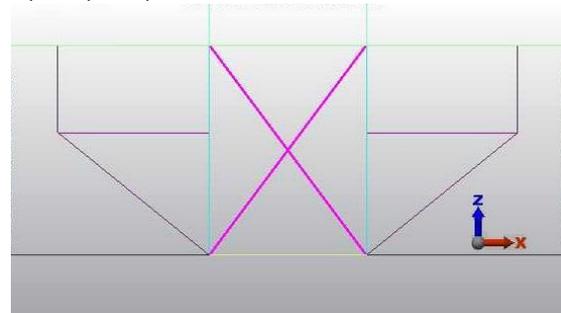


Fig 3.13 Anclaje con refuerzo

Haciendo cambios a las dimensiones y espesores de los perfiles, el peso del VER es:

Parte	Estructura VER	Carga	Baterías	Motor	Total
Peso [N]	7272.976	9810	5297.4	1471.5	23482.159
Peso [Kg]	741.384	1000	540	150	2393.696

Tabla 3.8 Peso de las partes que conforman el VER en la etapa 3

Los factores de seguridad de la etapa 3 se muestran a continuación:

Grupo	Factor de seguridad	Caso de Carga
3	1.596	Trasero total
5	1.192	Volcadura
12	1.846	Anclaje trasero
19	1.355	Frontal
36	1.778	Volcadura
37	1.639	Volcadura
54	4.318	Lateral total
55	3.339	Volcadura

58	2.754	Volcadura
61	3.928	Volcadura
62	1.249	Frontal
65	1.462	Frontal
67	1.446	Frontal
71	1.585	Volcadura
74	1.364	Lateral delantero
76	1.025	Volcadura
77	2.718	Lateral central
78	1.281	Volcadura

79	1.1	Lateral delantero	206	6.733	Torsión delantera
80	1.088	Volcadura	207	1.64	Anclaje trasero
81	1.153	Lateral delantero	209	5.536	Anclaje delantero
93	1.043	Anclaje delantero	211	1.683	Anclaje trasero
97	1.263	Anclaje delantero	212	4.233	Frontal
100	1.468	Anclaje trasero	215	1.36	Volcadura
102	1.369	Anclaje trasero	217	1.974	Volcadura
103	1.62	Anclaje trasero	218	1.520	Anclaje delantero
105	1.418	Frontal	221	1.819	Volcadura
119	2.15	Lateral central	222	1.19	Anclaje delantero
124	2.241	Anclaje trasero	225	1.547	Volcadura
128	1.012	Anclaje trasero	226	1.344	Anclaje delantero
134	3.441	Lateral trasero	229	1.323	Frontal
137	1.636	Volcadura	231	1.827	Trasero parcial
140	2.174	Anclaje trasero	232	2.198	Anclaje delantero
143	1.434	Anclaje trasero	233	2.77	Torsión delantera
145	3.784	Lateral delantero	235	1.702	Volcadura
148	1.956	Anclaje trasero	236	2.182	Volcadura
155	3.231	Lateral trasero	238	1.731	Anclaje trasero
156	4.080	Lateral trasero	239	5.546	Torsión delantera
157	3.279	Lateral trasero	241	1.903	Volcadura
158	8.05	Torsión trasera	242	1.359	Anclaje delantero
159	8.264	Torsión trasera	243	1.181	Anclaje delantero
160	9.582	Torsión trasera	245	1.142	Anclaje trasero
161	1.238	Anclaje delantero	247	1.286	Anclaje trasero
165	1.826	Anclaje trasero	248	1.671	Anclaje trasero
166	1.235	Anclaje delantero	259	1.775	Volcadura
173	4.020	Anclaje trasero	260	1.55	Lateral central
174	1.655	Anclaje trasero	263	2.221	Frontal
177	2.008	Anclaje trasero	264	3.81	Torsión delantera
181	1.699	Anclaje trasero	265	5.86	Torsión delantera
182	1.450	Anclaje trasero	266	3.620	Frontal
183	2.913	Anclaje trasero	268	1.258	Anclaje delantero
184	3.404	Anclaje trasero	271	1.455	lateral trasero
189	1.148	Anclaje delantero	279	1.658	Anclaje delantero
193	1.770	Anclaje delantero	280	1.658	Anclaje delantero
195	6.32	Torsión delantera	281	1.187	Anclaje trasero
196	3.059	Anclaje delantero	282	1.187	Anclaje trasero
198	4.142	Anclaje trasero			
200	0.83	Anclaje trasero			
204	1.541	Anclaje trasero			

Tabla 3.9. Valores de los f.s de la etapa 3

De nuevo el grupo con menor factor de seguridad fue la 200 con un valor de 0.83

3.5 Etapa 4.

Los grupos 55, 58 y 61 se traslapan por lo que el grupo 58 se quito además de que al quitarlo no disminuye el factor de seguridad en el larguero donde es la zona donde influyen estos grupos.

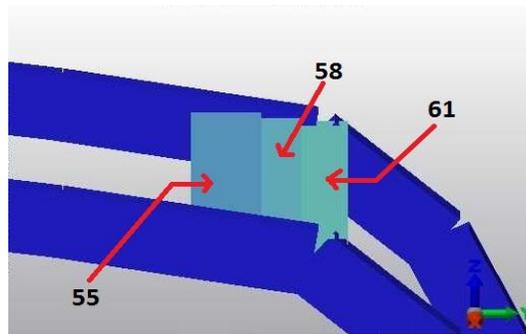


Fig. 3.14. Partes 55, 58, 61

Los grupos 128, 143 y 148 que están en la parte delantera donde se encuentra el anclaje delantero se traslapan por lo que el perfil 148 se paso más adelante y el perfil 143 se quito ya que no ayuda en nada a la estructura.

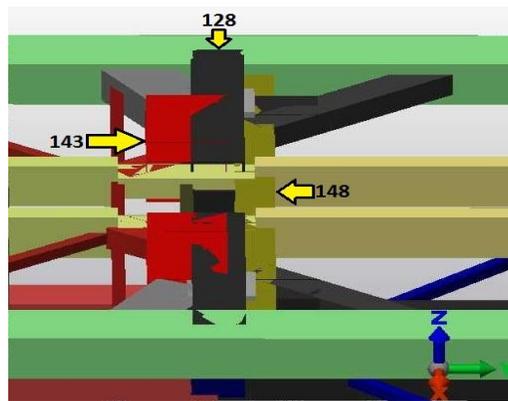


Fig. 3.15. Partes 143, 128, 148

En la figura se muestran los grupos 58,143, 145,174, 181, 182, 183 que se quitaron.

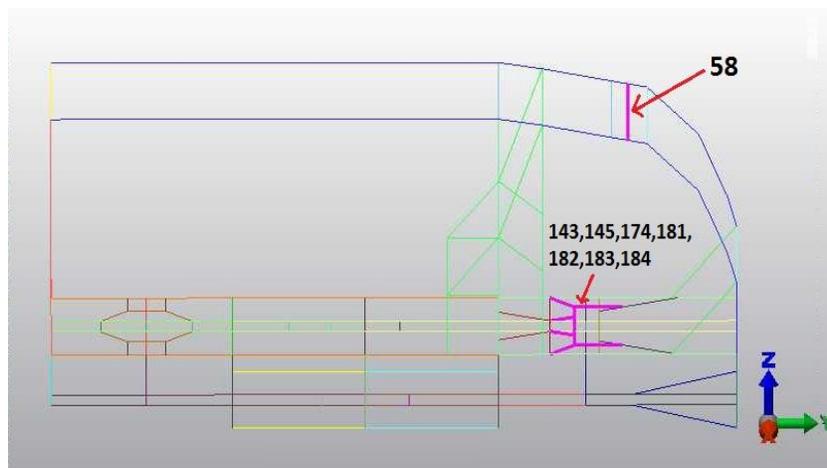


Fig. 3.16. Partes que se quitaron.

Los resultados indicaron que el riel de baterías debería estar formado en la parte superior por diferentes perfiles, sin embargo para facilitar la manufactura se definió que se utilizarían perfiles de las mismas dimensiones más no del mismo calibre. No se puso el mismo calibre ya que en una parte se necesita un espesor de $\frac{1}{4}$ " y en otro de 0.075" si se pone todo de $\frac{1}{4}$ " aumentaría el peso de forma considerable y como consecuencia aumentaría la magnitud de carga de los impactos por lo que tendrían que aumentar las dimensiones o poner otros espesores mayores en otros perfiles aumentando el peso del VER.

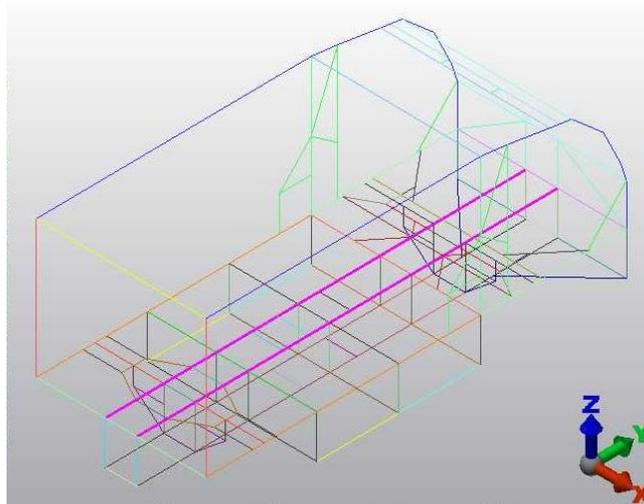


Fig. 3.17. Perfiles superiores del riel de baterías

De la misma manera que los perfiles superiores que conforman del riel de baterías, los perfiles inferiores del mismo se decidió que estuvieran compuestos por perfiles de la misma dimensión aunque con distinto espesor. A diferencia de los perfiles superiores que tienen una orientación de 4"x6" (horizontales), los perfiles inferiores tendrán una orientación de 6"x4" (verticales) ya que es la orientación con que se obtienen mayor factor de seguridad.

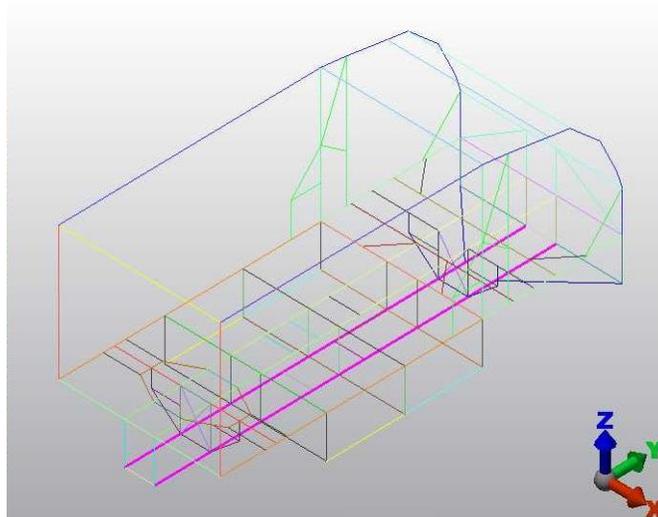


Fig. 3.18. Perfiles inferiores del riel de baterías

Haciendo cambios a los perfiles el peso del VER fue:

Parte	Estructura VER	Carga	Baterías	Motor	Total
Fuerza[N]	6551	9810	5297	1471.5	23130.7
Peso [Kg]	667.87	1000	540	150	2357.87

Tabla 3.10. Valores de los f.s de la etapa 4.

Los factores de seguridad obtenidos de la etapa 4 son los siguientes:

Grupo	Factor de seguridad	Caso de Carga
3	1.752	Trasero total
5	1.122	Volcadura
12	3.324	Anclaje trasero
19	3.869	Lateral delantero
36	1.538	Volcadura
37	1.207	Volcadura
54	1.513	Volcadura
55	1.241	Volcadura
61	1.772	Volcadura
62	1.680	Frontal
65	1.346	Frontal
67	1.819	Frontal
71	1.674	Volcadura
74	1.834	Lateral delantero
76	1.269	Volcadura
77	2.714	Lateral central
78	1.284	Volcadura
79	3.229	Lateral delantero
80	1.258	Volcadura
81	1.654	Lateral delantero
93	1.282	Anclaje delantero
97	1.418	Anclaje delantero
100	1.632	Anclaje trasero
102	1.354	Anclaje trasero
103	1.28	Anclaje trasero
104	1.832	Anclaje trasero
105	2.433	Anclaje trasero
119	1.536	Lateral central
124	2.893	Torsión delantera
128	1.749	Anclaje trasero
134	3.343	Lateral trasero
137	1.47	Volcadura
140	2.878	Lateral delantero
148	2.984	Lateral delantero
155	3.358	Lateral trasero
156	4.067	Lateral trasero
157	3.401	Lateral trasero
158	5.688	Torsión trasera
159	5.899	Torsión trasera
160	5.516	Lateral central
161	1.854	Anclaje delantero
165	3.313	Anclaje delantero
166	2.05	Anclaje delantero
173	4.904	Anclaje trasero
177	9.130	Lateral delantero
189	1.311	Anclaje delantero
193	2.063	Anclaje delantero
195	5.954	Torsión delantera
196	3.300	Anclaje trasero
198	4.675	Anclaje trasero
200	1.235	Anclaje trasero
204	2.650	Anclaje trasero
206	5.945	Anclaje delantero
207	2.221	Anclaje trasero
209	6.950	Anclaje delantero
211	1.452	Frontal
212	2.016	Frontal
215	1.181	Volcadura
217	1.302	Lateral trasero
218	1.39	Volcadura
221	1.415	Volcadura
222	1.315	Volcadura
225	1.776	Volcadura
226	1.406	Anclaje trasero
229	1.317	Frontal
231	2.105	Trasero mitad
232	2.296	Lateral central
233	2.306	Torsión delantera
235	1.403	Volcadura
236	1.996	Volcadura
238	1.848	Lateral central
239	3.36	Torsión trasera
241	1.856	Volcadura
242	1.667	Anclaje delantero
243	1.49	Anclaje delantero
245	1.577	Anclaje trasero
247	1.788	Anclaje trasero
248	1.640	Frontal
259	1.313	Lateral central
260	1.27	Lateral central

263	1.811	Frontal	271	1.307	Lateral trasero
264	3.13	Torsión delantera	279	1.894	Anclaje delantero
265	4.29	Torsión trasera	280	1.894	Anclaje delantero
266	2.328	Frontal	281	1.764	Anclaje trasero
268	1.932	Lateral trasero	282	1.764	Anclaje trasero

Tabla 3.11 Peso de las partes que conforman el VER en la etapa 3

Ahora el grupo 5 tiene un menor factor de seguridad con un valor de 1.122 que corresponde al larguero que está en la zona donde se pone la carga que transporta el VER.

3.6 Etapa 5.

El grupo 36 en la etapa 4 tenía una orientación horizontal 4''x6'' pero se cambió a una vertical 6''x4'' debido a que cuando se vaya a manufacturar llevará la misma secuencia que el grupo 37, además al cambiarse se incrementó ligeramente el factor de seguridad del grupo 5.

En la zona del anclaje trasero, el grupo 124 se quitara ya que al grupo 166 que están reforzando es lo bastante rígido como para ser reforzado.

Como ya se sabe los grupos que componen el riel de baterías superior tienen un alto factor de seguridad por lo que no es necesario que sean reforzados por los grupos 140, 148, 173 y 177 así que fueron eliminados.

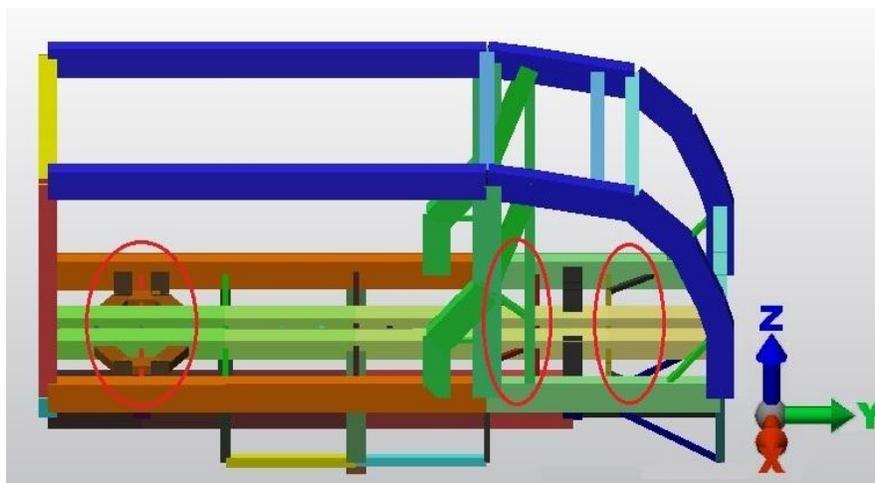


Fig. 3.19. Zonas donde se quitaran los perfiles.



Fig.3.20 Partes 124, 166

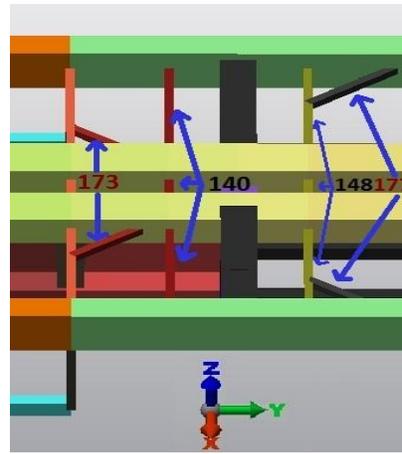


Fig.3.21. Partes 140, 148, 173, 177

Parte	Estructura VER	Carga	Baterías	Motor	Total
Peso [N]	6845.702	9810	5297.4	1471.5	23402.37
Peso [Kg]	697.829	1000	540	150	2385.563

Tabla 3.11. Valores de los f.s. de la etapa 5.

Los factores de seguridad de la etapa 5 se muestran a continuación:

Grupo	Factor de seguridad	Caso de Carga
3	1.764	Trasero todo
5	1.196	Volcadura
12	3.475	Lateral delantero
19	3.106	Lateral delantero
36	1.403	Volcadura
37	1.318	Volcadura
54	1.474	Volcadura
55	1.635	Volcadura
61	1.688	Volcadura
62	1.673	Frontal
65	1.327	Frontal
67	1.818	Frontal
71	1.2	Volcadura
74	1.927	Lateral delantero
76	1.318	Volcadura
77	2.671	Lateral central
78	1.463	Volcadura
79	3.006	Lateral delantero
80	1.281	Volcadura
81	1.526	Lateral delantero
93	1.271	Anclaje delantero
97	1.381	Anclaje delantero

100	1.569	Anclaje trasero
102	1.333	Anclaje trasero
103	1.275	Anclaje trasero
104	1.83	Anclaje trasero
105	2.425	Anclaje trasero
119	1.763	Lateral central
128	1.507	Anclaje trasero
134	3.248	Lateral trasero
137	1.611	Volcadura
155	3.397	Lateral trasero
156	5.025	Lateral trasero
157	3.431	Lateral trasero
158	5.713	Torsión trasera
159	5.779	Lateral central
160	5.137	Lateral central
161	1.532	Anclaje delantero
165	3.236	Anclaje delantero
166	2.21	Anclaje delantero
189	1.363	Anclaje delantero
193	3.757	Anclaje delantero
195	5.875	Torsión delantera
196	2.054	Anclaje delantero
198	4.796	Anclaje trasero
200	1.276	Anclaje trasero

204	2.074	Anclaje trasero
206	4.016	Lateral delantero
207	3.351	Anclaje trasero
209	7.574	Anclaje delantero
211	1.452	Frontal
212	1.933	Frontal
215	1.316	Volcadura
217	1.432	Lateral trasero
218	1.422	Anclaje delantero
221	1.504	Volcadura
222	1.438	Anclaje delantero
225	1.746	Volcadura
226	1.343	Anclaje trasero
229	1.832	Frontal
231	2.085	Trasero parcial
232	2.551	Lateral central
233	2.265	Torsión delantera
235	1.532	Volcadura
236	2.2	Volcadura
238	2.056	Lateral central

239	3.104	Torsión trasera
241	2.07	Volcadura
242	1.653	Anclaje delantero
243	1.463	Anclaje delantero
245	1.536	Anclaje trasero
247	1.754	Anclaje trasero
248	1.609	Frontal
259	1.764	Lateral central
260	1.699	Lateral central
263	1.828	Frontal
264	3.092	Torsión delantera
265	4.068	Lateral central
266	2.318	Frontal
268	1.883	Anclaje delantero
271	2.072	Lateral trasero
279	1.954	Anclaje delantero
280	1.954	Anclaje delantero
281	1.801	Anclaje trasero
282	1.801	Anclaje trasero

El caso de impacto por volcadura fue donde se obtuvo menor factor de seguridad los cuales fueron los grupos 5 y 71 con un valor de 1.196 y 1.2, respectivamente.

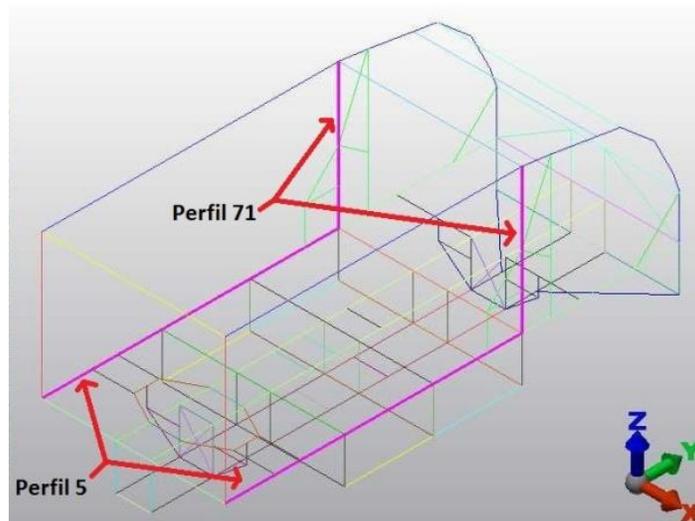


Fig. 3.22. Grupos 5 y 71

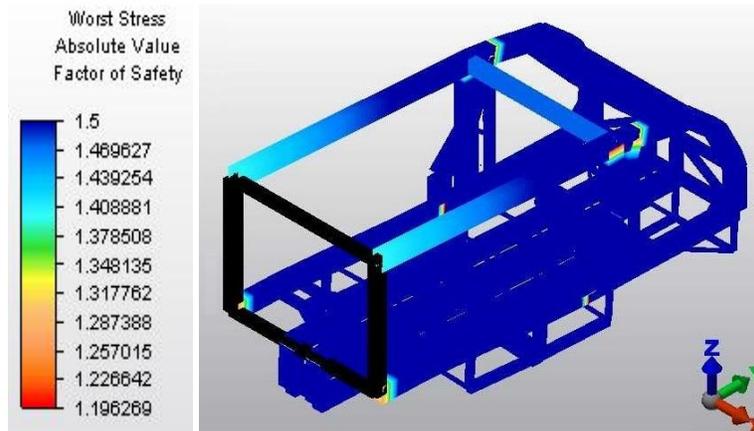


Fig. 3.23. Análisis de esfuerzos del impacto por volcadura

Finalmente la estructura quedó de la siguiente manera.

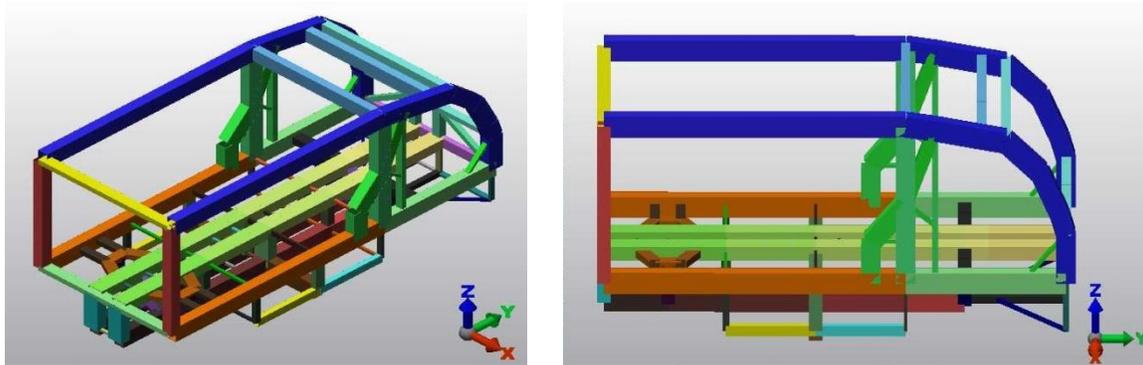


Fig. 3.24. Estructura final

A continuación se enumera y explica las causas por qué algunos grupos quedaron por debajo y otros por encima del factor de seguridad de 1.3 – 1.5y se muestra en una tabla cuál es la causa para cada grupo.

Causas por las que se pasan del rango 1.3 - 1.5.

1 Si se les da otra dimensión o espesor hay una disminución considerable en el factor de seguridad por debajo de 1.3.

2 Se tiene que seguir una dimensión con otros perfiles para no tener un problema de manufactura, es el caso de los perfiles que conforman el riel de baterías.

3 Influyen en el factor de seguridad de otros perfiles, como se vio en el caso de carga de impacto en anclaje delantero e impacto en anclaje trasero, donde los perfiles con un factor de seguridad alto ayudan a que otros perfiles puedan alcanzar el factor de seguridad de 1.3.

4 No hay un perfil menor.

Grupo	Factor de seguridad	Razón				
3	1.764	1		204	2.074	3
12	3.475	2		206	4.016	4
19	3.106	2		207	3.351	2
55	1.635	1		209	7.574	4
61	1.688	1		212	1.933	1
62	1.673	1		221	1.504	2
67	1.818	1		225	1.746	2
74	1.927	1		229	1.832	1
77	2.671	4		231	2.085	4
79	3.006	4		232	2.551	4
81	1.526	1		233	2.265	4
100	1.569	1		235	1.532	1
104	1.83	2		236	2.2	4
105	2.425	2		238	2.056	4
119	1.763	4		239	3.104	4
128	1.507	1		241	2.07	2
134	3.248	4		242	1.653	1
137	1.611	1		245	1.536	1
155	3.397	4		247	1.754	2
156	5.025	4		248	1.609	1
157	3.431	4		259	1.764	1
158	5.713	4		260	1.699	1
159	5.779	4		263	1.828	4
160	5.137	4		264	3.092	4
161	1.532	1		265	4.068	4
165	3.236	2		266	2.318	4
166	2.21	2		268	1.883	2
193	3.757	3		271	2.072	2
195	5.875	4		279	1.954	3
196	2.054	2		280	1.954	3
198	4.796	4		281	1.801	3
				282	1.801	3

Causas por las que no llegan al factor de seguridad de 1.3.

1 No hay un perfil con mayor dimensión o con mayor espesor.

2 Al colocar otro perfil con mayor dimensión o espesor, afecta a que otros perfiles tengan menor factor de seguridad.

3 No es conveniente poner otro perfil ya que quedaría sobredimensionado.

Grupo	Factor de seguridad	Razón
5	1.196	1
71	1.2	2
80	1.281	3

93	1.271	1
103	1.275	1
200	1.276	3

Las dimensiones de cada grupo de la estructura de la última etapa se encuentran en el anexo.

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo.

Conclusiones

En el presente trabajo se realizó la adecuación del diseño conceptual óptimo de la estructura para un vehículo eléctrico de reparto, bajo consideraciones de impacto severo a una velocidad promedio de 60 km/hr y en diferentes direcciones; aplicando cargas estáticas equivalentes en lugar de considerar cargas dinámicas. Lo anterior para reducir los costos computacionales implícitos. El resultado es una estructura robusta cuya masa es de 697.8 kg, la cual es similar a vehículos comerciales de capacidad similar.

Si bien el resultado anterior en apariencia corresponde a la estructura de un vehículo de mayor tamaño, al considerarse en este trabajo que el vehículo bajo las cargas aplicadas no debería sufrir deformaciones plásticas se obtuvo una estructura de alta rigidez.

Debido a que la mayoría de los elementos estructurales en el chasis presentan un factor de seguridad, en las condiciones más críticas, entre 1.196 y 1.281 se puede decir que la estructura es lo suficientemente rígida para soportar los casos de carga, sin que sus miembros estén sobredimensionados para las consideraciones hechas. La excepción corresponde a algunos perfiles que componen los anclajes pero tienen la justificación de que ayudan a subir el factor de seguridad de otros perfiles.

Además, se procuró formar grupos de elementos que sí compartieran el mismo perfil esto con la intención de reducir la dificultad y costos de fabricación del chasis. Por lo anterior, se puede señalar que el diseño obtenido no presentaría graves dificultades en la fabricación y sí buenas características de rigidez.

Hay que tener en cuenta que el diseño de las uniones de los elementos no está dentro del alcance de este trabajo, por lo que para complementar será necesario llevarlo a cabo. Esto se recomienda proponiendo diferentes tipos de uniones comunes, para este tipo de perfiles, y seleccionar aquel tipo que resulte ser más rígida sin elevar demasiado el peso de la estructura.

Trabajo Futuro

Las áreas de oportunidad que se detectan para continuar este trabajo son las siguientes.

1. Diseño de las uniones de los elementos.
2. Determinación de las dimensiones de los elementos con base en un análisis en el que se tome en cuenta un porcentaje de deformación plástica permitida. La realización de dicho trabajo generaría una estructura más ligera que la obtenida en esta tesis y evidentemente menos rígida.
3. Análisis dinámico del comportamiento del vehículo bajo condiciones de operación y carga reales.

Bibliografía

- [1] Camacho M., F. A. (2011). Diseño Conceptual de un Vehículo Eléctrico de Reparto, Modelado como un Monocasco, Tesis de licenciatura, UNAM, México.
- [2] Luque Rodríguez, P., Álvarez Mántaras, D. (2003). Investigación de Accidentes de Tráfico (pp 6-7), Universidad de Oviedo.
- [3] http://www.autozine.org/technical_school/chassis/tech_chassis.htm
- [4] Heibing, B., Ersoy, M. (1 Ed.) (2011). Chassis Handbook. Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives (pp 206-207). Germany: Wiesbaden.
- [5] <http://www.euroncap.com/testprocedures.aspx> Fecha de consulta: Abril de 2012
- [6] Bhatti, A. (2 Ed.) (2005). Fundamental Finite Element Analysis and Applications (pp 279-286). USA: John Wiley & Sons Inc.
- [7] Velázquez, F. (2010) Apuntes de la asignatura de Análisis de Elemento Finito, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- [8] http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/StaticAnalysis/IDH_Analysis_Background_Linear_Static_Analysis.html?id=ef899d5d39d24e2baba8854f33e2c646#Pg0 Fecha de consulta: Junio de 2012
- [9] http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/NonlinearAnalysis/Nonlinear_Static_Analysis.htm?id=a3af2f6c994f49b18b49df4aeb5b06a9#Pg0 Fecha de consulta: Septiembre de 2012
- [10] <http://www.eng.auburn.edu/users/marghitu/chapter2.pdf> Fecha de consulta: Octubre de 2012
- [11] <http://www.mechanical360.net/updates/factor-of-safety-and-margin-of-safety/> Fecha de consulta: Octubre de 2012
- [12] Guide Autodesk Algor Simulation 2011.

Anexo

Dimensiones de los perfiles de la etapa 5.

Grupo	Elementos	Perfil	Dimensión exterior [m]	Espesor [m]	Dimensión interior [m]
3	3				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	4	0.1016	0.001905	0.09779
5	5-11, 29-35				
ancho	b	6	0.1524	0.00635	0.1397
altura	h	4	0.1016	0.00635	0.0889
12	12-18, 22-28				
ancho	b	6	0.1524	0.001905	0.14859
altura	h	4	0.1016	0.001905	0.09779
19	19-21				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	2	0.0508	0.001905	0.04699
36	36,45				
ancho	b	6	0.1524	0.003048	0.146304
altura	h	4	0.1016	0.003048	0.095504
37	37-44,46-53				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	6	0.1524	0.001905	0.14859
54	54				
ancho	b	5	0.127	0.001905	0.12319
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239
55	55-57				
ancho	b	5	0.127	0.001905	0.12319
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239
61	61				
ancho	b	5	0.127	0.001905	0.12319
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239
62	62-64				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239
65	65,66				
ancho	b	3	0.0762	0.001905	0.07239
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239

Grupo	Elementos	Perfil	Dimensión exterior [m]	Espesor [m]	Dimensión interior [m]
67	67,68				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	2	0.0508	0.001905	0.04699
71	71-73,82-84				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	6	0.1524	0.001905	0.14859
74	74,85,275-278				
ancho	b	3	0.0762	0.001905	0.07239
altura	h	2	0.0508	0.001905	0.04699
76	76,87				
ancho	b	4	0.1016	0.004191	0.093218
altura	h	6	0.1524	0.004191	0.144018
77	77,88				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
78	78,89				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	6	0.1524	0.001905	0.14859
79	79,90				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
80	80,91				
ancho	b	4	0.1016	0.003048	0.095504
altura	h	4	0.1016	0.003048	0.095504
81	81,92				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
93	93-96, 106-109				
ancho	b	4	0.1016	0.00635	0.0889
altura	h	6	0.1524	0.00635	0.1397
97	97-99, 110-112				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	6	0.1524	0.001905	0.14859
100	100-101, 113-114				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	6	0.1524	0.001905	0.14859

Grupo	Elementos	Perfil	Dimensión exterior [m]	Espesor [m]	Dimensión interior [m]
102	102,115				
ancho	b	4	0.1016	0.004191	0.093218
altura	h	6	0.1524	0.004191	0.144018
103	103, 116				
ancho	b	4	0.1016	0.00635	0.0889
altura	h	6	0.1524	0.00635	0.1397
104	104, 117				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	6	0.1524	0.001905	0.14859
105	105,118				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	6	0.1524	0.001905	0.14859
119	119-123				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
128	128-133				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239
134	134-136				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
137	137-139				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
155	155				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
156	156				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
157	157				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
158	158				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159

Grupo	Elementos	Perfil	Dimensión exterior [m]	Espesor [m]	Dimensión interior [m]
159	159				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
160	160				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
161	161-164				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239
165	165,168,169,172				
ancho	b	2	0.0508	0.003048	0.044704
altura	h	4	0.1016	0.003048	0.095504
166	166,167,170,171				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239
189	189,190,191,192				
ancho	b	4	0.1016	0.00635	0.0889
altura	h	4	0.1016	0.00635	0.0889
193	193,194				
ancho	b	4	0.1016	0.00635	0.0889
altura	h	4	0.1016	0.00635	0.0889
195	195				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
196	196,197				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	4	0.1016	0.001905	0.09779
198	198,199				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
200	200-203				
ancho	b	4	0.1016	0.00635	0.0889
altura	h	4	0.1016	0.00635	0.0889
204	204,205				
ancho	b	4	0.1016	0.00635	0.0889
altura	h	4	0.1016	0.00635	0.0889

Grupo	Elementos	Perfil	Dimensión exterior [m]	Espesor [m]	Dimensión interior [m]
206	206				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
207	207,208				
ancho	b	4	0.1016	0.00635	0.0889
altura	h	4	0.1016	0.00635	0.0889
209	209,210				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
211	211,213				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	2	0.0508	0.001905	0.04699
212	212,214				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	2	0.0508	0.001905	0.04699
215	215,216				
ancho	b	6	0.1524	0.005588	0.141224
altura	h	4	0.1016	0.005588	0.090424
217	217,219				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	2	0.0508	0.001905	0.04699
218	218,220				
ancho	b	3	0.0762	0.001905	0.07239
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239
221	221,223				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	4	0.1016	0.001905	0.09779
222	222,224				
ancho	b	6	0.1524	0.003048	0.146304
altura	h	4	0.1016	0.003048	0.095504
225	225,227				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
226	226,228				
ancho	b	3	0.0762	0.001905	0.07239
altura	h	3	0.0762	0.001905	0.07239

Grupo	Elementos	Perfil	Dimensión exterior [m]	Espesor [m]	Dimensión interior [m]
229	229,230				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
231	231				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
232	232,234				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
233	233				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
235	235,237				
ancho	b	6	0.1524	0.003048	0.146304
altura	h	4	0.1016	0.003048	0.095504
236	236				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
238	238,240				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
239	239				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
241	241,250				
ancho	b	6	0.1524	0.001905	0.14859
altura	h	4	0.1016	0.001905	0.09779
242	242,251				
ancho	b	6	0.1524	0.003048	0.146304
altura	h	4	0.1016	0.003048	0.095504
243	243,244,252,253				
ancho	b	6	0.1524	0.003048	0.146304
altura	h	4	0.1016	0.003048	0.095504
245	245,246,254,255				
ancho	b	6	0.1524	0.003048	0.146304
altura	h	4	0.1016	0.003048	0.095504

Grupo	Elementos	Perfil	Dimensión exterior [m]	Espesor [m]	Dimensión interior [m]
247	247,256				
ancho	b	6	0.1524	0.001905	0.14859
altura	h	4	0.1016	0.001905	0.09779
248	248,249,257,258				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	2	0.0508	0.001905	0.04699
259	259,261				
ancho	b	3	0.0762	0.001905	0.07239
altura	h	2	0.0508	0.001905	0.04699
260	260,262				
ancho	b	3	0.0762	0.001905	0.07239
altura	h	2	0.0508	0.001905	0.04699
263	263				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
264	264				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
265	265				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
266	266,267				
ancho	b	1	0.0254	0.001905	0.02159
altura	h	1	0.0254	0.001905	0.02159
268	268-270				
ancho	b	2	0.0508	0.001905	0.04699
altura	h	4	0.1016	0.001905	0.09779
271	271-274				
ancho	b	4	0.1016	0.001905	0.09779
altura	h	4	0.1016	0.001905	0.09779
279	279,280				
ancho	b	4	0.1016	0.00635	0.0889
altura	h	4	0.1016	0.00635	0.0889
281	281,282				
ancho	b	4	0.1016	0.00635	0.0889
altura	h	4	0.1016	0.00635	0.0889