



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

Plan de Trabajo de fin de Carrera titulado:

Diseño mediante simulación estructural de un elevador para estacionamiento de vehículo de dos torres de hasta 3.5 toneladas

Realizado por:

BYRON EDUARDO CÁRDENAS JÁCOME

Director del proyecto:

MSc. JAIME VINICIO MOLINA OSEJOS

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ

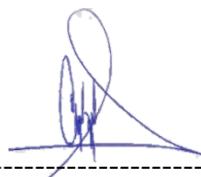
QUITO, 25 de ENERO del 2024

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, **BYRON EDUARDO CÁRDENAS JÁCOME**, ecuatoriano, con Cédula de ciudadanía N°**1717633935**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.

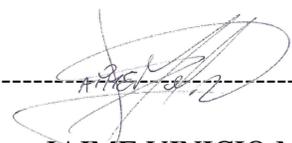


Byron Eduardo Cárdenas Jácome

C.I.: 1717633935

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.



Master JAIME VINICIO MOLINA OSEJOS

LOS PROFESORES INFORMANTES:

EDILBERTO ANTONIO LLANES CEDEÑO

DIEGO FERNANDO BUSTAMANTE VILLAGOMEZ

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal examinador.



Ing. EDILBERTO ANTONIO LLANES
CEDEÑO

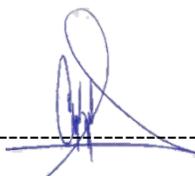


Ing. DIEGO FERNANDO BUSTAMANTE
VILLAGOMEZ

Quito, 25 de ENERO de 2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'B' followed by a surname, written over a horizontal dashed line.

Byron Eduardo Cárdenas Jácome

C.I.: 1717633935

DEDICATORIA

A mi familia, mi raíz, mi soporte y mi fuerza, los que siempre están en mis buenos y malos momentos, los que sé que siempre estarán. Mi Team Cárdenas Jácome, We Rock It!

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen, por la salud, protección y por poner en mi camino a las personas correctas, que aportaron con su granito de arena en mi día a día para poder cumplir esta meta tan importante en mi vida.

A David Cárdenas, por su apoyo y conocimiento compartido, por su paciencia y tiempo brindado.

A mi tutor, Jaime Molina, por su paciencia, tiempo dedicado y enseñanzas impartidas.

A mis padres, por su amor, por siempre estar presente.

A mis hermanos, por su amor y preocupación, por su apoyo en todo sentido.

A Gladys Olivo, mi abuela, por su apoyo y colaboración en mi camino universitario y a mis abuelos por su preocupación e incondicionalidad.

ÍNDICE

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS	II
INDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE TABLAS	XIII
Resumen.....	XIV
Introducción	XVI
Objetivos.....	XVII
Objetivo General del estudio.....	XVII
Objetivos específicos.....	XVII
Planteamiento del Problema	XVIII
<i>Justificación</i>	XVIII
1. Estudio del Arte	16
1.1 Elevadores de Autos.....	16
1.2 Estacionamientos verticales	16
<i>1.2.1 Historia</i>	16
<i>1.2.2 Tipos de estacionamientos verticales</i>	17
1.3 Estructuras Metálicas	20
<i>1.3.1 Estructuras Metálicas en elevadores de autos</i>	20
<i>1.3.2 Diseño de estructura</i>	21

1.4 Análisis de carga y esfuerzo.....	21
1.5 Esfuerzo.....	22
1.6 Esfuerzos normales para vigas a flexión.....	23
1.7 Diagramas de carga y de momento.....	24
1.8 Cilindro hidráulico.....	24
1.9 Simulación Estructural.....	26
1.9.1 Método de los elementos finitos.....	26
1.10 Softwares de Simulación.....	27
1.10.1 SolidWork.....	28
1.11 Definición del producto.....	29
1.12. Diseño conceptual.....	30
1.13 Diseño de materialización.....	32
2. Metodología.....	34
2.1 Etapa 1: Definición del producto.....	35
2.1.1 Especificaciones técnicas.....	36
2.2 Etapa 2: Diseño conceptual.....	37
2.2.1 Módulo 1: Posicionar el vehículo.....	39
2.2.2 Módulo 2: Soportar Carga.....	44
2.2.3 Solución conceptual de la función global.....	46
3.3 Etapa 3: Diseño de Materialización.....	47

3.3.1 Materialización módulo 1.....	47
2.3.2 Materialización módulo 2.....	58
2.4 Pre Procesamiento.....	61
3. Resultados.....	65
3.1 Simulación columna perfil HB 220 SimSolid.....	66
3.2 Columna perfil cuadrado.....	68
3.3 Columna Perfil Circular.....	70
3.4 Validación Simulaciones.....	72
4. Discusión de Resultados.....	76
5. Conclusiones.....	79
6. Recomendaciones.....	80
REFERENCIAS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Primeros estacionamientos verticales.....	16
Figura 2. Estacionamientos de plataformas simples.....	17
Figura 3. Estacionamientos de plataformas dobles.....	18
Figura 4. Sistemas de desplazamiento bidimensional.....	19
Figura 5. Esquema de estacionamientos circulares.....	19
Figura 6. Diagrama de cuerpo libre de una viga empotrada.....	22
Figura 7. Viga sometida a flexión.....	23
Figura 8. Distribución de esfuerzos en la viga.....	23
Figura 9. Análisis de Vigas en solidworks.....	24
Figura 10. Cilindro hidráulico: a) De simple efecto. b) De doble efecto.....	25
Figura 11. Análisis de elementos finitos.....	27
Figura 12. Análisis de elementos finitos.....	28
Figura 13. Esquema del diagrama de bloque con enlaces.	31
Figura 14. Esquema del proceso creativo.....	32
Figura 15. Pasos del diseño de materialización.	32
Figura 16. Proceso de diseño.....	34
Figura 17. Función global de la estructura del elevador de autos – Nivel 0.....	38
Figura 18. Subfunciones de función global de la estructura del elevador de autos – Nivel 1	
Figura 19. Esquema de la estructura modular.....	38
Figura 20. Alternativa 1 – Sujeción del chasis inferior.....	39
Figura 21. Alternativa 2 – Plataforma.....	40
Figura 22. Perfiles: cuadrado, W y circular.....	45
Figura 23. Pernos de anclaje en una columna de elevador de autos.....	45
Figura 24. Dimensiones del vehículo Chevrolet Tahoe 2023.....	47

Figura 25. Esquema de la plataforma	48
Figura 26. Esquema de las vigas secundarias – caso crítico.....	48
Figura 27. Distribución típica del peso del vehículo	49
Figura 28. Capacidades de carga y peso - Chevrolet Tahoe	49
Figura 29. Diagrama de cuerpo libre viga secundaria. Fuente: Propia.....	50
Figura 30. Diagrama de fuerza cortante - viga secundaria	51
Figura 31. Diagrama de momento flector - viga secundaria.....	51
Figura 32. Esquema de caso crítico - viga principal.....	53
Figura 33. Diagrama de cuerpo libre de la viga principal.....	54
Figura 34. Diagrama de fuerza cortante de la viga principal	55
Figura 35. Diagrama de momento flector de la viga principal	55
Figura 36. Esquema de la plataforma	57
Figura 37. Diagrama de cuerpo libre de la estructura del elevador	58
Figura 38. Catálogo DISMETAL perfil HEB.....	61
Figura 39. Estructura de elevador - columnas H220B – SolidWorks.....	62
Figura 40. Estructura de elevador - columnas cuadradas – SolidWorks	62
Figura 41. Estructura de elevador - columnas circulares - SolidWorks	62
Figura 42. Estructura de elevador - columnas H220B – SimSolid.....	63
Figura 43. Conexiones de estructura de elevador - columnas H220B – SimSolid.....	64
Figura 44. Asignación de restricciones de movimiento.....	64
Figura 45. Asignación de cargas.....	65
Figura 46. Resultados simulación desplazamiento Perfil HB220.....	66
Figura 47. Resultados simulación esfuerzo de Von Mises Perfil HB220.....	66
Figura 48. Resultados de la simulación de deformación unitaria. perfil HB220	67
Figura 49. Resultados simulación esfuerzo de Von Mises Perfil Cuadrado.....	68

Figura 50. Resultados simulación desplazamiento Perfil Cuadrado.....	68
Figura 51. Resultados de la simulación de deformaciones unitaria, perfil circular	69
Figura 52. Resultados simulación esfuerzo de Von Mises Perfil Circular	70
Figura 53. Resultados simulación desplazamiento Perfil Circular	71
Figura 54. Resultados de la simulación de deformación unitaria con columnas circulares	71
Figura 55. Diagrama de cuerpo libre de la viga principal.....	72
Figura 56. Diagrama de cuerpo libre – cortes.....	73
Figura 57. Deflexión en la viga principal	74
Figura 58. Diagrama de cuerpo libre viga secundaria.	75
Figura 59. Esquema del corte en la viga secundaria.....	75
Figura 60. Alternativa seleccionada de la estructura de elevador de autos para estacionamientos verticales.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Lista de referencia de especificaciones técnicas.....	29
Tabla 2. Características técnicas de la estructura del elevador de autos.....	37
Tabla 3 Evaluación del peso ponderado de cada criterio.....	41
Tabla 4 Evaluación del peso específico de criterio seguridad	42
Tabla 5. Evaluación del peso específico de criterio facilidad de uso	42
Tabla 6. Evaluación del peso específico de criterio estructura sencilla.....	43
Tabla 7. Evaluación del peso específico de criterio menor costo	44
Tabla 8 Evaluación de las alternativas de solución – Módulo 1	44
Tabla 9. Soluciones conceptuales de la estructura funcional del elevador de autos.....	46
Tabla 10. Resultados Perfil H.....	77
Tabla 11. Resultados Perfil cuadrado	77
Tabla 12. Resultados Perfil circular	78

Resumen

El presente estudio muestra el procedimiento seguido para determinar el diseño estructural de un elevador de autos de capacidad máxima 3500 kg. El objetivo del estudio es identificar la forma, el material y los métodos de acoples de los distintos elementos que conforman la estructura del elevador de autos, para ello, se emplea la metodología del diseño concurrente propuesta por Carles Riba que divide al proceso de diseño en 3 etapas: definición del producto, diseño conceptual y diseño de materialización. En la primera etapa se obtienen las especificaciones técnicas del elevador a partir de los requerimientos de los usuarios, en la segunda etapa se genera la solución conceptual del elevador y en la tercera etapa se determinan mediante cálculos y simulaciones la forma y el material de cada uno de los elementos que conforman la estructura del elevador. El estudio muestra que el elevador puede fabricarse mediante el uso de perfiles metálicos disponibles en el mercado ecuatoriano que actúan como vigas y columnas, además, presenta que se obtiene un factor de seguridad superior a 4 al trabajar con acero A572. Las vigas principales son tubos cuadrados de dimensión 170 x 3 mm, las vigas secundarias 220 x 3 mm y la columna seleccionada es perfil tipo H 220 HB.

Palabras clave: Elevador de autos, factor de seguridad, estructura metálica, simulación computacional.

Abstract

The present study shows the procedure followed to determine the structural design of a car lift with a maximum capacity of 3500 kg. The objective of the study is to identify the shape, material and coupling methods of the different elements that make up the structure of the car lift. To do this, the concurrent design methodology proposed by Carles Riba is used, which divides the design process into 3 stages: product definition, conceptual design and materialization design. In the first stage, the technical specifications of the elevator are obtained from the users' requirements, in the second stage the conceptual solution of the elevator is generated and in the third stage the shape of each of the elements is determined through calculations and simulations. that make up the structure of the elevator. The study shows that the elevator can be manufactured by using metal profiles available in the Ecuadorian market that act as beams and columns, in addition, it shows that a safety factor greater than 4 is obtained when working with A572 steel. The main beams are square tubes measuring 170 x 3 mm, the secondary beams are 220 x 3 mm and the selected column is a 220 HB type H profile.

Key Words: Car lift, safety factor, metallic structure, computer simulation.

Introducción

Los primeros elevadores se inventaron con la finalidad de elevar cargas pesadas, los cuales funcionaban con el principio de poleas, luego Ivan Kulibin implementó el primer elevador con un sistema mecánico basado en la transmisión a tornillo. Con esta idea se utilizó el elevador para mercancías y posteriormente para personas a mediados del siglo XVIII. A medida que los automóviles se volvieron más comunes a principios del siglo XX, surgió la necesidad de encontrar formas seguras y eficientes de elevarlos para realizar tareas de mantenimiento. En las primeras décadas del siglo XX, se utilizaron soluciones rudimentarias, como bloques de madera y sistemas de poleas, para elevar vehículos. Sin embargo, estos métodos eran inseguros, incómodos y a menudo ineficientes (Aguilar, 2020).

El verdadero avance en la elevación de vehículos se produjo en la década de 1920 con el desarrollo de los primeros elevadores hidráulicos. Estos dispositivos utilizaban fluidos y cilindros para elevar gradualmente los automóviles a alturas deseables. La invención del elevador hidráulico cambió para siempre la forma en que se realizaban las tareas de mantenimiento y reparación en la industria automotriz. Estos primeros modelos permitían a los mecánicos trabajar de manera más segura y rápida, reduciendo los riesgos de accidentes y mejorando la eficiencia en el taller. La incorporación de tecnología electrónica y controles avanzados permitió un funcionamiento más preciso y seguro. Además, se desarrollaron elevadores de tijera y elevadores portátiles, que ofrecían aún más opciones para el acceso y la elevación de vehículos en diferentes entornos (TAS, 2023).

En la actualidad existen gran cantidad y variedad de elevadores automotrices, ya que no solo se utilizan en talleres para trabajos de mantenimiento sino también para inspecciones técnicas y almacenamiento en garajes,

La capacidad para elevar automóviles a alturas convenientes y sostenerlos de manera segura ha transformado la eficiencia y la seguridad en talleres de reparación, concesionarios de automóviles, estaciones de servicio e incluso garajes privados optimizando el espacio ocupado por los vehículos ya que permite colocar otros vehículos debajo del mismo.

Objetivos

Objetivo General del estudio

Diseñar un elevador electrohidráulico de dos columnas para vehículos de hasta 3,5 toneladas mediante el análisis de los componentes y sus especificaciones técnicas, para que en el lugar que se implementen se incremente la capacidad de parqueo y circulación.

Objetivos específicos

Determinar las cargas que soportaran los diferentes componentes del elevador electrohidráulico mediante el análisis expuesto por el software SolidWorks, para definir las características de los materiales

Asegurar la resistencia de los elementos del sistema elevador mediante análisis computacional por elementos finitos con uso del software SolidWorks, para que el elevador electrohidráulico opere de forma eficiente y segura con vehículos de hasta 3,5 toneladas

Establecer las dimensiones adecuadas de la estructura a partir del análisis con uno de los vehículos más pesados del segmento de livianos (Chevrolet Tahoe modelo 2023) para asegurarse que el levantamiento del auto es estable y confiable.

Planteamiento del Problema

En el Ecuador ha incrementado el uso de automóviles para el uso particular, tanto que en el periodo de enero a abril de 2023 se han vendido 46.555 vehículos nuevos según indica la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (Aeade), lo cual representa un incremento del 11% en comparación con el periodo enero – abril del año 2022 (Coba, 2023).

La escasez de lugares de estacionamiento de vehículos en lugares céntricos de las principales ciudades del Ecuador provoca molestia en los conductores y varias infracciones ya que se estacionan en lugares prohibidos o generan congestión vehicular. De la misma manera en los lugares residenciales no existen suficientes espacios para estacionar vehículos provocando que los residentes busquen alquiler de parqueaderos privados lo cual representa un gasto extra e innecesario para los mismos.

Justificación

Para solucionar esta problemática se ha planteado el presente plan de trabajo el cual realiza el análisis para la implementación de un elevador de vehículos que permita aprovechar el espacio en los lugares previamente designados para estacionamientos, de tal manera que pueda posicionarse un vehículo sobre otro y de esta forma se puede duplicar la capacidad de los estacionamientos.

Actualmente la adquisición de vehículos se encuentra en constante crecimiento, razón por la cual se debe optimizar el espacio existente en parqueaderos de negocios, viviendas, etc. De esta manera se apoya a las ciudades y países en crecimiento, ahorrando tiempo, espacio y evitando el tráfico generado por vehículos estacionados en la vía pública.

1. Estudio del Arte

1.1 Elevadores de Autos

Los elevadores son utilizados para todo tipo de vehículos, desde motocicletas hasta grandes automóviles su principal función es facilitar los trabajos de mantenimiento, revisión y reparación en partes de difícil acceso. Estos elevadores son equipos que poseen soportes de carga los cuales son guiados por una estructura portante diseñada para la elevación de los vehículos (Tamborero, 2017).

1.2 Estacionamientos verticales

Son elevadores de vehículos ubicados en lugares de parqueo reducidos los cuales permiten utilizar el uso del espacio superior, generando una solución para lugares con alta demanda de vehículos en los cuales los parqueaderos se saturan rápidamente. La instalación de los mismos puede realizarse en niveles superiores como inferiores de manera que los vehículos se posicionen sobre el eje vertical (López, 2016).

1.2.1 Historia

Los primeros elevadores aparecieron en 1932, en New York y en Chicago, los cuales se mostraron como un invento innovador y necesario, dado que solucionaba el problema de espacio en lugares céntricos de las grandes ciudades, en la figura 1 se puede apreciar los estacionamientos verticales implementados en estas ciudades (Kareyan, 2017).

Figura 1.

Primeros estacionamientos verticales



Nueva York

Chicago

Fuente: (Kareyan, 2017)

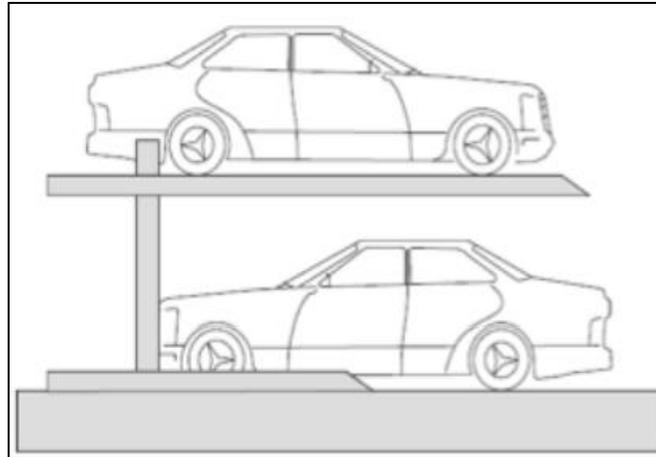
1.2.2 Tipos de estacionamientos verticales

Actualmente existen varios diseños de estacionamientos verticales en el mercado, los cuales tienen diferente capacidad de vehículos, entre estos diseños se tienen los siguientes:

1.2.2.1 Estacionamientos de plataformas simples. Estos elevadores son utilizados como estacionamientos verticales en casas, empresas, negocios, etc., dado que permite estacionar dos vehículos en el espacio de uno, posicionándose sobre el vehículo, la figura 2 muestra la disposición de este estacionamiento (López, 2016).

Figura 2.

Estacionamientos de plataformas simples

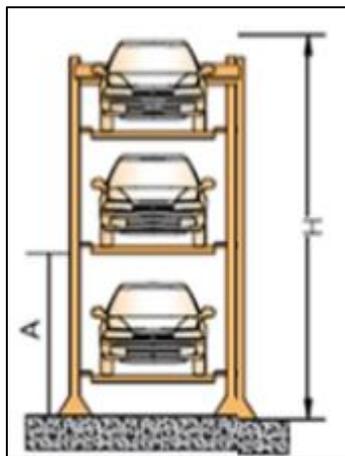


Fuente: (López, 2016)

1.2.2.2 Estacionamientos de plataformas dobles. Estos estacionamientos son similares a los anteriores, solo que implementan una plataforma más para estacionar un vehículo adicional, aprovechando más el espacio y colocando 3 automóviles en una sola columna como se puede ver en la figura 3 (López, 2016).

Figura 3.

Estacionamientos de plataformas dobles



Fuente: (López, 2016)

1.2.2.3 Estacionamientos de desplazamiento bidimensional. Son sistemas que no tienen restricciones en dirección horizontal ni vertical, de manera que se puede ubicar el vehículo en un plano bidimensional, facilitando el acceso a los estacionamientos dado que el elevador se desplaza mostrando el espacio vacante como se muestra en la figura 4 (López, 2016).

Figura 4.

Sistemas de desplazamiento bidimensional

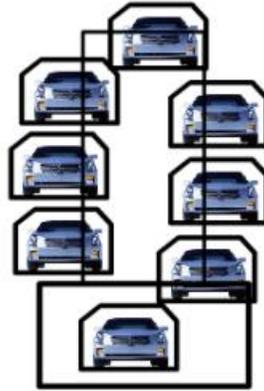


Fuente: (López, 2016)

1.2.2.5 Estacionamientos circulares. Este tipo de elevadores tienen un mecanismo giratorio que permite que los automóviles puedan ser ubicados en un lugar específico, facilitando la recepción y la entrega de los vehículos, basa su principio de funcionamiento en plataformas colgantes que realizan un movimiento giratorio a través de un sistema de grúas y una cadena de transmisión, en la figura 5 se muestra un esquema de este tipo de estacionamientos (López, 2016).

Figura 5.

Esquema de estacionamientos circulares



Fuente: (López, 2016)

1.3 Estructuras Metálicas

Las estructuras metálicas llevan su nombre dado que la mayor parte de materiales metálicos, por lo general de acero. Las estructuras de acero tienen varios usos, el principal uso es en el sector industrial por sus características de rigidez, estabilidad y resistencia. Las estructuras metálicas están conformadas por una estructura principal, que proporciona estabilidad, y la estructura secundaria, que funciona como fachada (Codimec, 2016).

El ensamblaje de la estructura se lo lleva a cabo con diferentes tipos de uniones, entre los principales están unión por soldadura y unión por pernos, la unión por soldadura es la más utilizada en estructuras grandes y consiste en la unión de dos piezas metálicas por medio de calor y la unión por pernos es más rápida de emplear y se utiliza en estructuras de acero ligeras (Díaz, 2020).

1.3.1 Estructuras Metálicas en elevadores de autos

Las estructuras para elevadores de autos tienen que ser resistentes por la carga a la que estarán sometidas por lo que requiere de un análisis previo para elegir el diseño adecuado, por lo que se analizan todas las partes que conforman la estructura del elevador. La base de la estructura proporciona estabilidad a toda la estructura, por esta razón se mantiene empotrada al suelo.

1.3.2 Diseño de estructura

Los parámetros del diseño de la estructura se establecen de acuerdo a la aplicación y las necesidades del elevador, las principales características que se tienen que tener en cuenta es el peso y tamaño promedio del vehículo, además de los factores de seguridad de la estructura, los puntos que se deben tener en cuenta son: peso del elevador, peso del vehículo promedio, altura de elevación, dimensiones estándar de un vehículo promedio (Murillo, 2011).

Un punto importante a considerar en el diseño de una estructura que está sometida a una carga es determinar el factor de seguridad, dado que el esfuerzo no puede variar en forma lineal con la carga se expresa este factor en términos del esfuerzo con la ecuación 1.1 en la que el esfuerzo y la resistencia deben estar aplicadas en la misma ubicación crítica de la estructura (Budynas & Nisbett, 2011).

$$n_d = \frac{\text{resistencia de pérdida de la función}}{\text{esfuerzo permisible}} = \frac{S}{\sigma} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Para seleccionar los elementos que conforman las estructuras metálicas se debe calcular las cargas a las que es sometida la misma, para ello se evalúa la estructura en equilibrio estático tomando en cuenta las reacciones y fuerzas externas que actúan sobre la estructura, el método de nodos es el más utilizado para análisis estructural en este se evalúa el equilibrio estático en los nodos de la estructura (Budynas & Nisbett, 2011).

1.4 Análisis de carga y esfuerzo

En el análisis de carga y esfuerzo se evalúan las fuerzas que actúan sobre las vigas que forman parte de la estructura metálica, por lo general se realizan estos cálculos en una viga crítica.

1.4.1 Fuerza cortante y momentos en vigas

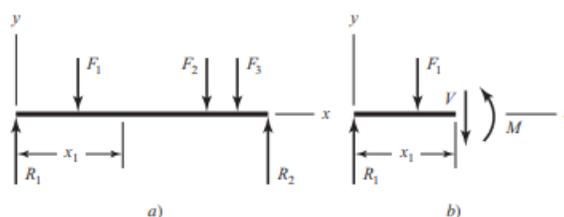
Para analizar esta viga se toma de ejemplo la viga de la figura 6, la cual está apoyada en dos puntos que generan reacciones R1 y R2 y es sometida a 3 fuerzas en diferentes puntos, F1, F2

y F_3 , estas generan un momento flector en la viga M y una fuerza cortante interna V , la fuerza cortante se obtiene realizando una sumatoria de las fuerzas actuantes en la sección izquierda y el momento flector es una suma de los momentos generados por las fuerzas, de manera que la fuerza cortante y el momento flector se relacionan entre sí por medio de la ecuación 1.2 (Budynas & Nisbett, 2011).

$$V = \frac{dM}{dx} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Figura 6.

Diagrama de cuerpo libre de una viga empotrada



Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011)

1.5 Esfuerzo

La distribución de fuerzas que actúa sobre un punto tiene componentes de esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante tangencial (τ). La distribución uniforme del esfuerzo se llama tensión pura, por lo que el esfuerzo uniformemente distribuido se calcula con la ecuación 1.3, y el esfuerzo uniformemente distribuido conocido como cortante directo se calcula por medio de la ecuación 1.4 en la cual V es la fuerza cortante y el esfuerzo es uniforme en toda la sección transversal (Budynas & Nisbett, 2011).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{ecuación 1.3}$$

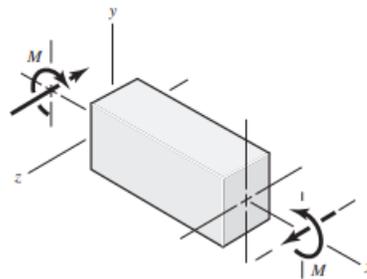
$$\tau = \frac{V}{A} \quad \text{ecuación 1.4}$$

1.6 Esfuerzos normales para vigas a flexión

Para calcular las vigas a flexión se supone que la viga está sometida a flexión pura, que el material es isotrópico y homogéneo, que cumple con la ley de Hooke, que es una viga recta con sección transversal constante en su longitud, que tiene un eje de simetría en el plano de flexión. En base a estos supuestos la figura 7 representa una viga sometida a flexión (Budynas & Nisbett, 2011).

Figura 7.

Viga sometida a flexión



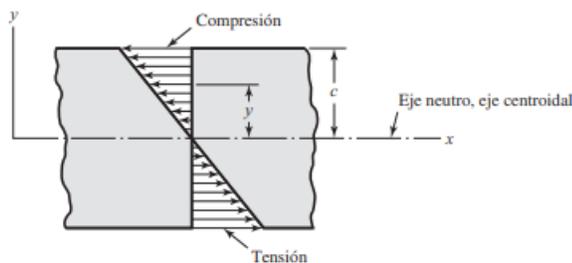
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011)

La distribución de esfuerzo en esta viga se muestra en la figura 8, donde se puede ver que la máxima distribución de esfuerzo se da donde el eje y tiene mayor magnitud, siendo σ_{max} el esfuerzo máximo que puede calcularse con la ecuación 1.5.

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad \text{ecuación 1.5}$$

Figura 8.

Distribución de esfuerzos en la viga



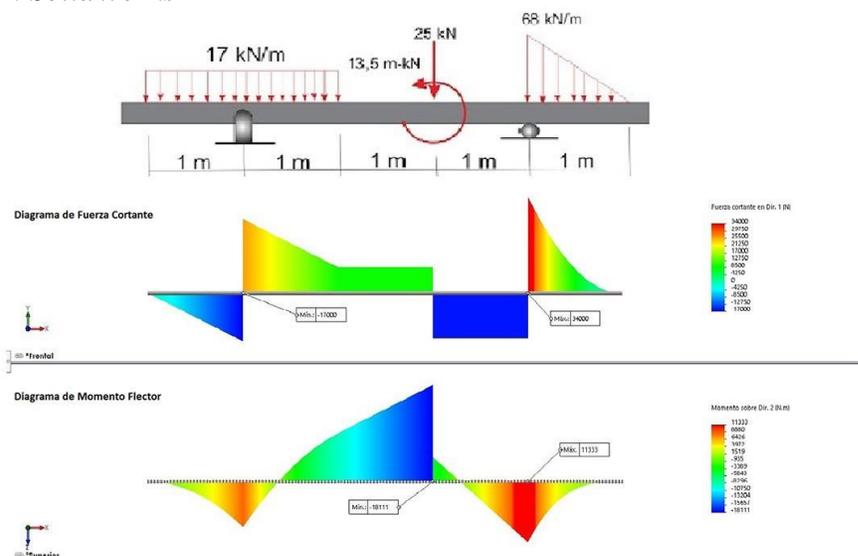
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011)

1.7 Diagramas de carga y de momento

Estos diagramas son una representación gráfica que permite analizar las cargas y momentos que se aplican a la viga, para facilitar el estudio de la misma y las comparaciones en los puntos críticos. Estos pueden ser determinados de manera analítica, determinando las fuerzas y reacciones que tiene la viga, para obtener los momentos que actúan en la misma y realizar los diagramas, pero también son obtenidos por medio de softwares de diseño CAD en los cuales se ingresan los parámetros característicos de la viga y las fuerzas que actúan en la misma, un ejemplo de este diagrama se puede ver en la figura 9.

Figura 9.

Análisis de Vigas en SolidWorks



Fuente: (Dassault Systems, 2018)

1.8 Cilindro hidráulico

El cilindro hidráulico es un actuador mecánico empleado para dar fuerza en un recorrido lineal, la energía que brinda la fuerza es proporcionada por un fluido hidráulico presurizado. el cilindro está compuesto de dos piezas, un cilindro y un émbolo móvil unido a un vástago, el pistón divide la parte interior del cilindro en dos cámaras.

La fuerza es constante durante toda la carrera del cilindro y la velocidad depende de la superficie del pistón y del caudal del fluido, la fuerza proporcionada es función de la superficie activa del embolo y de la presión máxima admisible, como se puede ver en la ecuación 1.6

$$F = P \times A \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Los cilindros hidráulicos se clasifican en cilindros de simple efecto y cilindros de doble efecto, estos se encuentran en la figura 10, y las principales características distintivas de estos cilindros son: (Olesa, 2018)

En el cilindro de simple efecto la generación de la fuerza es en una sola dirección, y en el cilindro de doble efecto es en ambas direcciones.

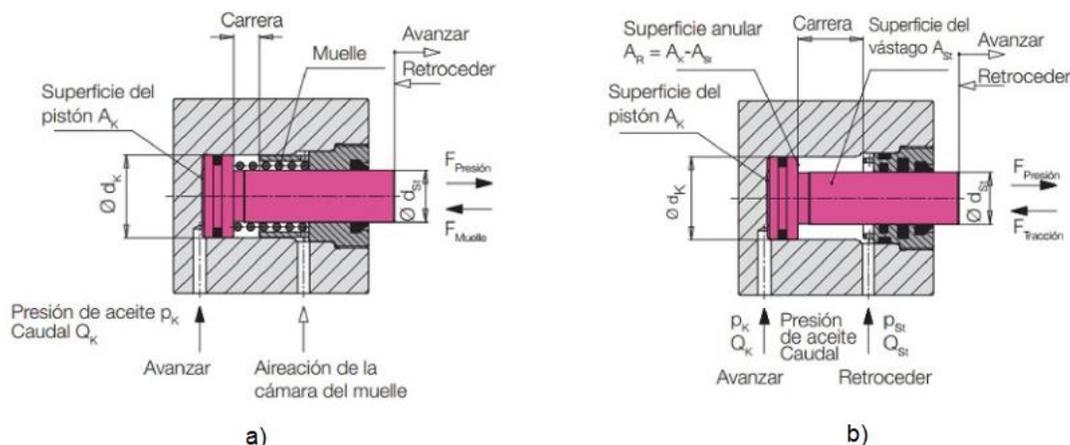
La fuerza de retorno es pequeña en el cilindro de simple efecto, mientras que en el de dos efectos es elevada.

Debido al retroceso del muelle en el cilindro de simple efecto no es posible definir exactamente el tiempo de desplazamiento, y en el cilindro de doble efecto es fácilmente definir el tiempo con exactitud.

En el cilindro de simple efecto no se tiene mucha seguridad de funcionamiento dado que es posible tener fallos por la ruptura de muelle, y en el de doble efecto hay mayor seguridad de funcionamiento.

Figura 10.

Cilindro hidráulico: a) De simple efecto. b) De doble efecto



Fuente: (Olesa, 2018)

1.9 Simulación Estructural

La simulación estructural es un método matemático que permite analizar el comportamiento de la estructura para optimizar el diseño y predecir posibles fallos, se puede realizar en varios paquetes CAD en los que se puede crear un modelo sólido con el método de elementos finitos para proporcionar una solución precisa que permita encontrar deflexiones y esfuerzos presentes en la estructura metálica (Budynas & Nisbett, 2011).

1.9.1 Método de los elementos finitos

Es un método matemático que facilita resolver ecuaciones diferenciales que están asociadas a cuestiones físicas de las estructuras, permite analizar cualquier geometría y obtener valores de deformaciones y tensiones, así como también representar diferentes escenarios para mejorar el diseño y evaluar criterios de resistencia, rigidez o fatiga para obtener la precisión deseada (Ingenieros Asesores, 2023).

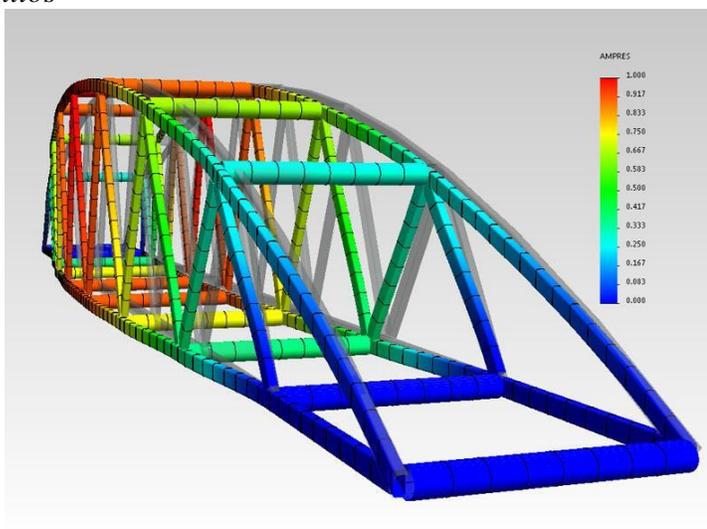
El método de elementos finitos subdivide la pieza a analizar en partes pequeñas que permite resolver problema subdividiéndolo en problemas más simples realizando las tareas con eficiencia. Estos elementos están unidos entre sí por puntos nodales y su conjunto forma la malla, dado que se resuelven los elementos con ecuaciones matemáticas que rigen su comportamiento, el resultado

es un valor aproximado, por ello mientras sea menor el número de elementos en una malla se podrán obtener resultados más precisos (Ingenieros Asesores, 2023).

Los nuevos programas proporcionan mejores herramientas de simulación de estructuras, las cuales simplifican la geometría y el mallado para realizar el análisis de estructuras más complejas para evaluar distintos escenarios de una estructura y comparar los resultados del diseño con mejor precisión (Frias, 2004).

Figura 11.

Análisis de elementos finitos



Fuente: (GAMT, 2022)

1.10 Softwares de Simulación

Son sistemas informáticos que permiten modelar estructuras con procesos determinados, principalmente basa su funcionamiento en algoritmos matemáticos en su programación dependiendo la modelación requerida. Existen varios softwares de simulación, cada uno con características diferentes dependiendo el tipo de elemento a analizar o los resultados que se desea obtener (GLS Industrias, 2021).

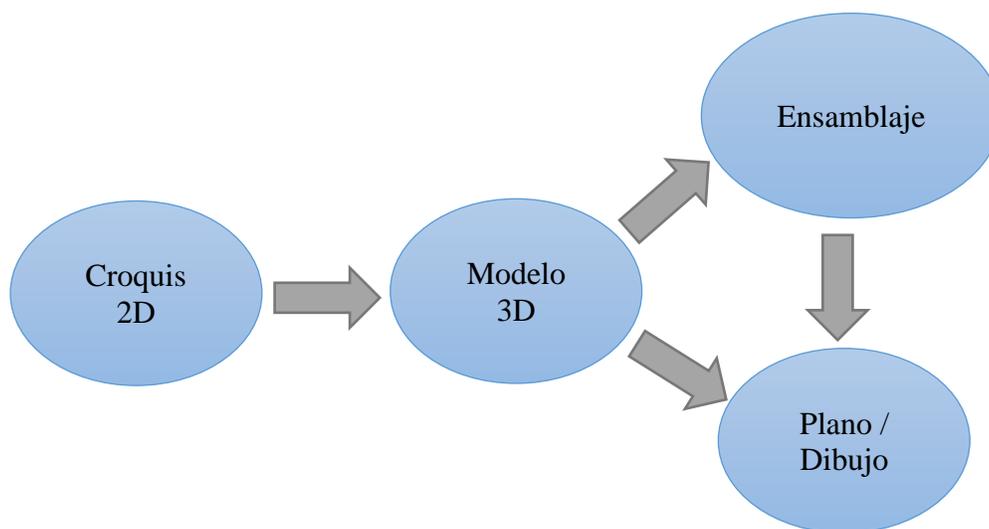
1.10.1 SolidWorks

Es un software que permite modelar piezas y ensambles 3D de diseño mecánico utilizando un entorno gráfico, se basa en el modelado paramétrico que facilita crear y modificar variantes de diseño. Es un software de fácil uso con variedad de herramientas que permiten crear, validar, comunicar y gestionar el desarrollo de un diseño de principio a fin.

Para la elaboración de un modelo en el software se debe seguir un proceso que se muestra en la figura 12 se empieza con el dibujo de la pieza en un croquis 2D en el plano de trabajo, después se va creando el modelo 3D por medio de operaciones de extrusión, revolución, etc. Luego de crear todas las piezas se procede con el ensamble de las mismas estableciendo uniones por medio de relaciones geométricas. Y por último se procede al análisis de todo el diseño verificando el movimiento de las piezas ensambladas.

Figura 12.

Análisis de elementos finito



Fuente: (GAMT, 2022)

Para realizar el diseño propuesto se emplea la metodología del diseño concurrente propuesto por Carles Riba, la misma que toma en cuenta los requisitos y opiniones de distintos

departamentos que conforman la empresa y no únicamente el departamento de diseño. La metodología divide al proceso de diseño en cuatro etapas subsecuentes: definición del producto, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle (Riba, 2002).

1.11 Definición del producto

En primera etapa denominada definición del producto se estudian las posibilidades, límites y alcances del problema. En esta etapa se detallan aspectos de operación principal, entorno donde se encontrará operando, aspectos legales, políticas generales de la empresa, es decir todos los aspectos necesarios que permiten definir al producto. El resultado de la primera etapa son las especificaciones técnicas (Riba, 2002).

La especificación técnica se refiere al conjunto de características y prestaciones que se usan como guías para el diseño y su desarrollo. Se pueden clasificar dos tipos de especificaciones requerimiento o especificación necesaria y deseo o especificación conveniente. El primer grupo se refiere al conjunto de especificaciones sin las cuales la máquina no tiene objetivo y el segundo se refiere a aquellas especificaciones que mejoran aspectos determinadas de la misma sin afectar el objetivo principal. La tabla 1 muestra una lista de referencia de especificaciones técnicas (Riba, 2002).

Tabla 1

Lista de referencia de especificaciones técnicas.

Conceptos	Determinaciones
Función	Funciones principales, ocasionales y accidentales
Dimensiones	Volúmenes, masas, longitud, altura, diámetro, número de elementos, etc.

Movimientos	Desplazamientos y tiempos, trayectorias, velocidades y aceleraciones
Fuerzas	Magnitud, dirección y sentido de las fuerzas, su variación en el tiempo, deformaciones admisibles, etc.
Energía	Accionamientos y convertidores de energía, potencia, rendimiento
Materiales	Preferencias sobre su uso, limitantes de mercado.
Control	Actuadores y sensores, funciones del sistema control, etc.
Fabricación y montaje	Volumen de producción, flexibilidad en fabricación, etc.
Transporte y distribución	Embalaje, transporte, proceso de instalación, puesta a punto, etc.
Vida útil y mantenimiento	Vida prevista, confiabilidad, tipo de mantenimiento
Costes y plazo	Costes de desarrollo, plazos y tiempo de inserción en el mercado.

Fuente: (Riba, 2002)

Se propone el uso de dos herramientas para definir el producto y lograr obtener las especificaciones técnicas necesarias en el estudio. Las herramientas que se usan se denominan estado del arte y benchmarking. El estado del arte es una técnica que se enfoca en realizar una revisión bibliográfica de características funcionales y características físicas del producto que se desea diseñar y el benchmarking es una técnica que consiste en realizar un análisis de productos con características similares disponibles en el mercado (Riba, 2002).

1.12. Diseño conceptual

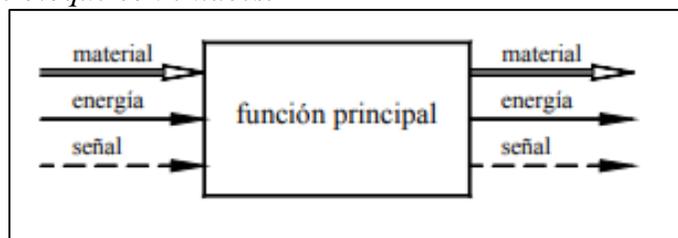
El diseño conceptual se refiere al proceso de obtener una solución válida para cumplir cada una de las especificaciones técnicas que se obtienen en la etapa definición del producto. En todas las etapas de diseño se obtienen soluciones que se evalúan con distintos criterios que constituyen una base para continuar con la siguiente etapa, sin embargo, en la etapa de diseño

conceptual esto toma mayor significado y relevancia. La etapa de diseño conceptual también se conoce como etapa de generación de concepto (Riba, 2002).

El diseño conceptual utiliza una herramienta denominada estructura funcional que por medio de diagrama de bloques secuenciales representa las funciones que debe realizar el producto. Los diagramas de bloques se unen mediante enlaces que representan flujos de energía, materiales y señales entre las funciones. La figura 13 muestra un esquema del diagrama de bloque con enlaces.

Figura 13.

Esquema del diagrama de bloque con enlaces.



Fuente: (Riba, 2002)

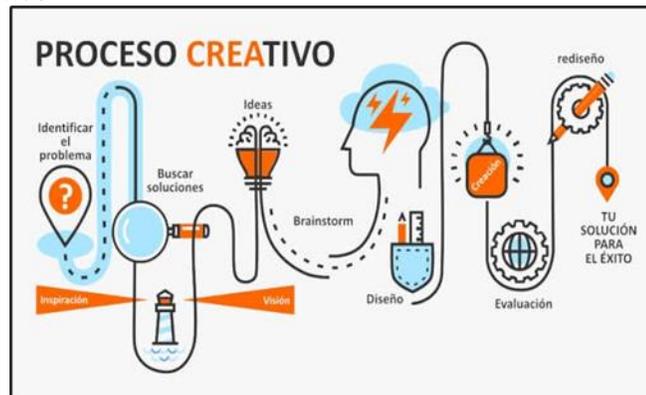
En casos que la función global o principal de un sistema son muy complejos se puede subdividir la función global en varias subfunciones de menor complejidad y esto repetir sucesivamente las veces que sean necesarias. La subdivisión de funciones presenta ventajas como presentar una estructura funcional menos ambigua y facilitar la búsqueda de alternativas de solución. En diseños originales la estructura funcional se desconoce y detallarla forma parte del proceso de diseño, en diseños de adaptación si se conoce la estructura funcional, pero puede variar durante el proceso de diseño, finalmente en diseños de variante si se conoce la estructura funcional, pero esta no varía. En este último caso lo que varía son las alternativas de solución para cumplir la función objetivo (Riba, 2002).

En la etapa de diseño conceptual debido a sus características y objetivos tiene mucha dependencia del proceso creativo. El proceso creativo es aquel que permite desarrollar distintas soluciones a un problema. Desde un punto de vista metodológico se puede describir al proceso

creativo por medio de tres pasos: imponerse al problema, generar ideas y finalmente evaluar y simular soluciones. La figura 14 muestra un esquema del proceso creativo.

Figura 14.

Esquema del proceso creativo



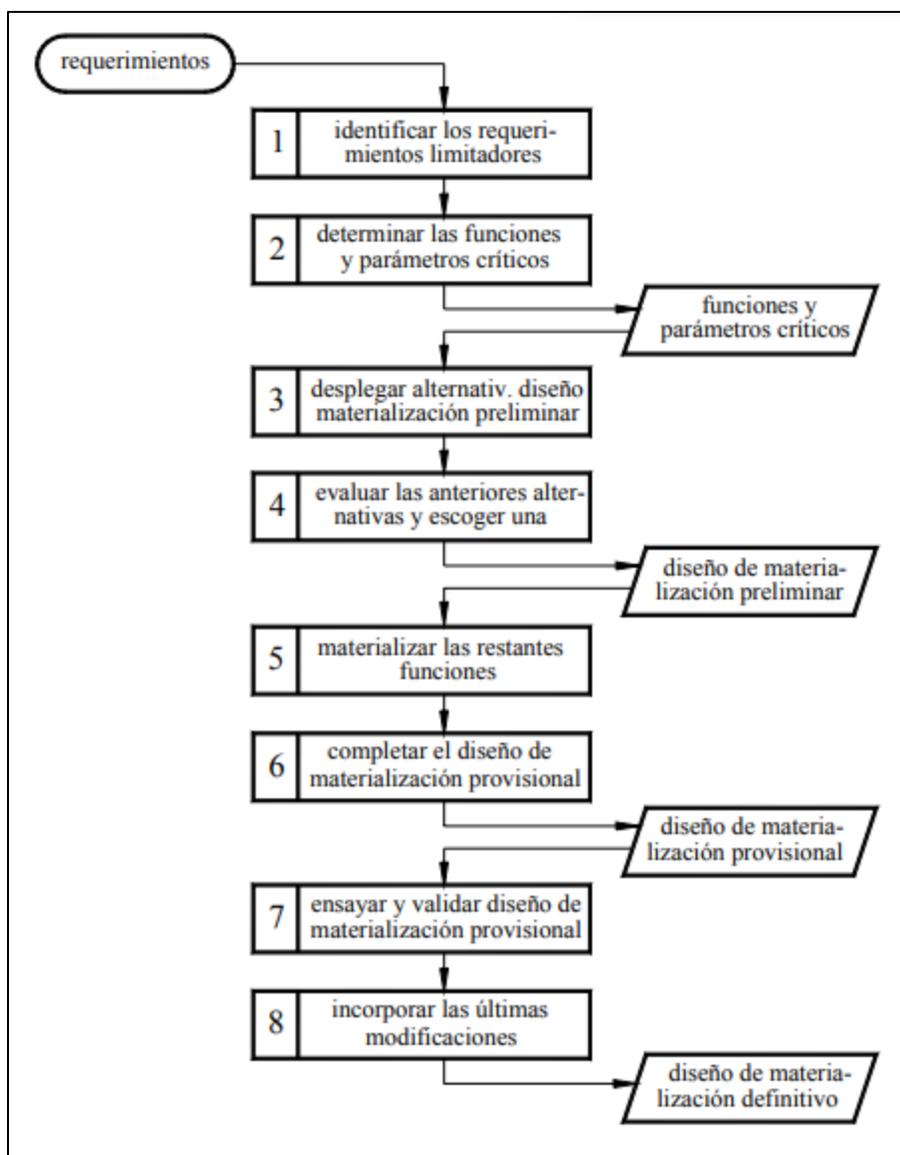
Fuente: (IPP, 2021)

1.13 Diseño de materialización

La tercera etapa denominada diseño de materialización es la etapa en la cual, a partir de un concepto, y tomando en cuenta criterios técnicos y económicos se determina la geometría de los diferentes elementos, piezas y componentes que componen el mecanismo y a la vez se los articula de forma que garanticen el cumplimiento de las funciones. Materializar el concepto incluye las etapas tradicionales de la ingeniería de diseño: calcular, dimensionar elementos, esbozar disposiciones generales, etc. La figura 15 muestra un esquema de los pasos del diseño de materialización (Riba, 2002).

Figura 15.

Pasos del diseño de materialización.



Fuente: (Riba, 2002)

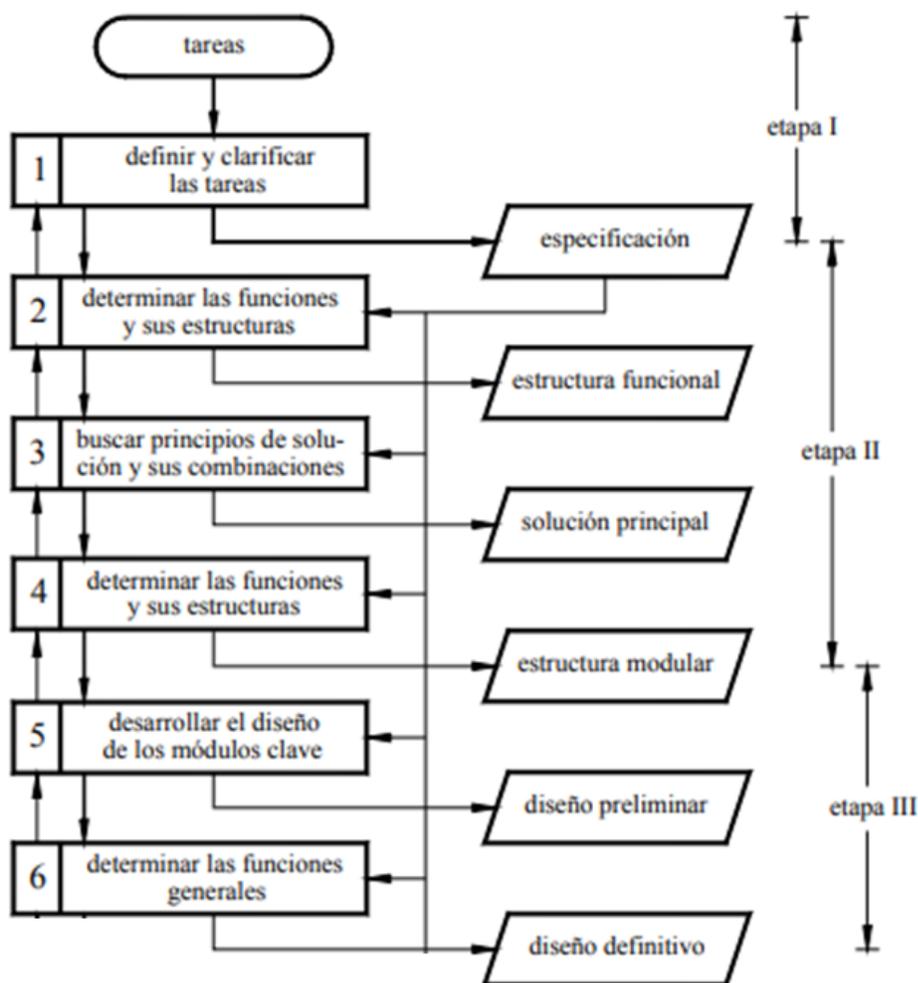
2. Metodología

En el presente estudio se va a simular el comportamiento de elementos estructurales sometidos a cargas generadas por el peso de un vehículo. Para obtener las dimensiones necesarias de los elementos como vigas y columnas que cumplan las necesidades propuestas se propone utilizar la metodología del diseño concurrente propuesta por Carles Riba que divide al proceso de diseño en 4 etapas: definición del producto, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle (Riba, 2002).

En la primera etapa del proceso de diseño se obtienen especificaciones técnicas, en la segunda etapa se realiza análisis funcionales y se obtienen principios de solución, en la tercera parte se realizan cálculos para materializar las soluciones obtenidas en la etapa dos y finalmente en la cuarta etapa del proceso se obtienen documentos relacionados con la fabricación del elemento. El presente trabajo utiliza las tres primeras etapas del proceso de diseño debido a que la cuarta etapa de fabricación excede el alcance del estudio, estas se ven representadas en la figura 16.

Figura 16.

Proceso de diseño



Fuente: (Riba, 2002)

En la siguiente sección se presenta el desarrollo de la metodología de diseño concurrente para obtener las dimensiones de los elementos que conforman la estructura del elevador de autos de dos torres y proceder con las simulaciones que permitan validar los resultados obtenidos. A continuación, se detalla el proceso de diseño estructural de un elevador de autos para estacionamiento vertical de dos torres, siguiendo tres etapas: definición del producto, diseño conceptual y diseño de materialización.

2.1 Etapa 1: Definición del producto

Se desea diseñar la estructura de un elevador de autos de dos torres para estacionamiento vertical que tenga una capacidad de carga de 3.5 toneladas. Para definir las especificaciones

técnicas se presenta el estudio del estado del arte de estructuras de elevadores de autos de dos torres y el benchmarking de estructuras de elevadores de autos de dos torres disponibles en el mercado.

2.1.1 Especificaciones técnicas

La primera etapa del proceso de diseño tiene como objetivo determinar las características del producto que se desea diseñar. Se desea diseñar la estructura de un elevador de autos de dos columnas con una capacidad de carga de 3500 kg. Se propone realizar la estructura con acero A572 ya que se encuentra disponible en el mercado y presenta un esfuerzo de fluencia de 350 MPa, lo que es favorable, ya que trabajar valores de esfuerzo de fluencia del material elevados incrementan el factor de seguridad. La tabla 2 muestra las características técnicas de la estructura del elevador de autos.

Tabla 2.*Características técnicas de la estructura del elevador de autos*

Empresa: Universidad Internacional SEK	Producto: Estructura elevador de autos para parqueaderos verticales.	Fecha inicial: Última revisión: Página 1/1
Especificaciones técnicas		
Concepto	Fecha	Propone R/D Descripción
Fuerzas	30/10/2023	DI R El elevador debe soportar una carga de 3500 kg.
Materiales	30/10/2023	DI R La estructura del elevador se fabrica en acero ASTM A572
Seguridad	30/10/2023	DI R El factor de seguridad de la estructura del elevador es 4.
Dimensiones	30/10/2023	DI R El auto se encuentra suspendido a una altura de 200 cm.
DI = Diseño; R = Requerimiento; D = Deseo		

Fuente: Propia

Al obtener las especificaciones técnicas de la estructura de elevador de autos se procede con la siguiente etapa del diseño: diseño conceptual en la que se establecen las funciones globales o principales del elevador y se generan conceptos de soluciones de cada una de ellas.

2.2 Etapa 2: Diseño conceptual

La función principal de la estructura del elevador de autos es soportar el peso del auto suspendido sin colapsar. Esta función se puede separar en tres funciones secundarias, dos de las

cuales ocurren al mismo tiempo. La figura 17 muestra un esquema de la función global de la estructura del elevador de autos (Nivel 0). La figura 18 muestra un esquema de subdivisiones de la función principal del elevador de autos (Nivel 1).

Figura 17.

Función global de la estructura del elevador de autos – Nivel 0



Fuente: Propia

Figura 18.

Subfunciones de función global de la estructura del elevador de autos – Nivel 1



Fuente: Propia

La figura 17 y 18 representan la estructura funcional de la estructura del elevador de autos. La herramienta estructura modular es una herramienta del diseño concurrente la cual sugiere agrupar una o más funciones en módulos y de esta forma buscar alternativas de solución para cada módulo. Se propone dividir la estructura funcional en dos módulos. La figura 19 muestra un esquema de la estructura modular.

Figura 19.

Esquema de la estructura modular.



Fuente: Propia

El módulo 1 se enfoca en la función relacionada con la forma de ubicar el vehículo en la estructura mientras que el módulo 2 se enfoca en las funciones que garantizan que la estructura sea segura. A continuación, se presenta un análisis del módulo 1 y módulo 2 así como sus alternativas de solución.

2.2.1 Módulo 1: Posicionar el vehículo

El módulo 1 se compone de la función posicionar el vehículo que se refiere a la forma en la que el vehículo se ubica en la estructura. El análisis del estado del arte y de la evaluación del mercado muestra que es popular el uso de estructuras en forma de pinza que sujetan al auto de la parte inferior del chasis. Se propone que la forma de sujetar al vehículo del chasis inferior sea una alternativa de solución. La figura 20 muestra un esquema de la alternativa 1 de solución para el módulo 1.

Figura 20.

Alternativa 1 – Sujeción del chasis inferior



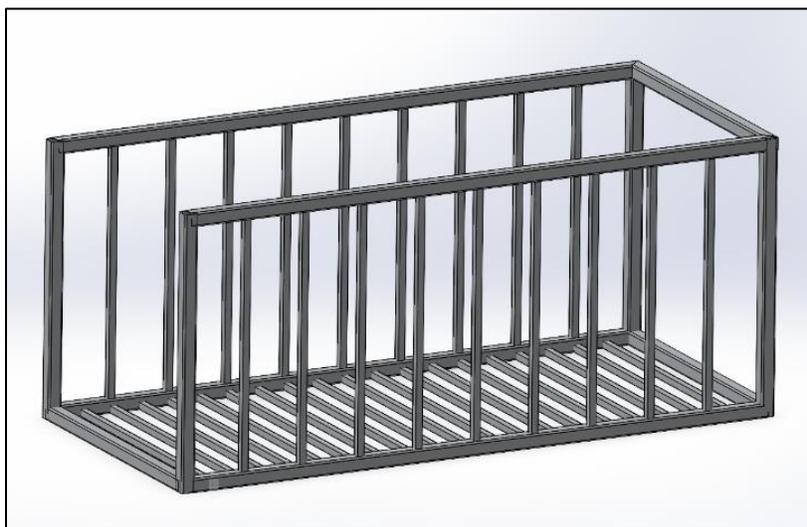
Fuente: (RSF, 2021)

Se propone otra alternativa de solución para el módulo 1 la cual consiste en que la sujeción del vehículo ocurra por medio de las llantas, es decir que el vehículo se ubique en una plataforma.

La figura 21 muestra la alternativa 2 de solución para el módulo 1

Figura 21.

Alternativa 2 – Plataforma



Fuente: Propia

2.1.1.1 Evaluación de alternativas módulo 1. Se tiene dos alternativas para posicionar el auto. Las alternativas se evalúan en base al método ordinal corregido de los criterios ponderados. El método consiste en establecer criterios a partir de los cuales se evalúan las alternativas disponibles y además establecer una ponderación relativa entre cada criterio. Los criterios sobre

los cuales se realiza la evaluación de las alternativas son: seguridad, facilidad de uso, estructura sencilla y menor costo.

El criterio seguridad se refiere a que la estructura debe ser confiable, el criterio facilidad de uso y estructura sencilla se enfoca en facilitar el uso y fabricación del producto y el criterio menor costo busca disminuir el precio final de la estructura del elevador. Se asigna mayor valor al criterio seguridad seguido de los criterios facilidad de uso y mecanismo sencillo y finalmente el criterio menor costo. La tabla 3 muestra la evaluación del peso ponderado de cada criterio.

Tabla 3.

Evaluación del peso ponderado de cada criterio

Seguridad > Facilidad de Uso = Estructura sencilla > Menor costo						
Criterio	Seguridad	Facilidad de uso	Estructura sencilla	Menor costo	$\sum + 1$	Ponderación
Seguridad		1	1	1	4	0.4
Facilidad de uso	0		0.5	1	2.5	0.25
Estructura sencilla	0	0.5		1	2.5	0.25
Menor costo	0	0	0		1	0.1
				SUMA	10	1

Fuente: Propia

A continuación, se presenta la evaluación de las dos alternativas de solución del módulo 1: sujeción del chasis o ubicar el vehículo sobre una plataforma. El primer criterio a evaluar es el criterio de seguridad. Se puede observar que la alternativa de sujeción de chasis es muy popular en el mercado y que presenta capacidades de carga de 4 toneladas lo que la hace una opción segura en el presente estudio que requiere una capacidad de carga de 3.5 toneladas.

La alternativa 2: posicionar el vehículo en una plataforma es también una alternativa segura que depende del correcto dimensionamiento de los elementos. Se puede apreciar en la industria y construcción que estructuras de acero soportan cargas superiores a 3.5 toneladas. Por este motivo

se asigna la misma ponderación para ambas alternativas con respecto al criterio seguridad. La tabla 4 muestra el resultado de evaluación del criterio seguridad sobre las alternativas 1 y 2.

Tabla 4.

Evaluación del peso específico de criterio seguridad

Seguridad	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	1.5	0.5
Alternativa 2	0.5		1.5	0.5
		Suma	3	1
Alternativa 1 = Alternativa 2				

Fuente: Propia

El criterio facilidad de uso tiene que ver con la interacción que existe entre el producto y el cliente. La alternativa 1 es popular en talleres debido a que sujetar al vehículo por medio del chasis permite acceder fácilmente a la parte inferior del vehículo para realizar trabajos de mantenimiento y cambio de piezas, sin embargo, si presenta cierta dificultad de posicionamiento con respecto a la alternativa 2 en la cual el vehículo apoyado en sus llantas se ubica sobre la plataforma. Se asigna una mayor ponderación a la alternativa 2 sobre la alternativa 1. La tabla 5 muestra el resultado de evaluación del criterio facilidad de uso sobre las alternativas 1 y 2.

Tabla 5.

Evaluación del peso específico de criterio facilidad de uso

Facilidad de Uso	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	0.33
Alternativa 2	0		2	0.67
		Suma	3	1
Alternativa 2 > Alternativa 1				

Fuente: Propia

El criterio estructura sencilla tiene que ver con facilitar la construcción de la estructura. Se puede apreciar que la estructura en forma de pinzas sujeción por el chasis (alternativa 1) se compone de varios elementos de distintas dimensiones y materiales lo que dificulta su fabricación, por otra parte, la alternativa 2 propone ubicar el vehículo sobre una plataforma fabricada en acero a partir de perfiles metálicos disponibles. Se considera que la alternativa 2 presenta una relativa mayor facilidad de fabricación con respecto a la alternativa 1. La tabla 6 muestra el resultado de evaluación del criterio facilidad de uso sobre las alternativas 1 y 2.

Tabla 6.

Evaluación del peso específico de criterio estructura sencilla

Facilidad de Uso	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	0.33
Alternativa 2	0		2	0.67
		Suma	3	1
Alternativa 2 > Alternativa 1				

Fuente: Propia

El criterio menor costo tiene como objetivo reducir el costo final de la estructura del elevador. La alternativa 1 presenta varias piezas de distintos tamaños en comparación a la alternativa 2. Si se fabrican en serie los elementos y posteriormente se ensamblan, como es el caso de la alternativa 1, se puede decir que es la alternativa más económica, sin embargo, si se fabrica un solo elemento resultaría menor costo la alternativa 2 ya que presenta piezas menos complejas de fabricar y se fabrica con materiales disponibles en el mercado. Por estas razones se propone que la alternativa 1 y 2 tengan el mismo peso ponderado en el criterio menor costo. La tabla 7 muestra el resultado de evaluación del criterio facilidad de uso sobre las alternativas 1 y 2.

Tabla 7.*Evaluación del peso específico de criterio menor costo*

Facilidad de Uso	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	0.5
Alternativa 2	0		2	0.5
		Suma	3	1

Alternativa 2 > Alternativa 1

Fuente: Propia

El paso final del método ordinal de los criterios ponderadas es comparar ambas alternativas tomando en cuenta los resultados de la evaluación individual de cada criterio y la ponderación relativa entre los mismos. La tabla 7 muestra la conclusión de la evaluación de las alternativas de solución para el módulo 1 en la que se puede observar que la alternativa 2 ubicar el vehículo sobre una plataforma presenta una mayor ponderación en base a los criterios evaluados.

Tabla 8.*Evaluación de las alternativas de solución – Módulo 1*

Conclusión	Seguridad	Facilidad de Uso	Estructura Sencilla	Menor Costo	Σ	Prioridad
Alternativa 1	(0.4 x 0.5) 0.2	(0.25 x 0.33) 0.0825	(0.25 x 0.33) 0.0825	(0.1 x 0.5) 0.05	0.415	2
Alternativa 2	(0.4 x 0.5) 0.2	(0.25 x 0.67) 0.1675	(0.25 x 0.67) 0.1675	(0.1 x 0.5) 0.05	0.585	1

Fuente: Propia

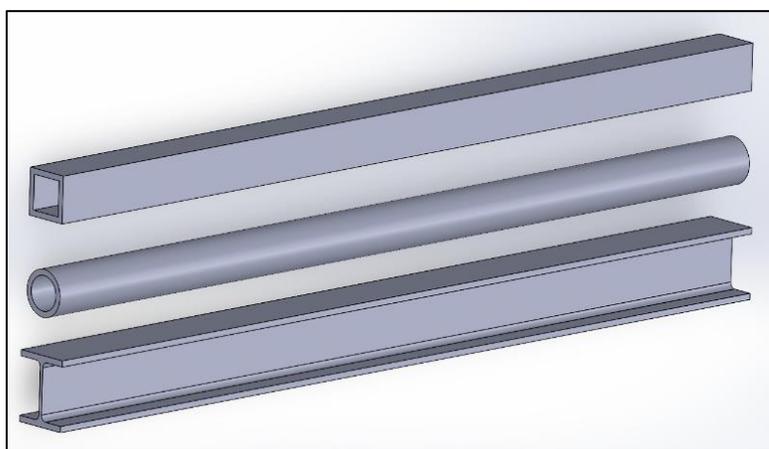
3.2.2 Módulo 2: Soportar Carga

El módulo 2 se compone de las subfunciones soportar la carga y sujeción al suelo. La subfunción soportar carga garantiza que los elementos seleccionados son aptos para resistir la carga solicitada, mientras que la subfunción sujeción al suelo asegura que la estructura de elevador de autos no rote producto de la carga producida por el vehículo.

Los elementos que soportan el peso de la plataforma y el vehículo ubicado en ella son las columnas. En el mercado local se dispone distintos perfiles estructurales que se utilizan como columnas. Se propone tres alternativas de solución de acuerdo a los perfiles más utilizados disponibles en el mercado: tubo cuadrado, tubo redondo etc. La figura 22 muestra un esquema de los perfiles cuadrado, I y circular.

Figura 22. , perfil I,

Perfiles: cuadrado, W y circular.



Fuente: Propia

Para el módulo 2 se propone seleccionar como alternativa realizar el diseño de las columnas usando perfil tipo I ya que estos presentan un mayor momento de inercia en su eje fuerte lo que favorece evitar desplazamientos. La segunda subfunción del módulo 2: sujeción al suelo ocurre al mismo tiempo que la función soportar la carga. La evaluación del mercado y el estado del arte muestran que las estructuras de elevador de autos se sujetan al piso mediante placas y pernos de anclaje, por este motivo se propone que este sea el medio de sujeción. La figura 23 muestra los pernos de anclaje en una columna de elevador de autos.

Figura 23.

Pernos de anclaje en una columna de elevador de autos.



Fuente: (Maquin Parts, 2020)

3.2.3 Solución conceptual de la función global

La función global es la función sin la cual el diseño o estudio no tendría sentido, en el caso de la estructura del elevador de autos la función global es soportar el peso sin colapsar. Para obtener la solución de la función global se suman las soluciones de las subfunciones encontradas en el módulo 1 y 2. La tabla 9 muestra las soluciones conceptuales de la estructura funcional del elevador de autos.

Tabla 9.

Soluciones conceptuales de la estructura funcional del elevador de autos

Módulo	Solución												
Módulo 1: Posicionar Vehículo	<div style="border: 1px solid green; padding: 5px; display: inline-block;">PLATAFORMA</div> 												
Módulo 2: Soportar Carga	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; border: 1px solid blue; padding: 5px;">Columna perfil cuadrado</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid blue; padding: 5px;">Columna perfil circular</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid blue; padding: 5px;">Columna perfil I</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; border: 1px solid blue; padding: 5px;">↓</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid blue; padding: 5px;">↓</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid blue; padding: 5px;">↓</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; border: 1px solid blue; padding: 5px;">Pernos de anclaje</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid blue; padding: 5px;">Pernos de anclaje</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid blue; padding: 5px;">Pernos de anclaje</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; border: 1px solid orange; padding: 5px;">Solución 1</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid orange; padding: 5px;">Solución 2</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid orange; padding: 5px;">Solución 3</td> </tr> </table>	Columna perfil cuadrado	Columna perfil circular	Columna perfil I	↓	↓	↓	Pernos de anclaje	Pernos de anclaje	Pernos de anclaje	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Columna perfil cuadrado	Columna perfil circular	Columna perfil I											
↓	↓	↓											
Pernos de anclaje	Pernos de anclaje	Pernos de anclaje											
Solución 1	Solución 2	Solución 3											

Fuente: Propia

3.3 Etapa 3: Diseño de Materialización

La tercera etapa del proceso de diseño se denomina diseño de materialización y tiene como objetivo determinar dimensiones, materiales y formas de acoplamiento de los elementos que se usan para materializar los conceptos desarrollados en la etapa 2 diseño conceptual de acuerdo a las especificaciones técnicas obtenidas en la etapa 1: definición del producto.

3.3.1 Materialización módulo 1

La alternativa de solución del módulo 1 es posicionar el vehículo sobre una plataforma fabricada en acero. Para realizar el dimensionamiento de la plataforma se usa como referencia las dimensiones y características técnicas del carro CHEVROLET TAHOE ya que es uno de los vehículos más grandes del mercado. La figura 24 muestra las dimensiones del vehículo Chevrolet Tahoe 2023.

Figura 24.

Dimensiones del vehículo Chevrolet Tahoe 2023.

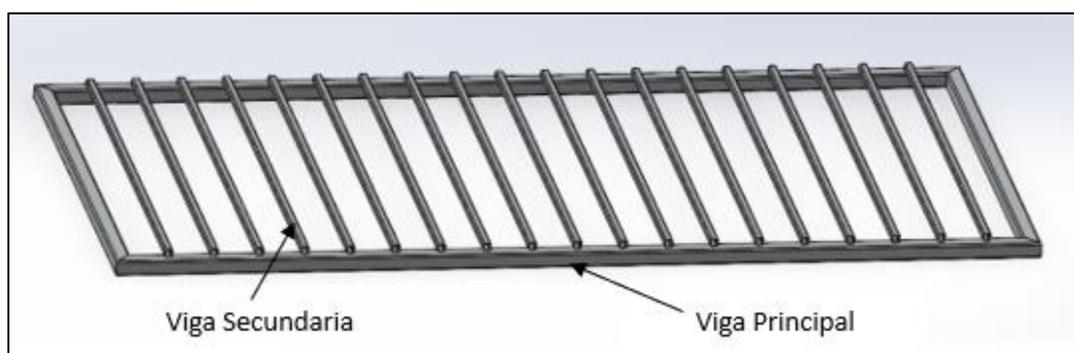


Fuente: (CHEVROLET, 2023)

Se propone ubicar el vehículo en una plataforma fabricada en acero ASTM A572 que presenta dimensiones 5.5 metros de largo y 3 metros de ancho. El piso de la plataforma se fabrica con perfiles rectangulares y es el que se encuentra en contacto directo con las llantas del vehículo. La figura 25 muestra un esquema de la plataforma en la que se pueden apreciar las vigas principales y vigas secundarias de la estructura.

Figura 25.

Esquema de la plataforma

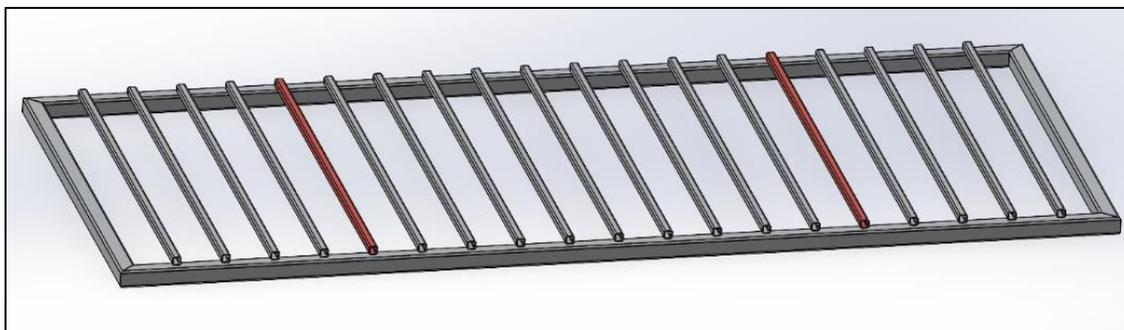


Fuente: Propia

Las vigas secundarias soportan el peso del vehículo directamente. El caso crítico ocurre cuando el vehículo se apoya únicamente sobre dos vigas secundarias, en este caso ambas vigas están soportando la totalidad del peso del vehículo. La figura 26 muestra un esquema de las vigas secundarias en el caso crítico.

Figura 26.

Esquema de las vigas secundarias – caso crítico.

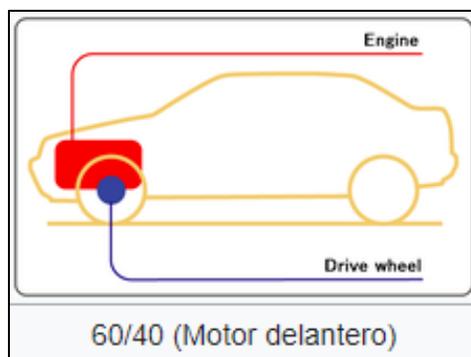


Fuente: Propia

En la figura 27 se puede apreciar la distribución típica del peso del vehículo según la ubicación del motor. En el caso de motores ubicados en la parte delantera: sobre el eje delantero se ubica el 60 % del peso total del vehículo, mientras que el eje trasero soporta el 40 % del peso total del vehículo. De acuerdo a las capacidades de carga y peso del Chevrolet Tahoe que se pueden apreciar en la figura 28 el peso total del vehículo es 3357 kg. A partir de este dato se puede estimar que el eje delantero apoyado sobre una única viga secundaria soporta 2014.2 kg y el eje trasero 1342.8 kg.

Figura 27.

Distribución típica del peso del vehículo



Fuente: (Wikipedia, 2020)

Figura 28.

Capacidades de carga y peso - Chevrolet Tahoe

CAPACIDADES Y PESOS

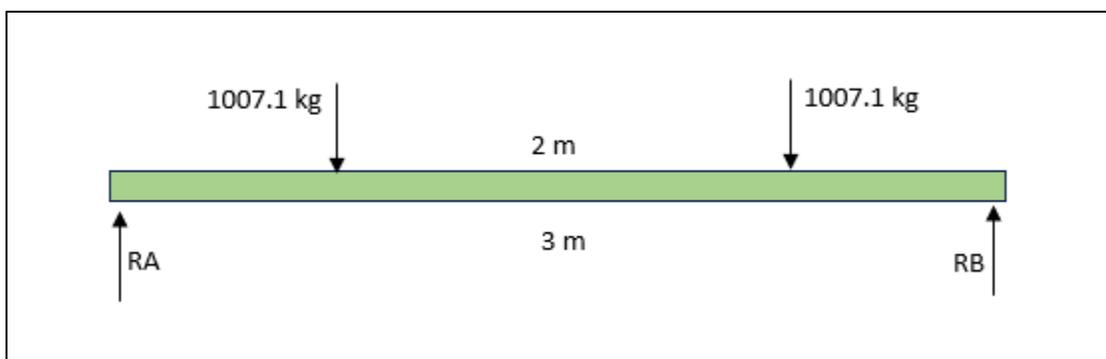
Peso neto vehicular (Kg)	2.627
Peso bruto vehicular (Kg)	3.357
Capacidad de carga (Kg)	730
Capacidad maletero (Its) detrás de primera fila	2.295
Capacidad maletero (Its) detrás de segunda fila	1.452
Capacidad maletero (Its) detrás de tercera fila	645
Capacidad de remolque (Kg)	3.737
Tanque de combustible (Its)	110
Número de pasajeros	8
Ángulo de ataque (°)	31,5
Ángulo de salida (°)	20,5

Fuente: (CHEVROLET, 2023)

La viga secundaria sobre la cual se apoya el eje delantero del vehículo soporta 2014.2 kg distribuidos a lo largo de tres metros. Para realizar el diseño se modela a la viga secundaria como una viga simplemente apoyada de tres metros de longitud que soporta una carga de 2014.2 kg apoyado en dos puntos (contacto con la rueda) separadas entre sí 2 m. La figura 29 muestra el diagrama de cuerpo libre de la viga secundaria. A partir del diagrama de cuerpo libre se calcula las reacciones por medio de las ecuaciones de equilibrio (sumatoria de fuerzas y sumatoria de momentos).

Figura 29.

Diagrama de cuerpo libre viga secundaria



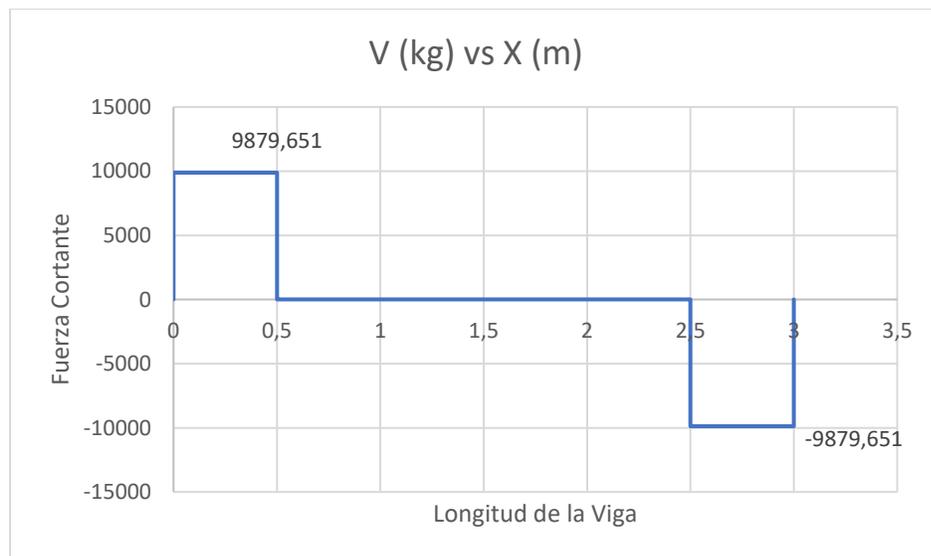
Fuente: Propia

$$\begin{aligned}\sum F_Y &= 0 \\ R_A + R_B &= 2014.2 \\ \sum M_A &= 0 \\ 3R_B - 0.5(1007.1) - (2.5)(1007.1) &= 0 \\ R_B &= 1007.1 \text{ kg} \\ R_A &= 1007.1 \text{ kg}\end{aligned}$$

A partir del cálculo de las reacciones en los apoyos se procede a graficar los diagramas de fuerza cortante y momento flector de la viga secundaria. La figura 30 muestra el diagrama de fuerza cortante de la viga secundaria. La figura 31 muestra el diagrama de momento flector de la viga secundaria.

Figura 30.

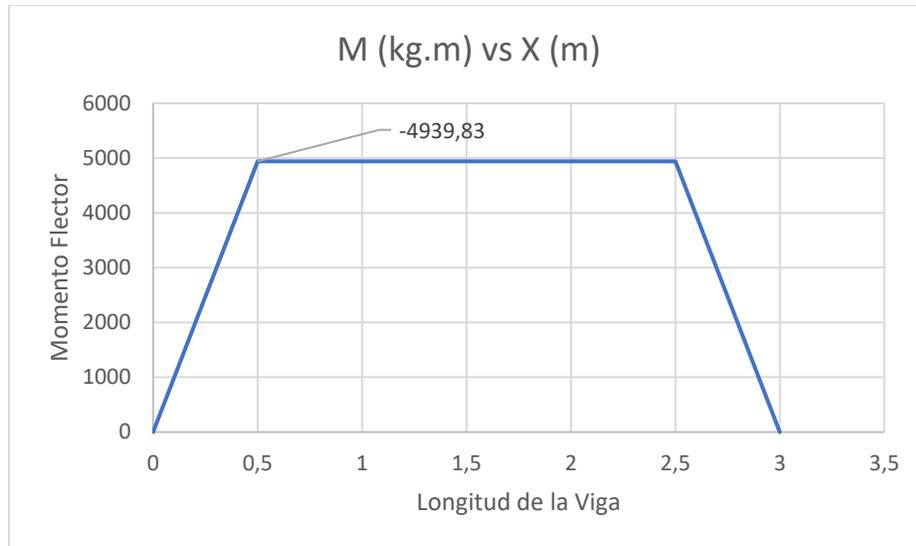
Diagrama de fuerza cortante - viga secundaria



Fuente: Propia

Figura 31

Diagrama de momento flector - viga secundaria



Fuente: Propia

La viga producto de la carga distribuida se encuentra sometido a esfuerzos de flexión y esfuerzos cortantes. La ecuación 1 permite calcular el esfuerzo cortante en la viga y la ecuación 2 permite calcular el esfuerzo de flexión. Se procede a evaluar el perfil cuadrado 50x2mm como una primera iteración. $M = 4939\ 825.5\ \text{N.mm}$ $C_y = 25\ \text{mm}$, $I = 147712\ \text{mm}^4$, $V = 9879.65\ \text{N}$, $A = 384\ \text{mm}^2$. Se trabaja con acero A572 $S_y = 350\ \text{MPa}$.

$$\sigma_x = \frac{MC_y}{I} = 836\ \text{MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{3V}{2A} = 38.6\ \text{MPa}$$

El esfuerzo causado por flexión excede al limite de fluencia del material, se procede a realizar una segunda iteración con el perfil cuadrado 100 x 3 mm de material acero A572 $S_y = 350\ \text{MPa}$. $M = 4\ 939\ 825.5\ \text{N.mm}$ $C_y = 50\ \text{mm}$, $I = 1827092\ \text{mm}^4$, $V = 9879.65\ \text{N}$, $A = 1164\ \text{mm}^2$.

$$\sigma_x = \frac{MC_y}{I} = 135\ \text{MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{3V}{2A} = 12.73\ \text{MPa}$$

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_x} = 2.6$$

La segunda iteración muestra que el elemento se encuentra sometido a un esfuerzo de flexión de 135 MPa, el cual es inferior al esfuerzo de fluencia del material. Sin embargo, al calcular el factor de seguridad se obtiene un valor de 2.6 que es inferior al valor objetivo 4 determinado en las especificaciones técnicas. Se realiza una tercera iteración con el perfil cuadrado 160 x 3 mm. $M = 4\,939\,825.5 \text{ N}\cdot\text{mm}$, $C_y = 80 \text{ mm}$, $I = 7742612 \text{ mm}^4$, $V = 9879.65 \text{ N}$, $A = 1884 \text{ mm}^2$. Se trabaja con acero A572 $S_y = 350 \text{ MPa}$.

$$\sigma_x = \frac{MC_y}{I} = 51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{3V}{2A} = 7.87 \text{ MPa}$$

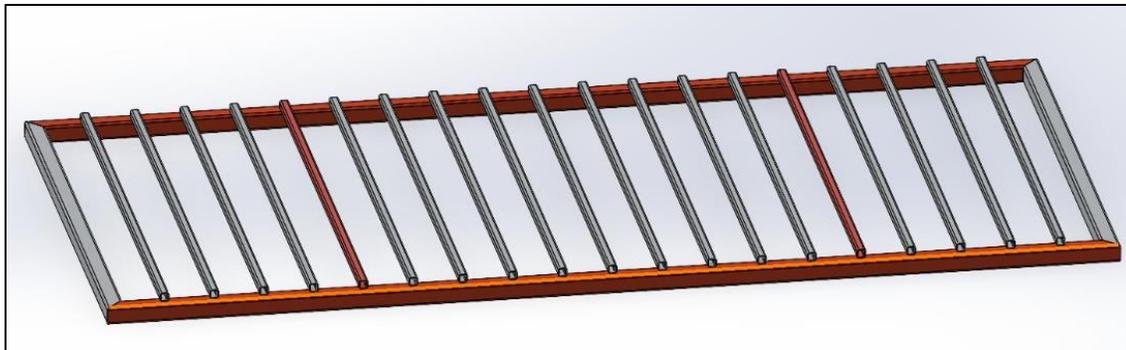
$$FS = \frac{S_y}{\sigma_x} = 6.86$$

El esfuerzo máximo ocurre en la superficie del perfil cuando el esfuerzo cortante es 0 y el esfuerzo de flexión es máximo. Al comparar el esfuerzo de flexión con el esfuerzo de material se determina el factor de seguridad que es igual 6.86. Se selecciona el perfil cuadrado 160 x 3 mm Acero A572 como viga secundaria para la simulación.

La carga producto del peso del vehículo se transmite hacia las vigas secundarias y estas a su vez transmiten la carga hacia las vigas principales. El caso crítico ocurre cuando solamente dos vigas secundarias se encuentran soportando el peso del vehículo y estas a su vez transmiten hacia las vigas principales. La figura 32 muestra un esquema del caso crítico de la viga principal.

Figura 32.

Esquema de caso crítico - viga principal.

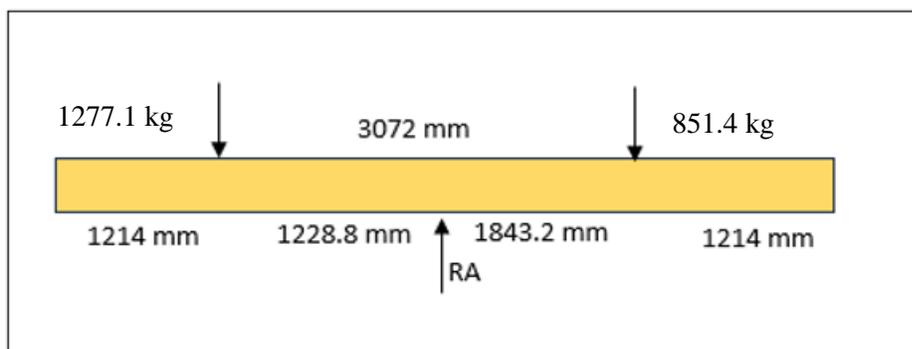


Fuente: Propia

En la figura 32 se puede apreciar que cuando el vehículo se posiciona únicamente sobre dos vigas secundarias estas transmiten la carga hacia las dos vigas principales. El peso del vehículo Chevrolet Tahoe es de 3357 kg y se distribuye 2014.2 kg en el eje delantero y 1342.8 en el eje trasero. Cada viga principal soporta la mitad de la carga de cada eje. La viga se modela como una viga con un apoyo simple de longitud 5.5 m sobre la cual se aplican dos cargas puntuales de 1007.1 kg y 671.4 kg que se encuentran distanciadas 3072 mm (distancia entre ejes). Se propone ubicar 20 vigas secundarias sobre la viga principal de peso aproximado 45 kilos cada una. Para tomar en cuenta el efecto del peso de las vigas, se distribuye los 450 kg sobre los dos cargas aplicadas. La figura 33 muestra el diagrama de cuerpo libre de la viga principal. SE

Figura 33

Diagrama de cuerpo libre de la viga principal.

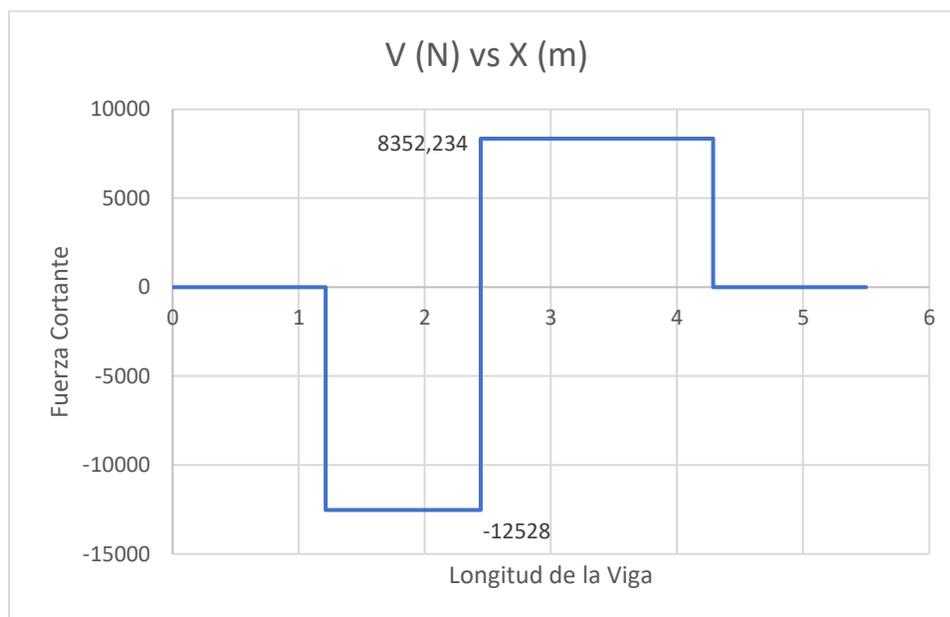


Fuente: Propia

Al realizar sumatoria de fuerzas y sumatoria de momentos se puede determinar la reacción en el apoyo central que permite realizar los diagramas de fuerza cortante y momento flector de la viga principal. La figura 34 muestra el diagrama de fuerza cortante de la viga principal. La figura 35 muestra el diagrama de momento flector de la viga principal.

Figura 34.

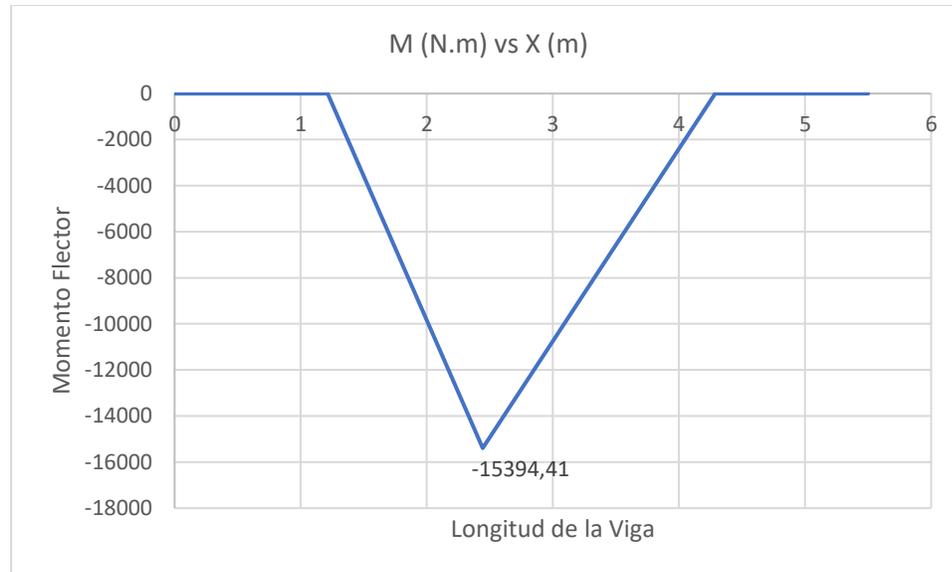
Diagrama de fuerza cortante de la viga principal



Fuente: Propia

Figura 35.

Diagrama de momento flector de la viga principal



Fuente: Propia

Se propone utilizar el perfil cuadrado 160 x 3 mm ASTM 572 para realizar una primera iteración. A continuación se muestra el cálculo del esfuerzo cortante y esfuerzo de flexión en la viga principal. $M = 15394410 \text{ N.mm}$, $C_y = 80 \text{ mm}$, $I = 7742612 \text{ mm}^4$, $V = 20880 \text{ N}$, $A = 1884 \text{ mm}^2$. Se trabaja con acero A572 $S_y = 350 \text{ MPa}$.

$$\sigma_x = \frac{MC_y}{I} = 159 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{3V}{2A} = 16.6 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_x} = 2.2$$

Se puede observar que el esfuerzo de flexión es inferior al esfuerzo de fluencia y presenta un factor de seguridad de 2.2, sin embargo, es inferior al valor 4 solicitado en especificaciones técnicas. Se realiza una segunda iteración con el perfil cuadrado 200 x 3 mm. $M = 15394410 \text{ N.mm}$, $C_y = 100 \text{ mm}$, $I = 15294292 \text{ mm}^4$, $V = 20880 \text{ N}$, $A = 2364 \text{ mm}^2$. Se trabaja con acero A572 $S_y = 350 \text{ MPa}$.

$$\sigma_x = \frac{MC_y}{I} = 100 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{3V}{2A} = 13.25 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_x} = 3.5$$

El perfil seleccionado presenta un esfuerzo de flexión de 100 MPa y un esfuerzo cortante máximo de 13.25 MPa. Al comparar el esfuerzo de fluencia con el esfuerzo de flexión se obtiene un factor de seguridad de 3.5, por este motivo se realiza una tercera iteración con el perfil 220 x 3 mm. $M = 15394410 \text{ N.mm}$, $C_y = 110 \text{ mm}$, $I = 20440532 \text{ mm}^4$, $V = 20880 \text{ N}$, $A = 2604 \text{ mm}^2$. Se trabaja con acero A572 $S_y = 350 \text{ MPa}$

$$\sigma_x = \frac{MC_y}{I} = 83 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{3V}{2A} = 12.02 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_x} = 4.2$$

El perfil seleccionado presenta un esfuerzo de flexión de 83 MPa y un esfuerzo cortante máximo de 12.02 MPa. El esfuerzo máximo ocurre en la superficie del perfil cuando el esfuerzo de flexión es máximo y el esfuerzo cortante es cero. Al comparar el esfuerzo de fluencia con el esfuerzo máximo se obtiene un factor de seguridad de 4.2, por este motivo se selecciona el perfil 220 x 3 mm como viga principal.

Se propone ubicar barandales sobre la plataforma que no actúen como elementos estructurales, más bien que sirven como guía para los usuarios que desean posicionar el vehículo. La figura 36 muestra un esquema de la plataforma.

Figura 36.

Esquema de la plataforma



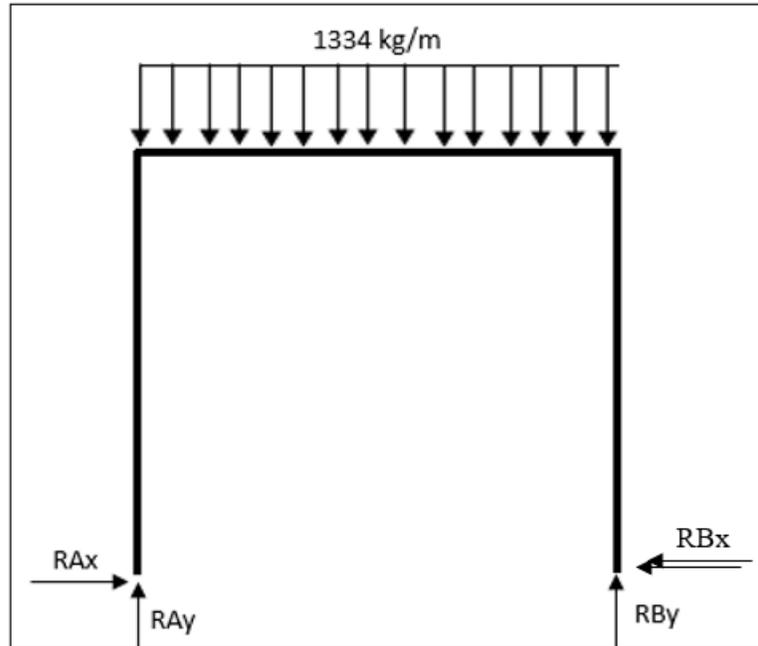
Fuente: Propia

2.3.2 Materialización módulo 2

El módulo 2 corresponde a la función de la estructura de soportar la carga producida por el vehículo y que esta no colapse. Los elementos que soportan el peso de la plataforma y del vehículo son las columnas y mediante pernos de anclaje se sujeta la estructura al suelo. La figura 37 muestra el diagrama de cuerpo libre de la estructura del elevador. Se modela a la estructura con una articulación de dos reacciones en el punto A y simplemente apoyada en el punto B, la estructura de 2 m de alto soporta una carga distribuida de 4000 kg a lo largo de 3 metros que corresponde al peso del vehículo y el peso aproximado de la plataforma.

Figura 37.

Diagrama de cuerpo libre de la estructura del elevador



Fuente: Propia

Al aplicar ecuaciones de equilibrio sobre el diagrama de cuerpo libre de la figura 37 se determina las reacciones $RAx = RBx$ y $RAy = RBy = 2000$ kg. Para el diseño de la columna se determina la tensión de pandeo elástico o de Euler por medio de la ecuación 3 y posteriormente de acuerdo al criterio de AISC (American Institute Steel Construction) se determina el esfuerzo crítico de pandeo (ecuación 4 y 5) que permite determinar el factor de seguridad.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

Cuando $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = \left[0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y$$

Cuando $\frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = 0,877 F_e$$

Se propone realizar el diseño para tres columnas con perfil cuadrado, circular y perfil I respectivamente. De acuerdo a las condiciones de los apoyos se trabaja con un $K = 1.2$. Se trabaja

con acero A572 con un esfuerzo de fluencia de 350 MPa. La primera columna que se diseña es la columna de perfil cuadrado, se propone para una primera iteración un perfil cuadrado de 250 x 3 mm. $E = 210000$ MPa, $P = 2000$ kg = 19600 N, $L = 2000$ mm, $I = 30142892$ mm⁴, $A = 2964$ mm², $r = 100.84$ mm.

$$\text{Cuando } \frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = \left[0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y = 310 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = 6.6 \text{ MPa}$$

El esfuerzo que soporta el perfil cuadrado se calcula como la carga aplicada sobre el área del mismo. El esfuerzo en la columna es mucho menor a la resistencia crítica de pandeo y presenta un factor de seguridad de 45. Para el diseño de la columna circular se propone el uso del perfil de diámetro 200 mm, $e = 3$ mm de acero A572 $S_y = 350$ MPa. $E = 210000$ MPa, $P = 2000$ kg = 19600 N, $L = 2000$ mm, $I = 9009081$ mm⁴, $A = 1856.68$ mm², $r = 69.64$ mm.

$$\text{Cuando } \frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = \left[0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y = 321 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = 10.57 \text{ MPa}$$

El esfuerzo que soporta el perfil circular se calcula como la carga aplicada sobre el área del mismo. El esfuerzo en la columna circular es mucho menor a la resistencia crítica calculada y presenta un factor de seguridad de 33. Para el diseño de la columna perfil H se selecciona el perfil HB 220 disponible en el catálogo Dismetel. (Ver figura 3.26). Acero A572 $S_y = 350$ MPa. $E = 210000$ MPa, $P = 2000$ kg = 19600 N, $L = 2000$ mm $I = 181018286.3333334$ mm⁴, $A = 8826$ mm², $r = 19.892$ mm.

Figura 38.

Catálogo DISMETAL perfil HEB

TIPO	DIMENSIONES					AREA	PESO
DENOMINACION	h	b	e	e ¹	r	Cm ²	kg/m
	mm	mm	mm	mm	mm		
HEB 100	100	100	6.00	10.00	12.00	26.00	20.40
HEB 120	120	120	6.50	11.00	12.00	34.00	26.70
HEB 140	140	140	7.00	12.00	12.00	43.00	33.70
HEB 160	160	160	8.00	13.00	15.00	54.30	42.60
HEB 180	180	180	8.50	14.00	15.00	65.30	51.20
HEB 200	200	200	9.00	15.00	18.00	78.10	61.30
HEB 220	220	220	9.50	16.00	18.00	91.00	71.50
HEB 240	240	240	10.00	17.00	21.00	106.00	83.20
HEB 260	260	260	10.00	18.50	24.00	118.00	93.00
HEB 280	280	280	10.50	18.00	24.00	131.00	103.00
HEB 300	300	300	11.00	19.00	27.00	149.10	117.00

Fuente: (DISMETAL, 2022)

$$\text{Cuando } \frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = 0,877F_e = 114 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = 2.2 \text{ MPa}$$

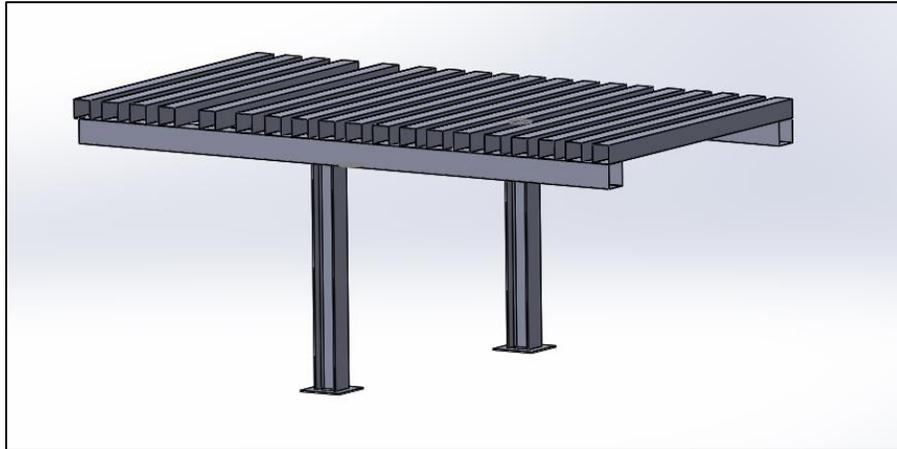
Al comparar el esfuerzo de compresión crítico con el esfuerzo que soporta la columna producto de la carga aplicada sobre el área de la misma se obtiene un esfuerzo de 2.2 MPa. El perfil seleccionado supera ampliamente el criterio de selección.

2.4 Pre Procesamiento

Para realizar el dibujo de la estructura del elevador de autos para parqueaderos verticales de las tres alternativas mostradas se utiliza el software SolidWorks. Las figuras 39, 40 y 41 muestran los dibujos de la estructura del elevador al utilizar columnas H220B, columnas cuadradas y columnas circulares respectivamente modeladas en SolidWorks.

Figura 39.

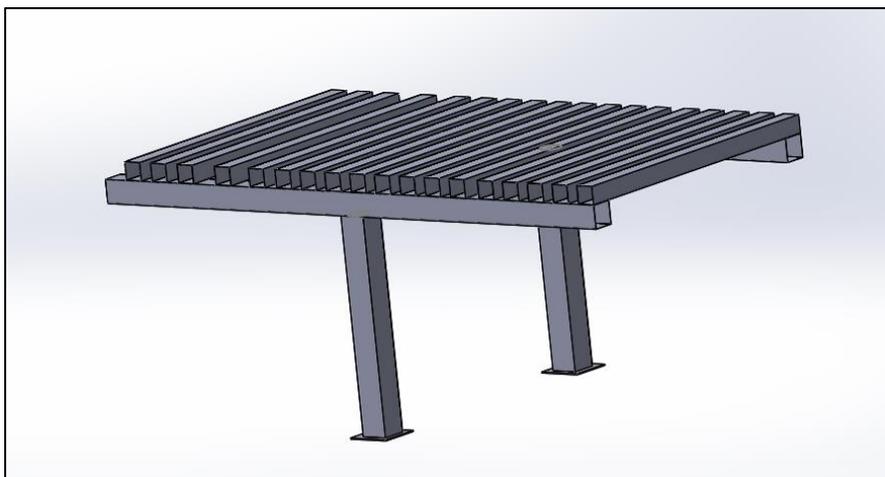
Estructura de elevador - columnas H220B – SolidWorks



Fuente: Propia

Figura 40.

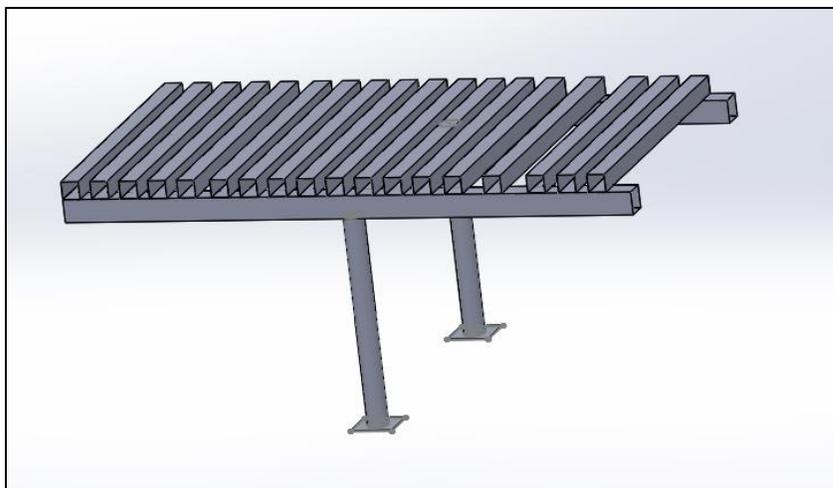
Estructura de elevador - columnas cuadradas – SolidWorks



Fuente: Propia

Figura 41.

Estructura de elevador - columnas circulares - SolidWorks

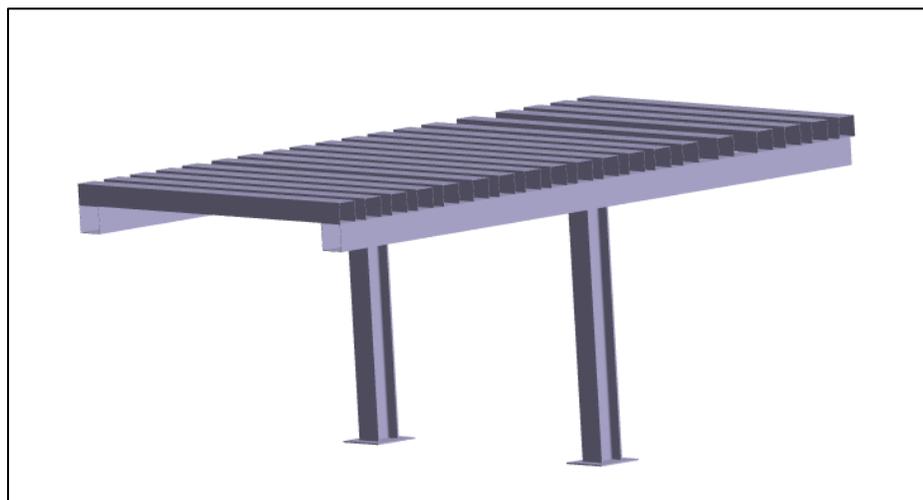


Fuente: Propia

Las simulaciones se realizan utilizando el software SimSolid. Para ejemplificar la metodología empleada para realizar las simulaciones se utiliza la plataforma con la columna H220B. El primer paso es importar el prototipo generado en SolidWorks y verificar que los elementos se encuentren conectados. La figura 42 muestra la plataforma - columna H220 B importada en SimSolid. La figura 43 muestra las conexiones de los elementos la plataforma – columna H220B.

Figura 42.

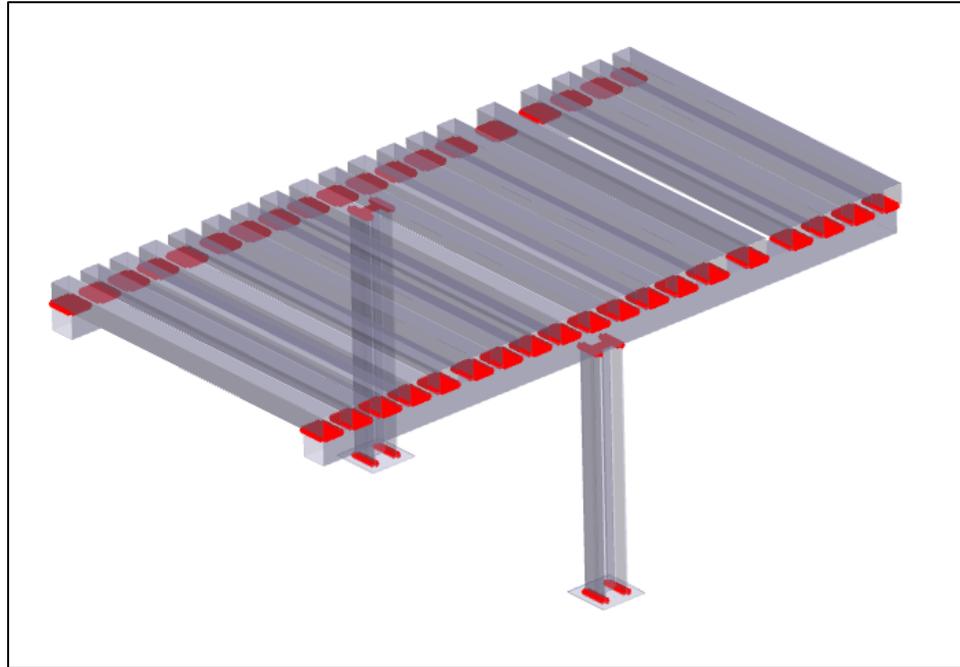
Estructura de elevador - columnas H220B – SimSolid



Fuente: Propia

Figura 43.

Conexiones de estructura de elevador - columnas H220B – SimSolid

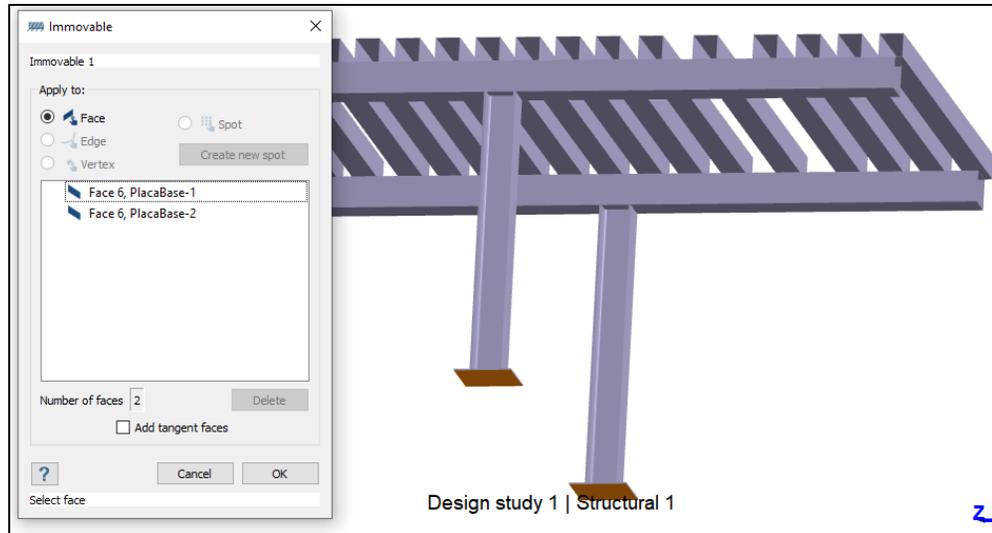


Fuente: Propia

Posteriormente se asigna el material acero a toda la estructura y se inicia un nuevo estudio estructural en el programa. Se asignan restricciones de movimiento sobre las caras de las bases de la columna y se aplica una carga de 2100 kg sobre la viga en la cual se ubica el eje delantero del vehículo y 1400 kg sobre la viga en la cual se ubica el eje trasero del vehículo. La figura 44 muestra la asignación de restricciones de movimiento y la figura 45 muestra la asignación de cargas sobre las vigas en el software SimSolid.

Figura 44.

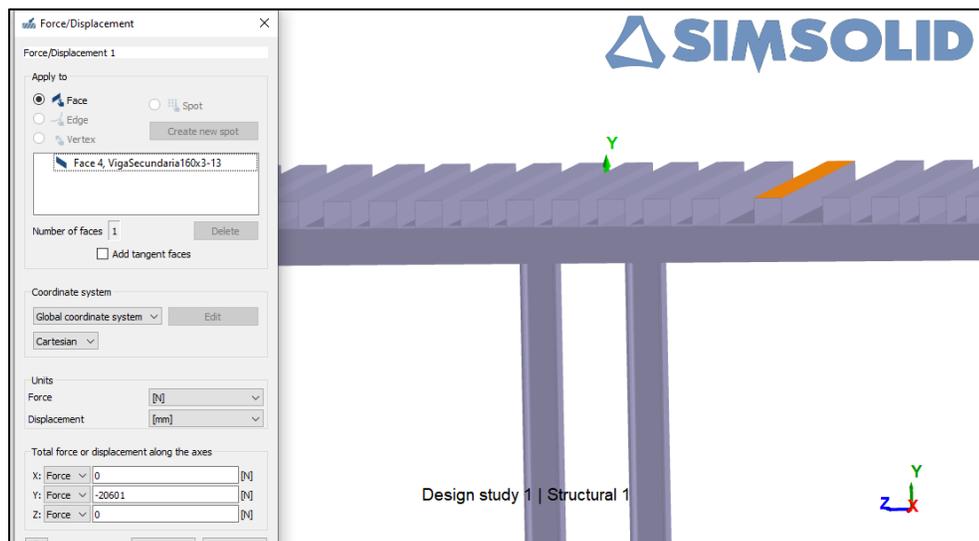
Asignación de restricciones de movimiento



Fuente: Propia

Figura 45.

Asignación de cargas



Fuente: Propia

3. Resultados

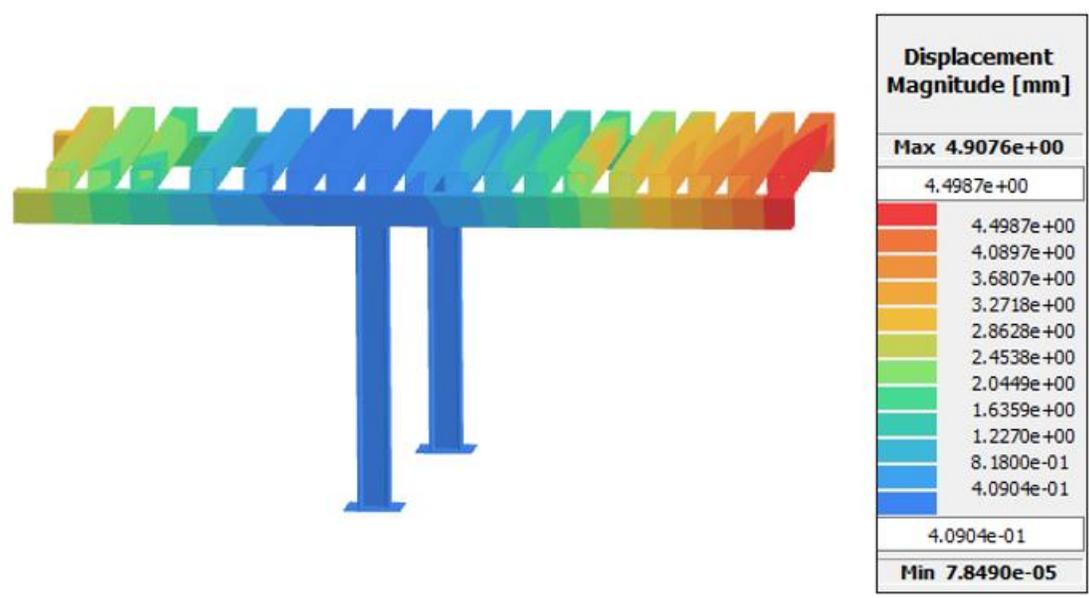
Para realizar las simulaciones se emplean los softwares SolidWorks, para realizar el prototipo y SimSolid para realizar las simulaciones. A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones al utilizar columnas de perfil cuadrado y aplicar el sesenta por ciento del peso del

vehículo (2100 kg) sobre la viga ubicada en la parte frontal y el cuarenta por ciento del peso del vehículo sobre la viga trasera.

3.1 Simulación columna perfil HB 220 SimSolid

Figura 46.

Resultados simulación desplazamiento Perfil HB220

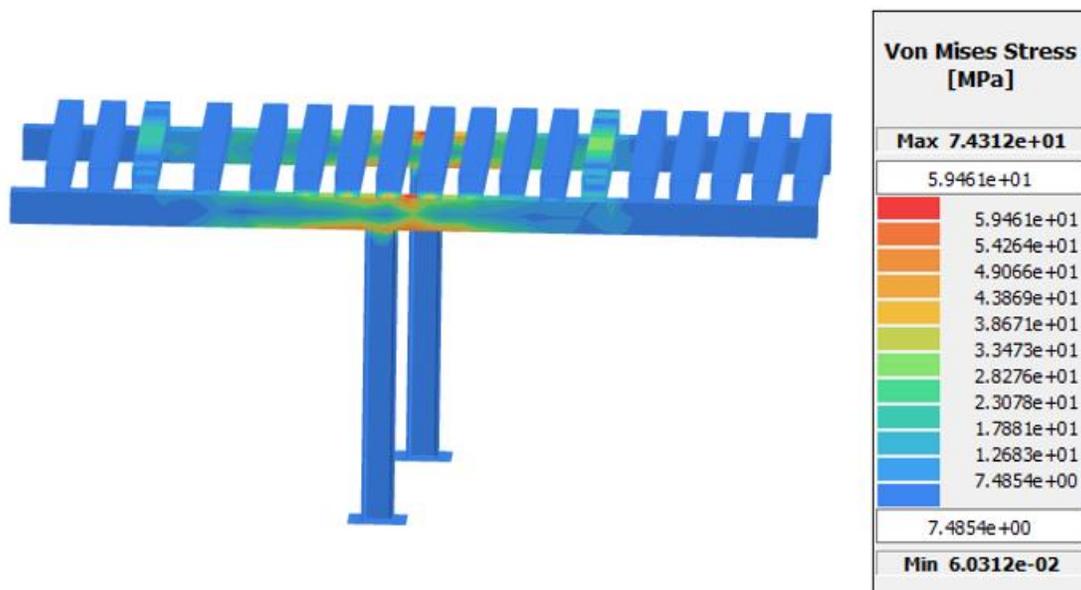


Fuente: Propia

Se realiza la simulación al trabajar con una columna HB220. En la figura 46 se puede apreciar que el desplazamiento máximo ocurre en la esquina de la viga principal presentando un valor de 4.9 mm

Figura 47.

Resultados simulación esfuerzo de Von Mises Perfil HB220

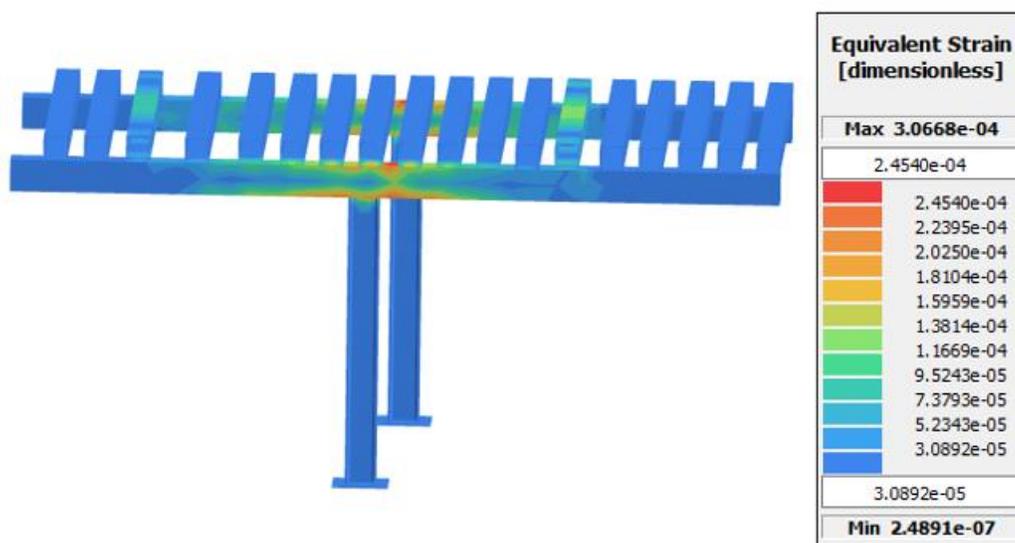


Fuente: Propia

En la figura 47 se puede apreciar el resultado de la simulación de los esfuerzos de Von Mises a lo largo de la estructura. Los valores máximos ocurren en la superficie de la viga principal, presentando un valor de 74 MPa. La figura 48 muestra los resultados de la simulación de deformación unitaria.

Figura 48

Resultados de la simulación de deformación unitaria. perfil HB220

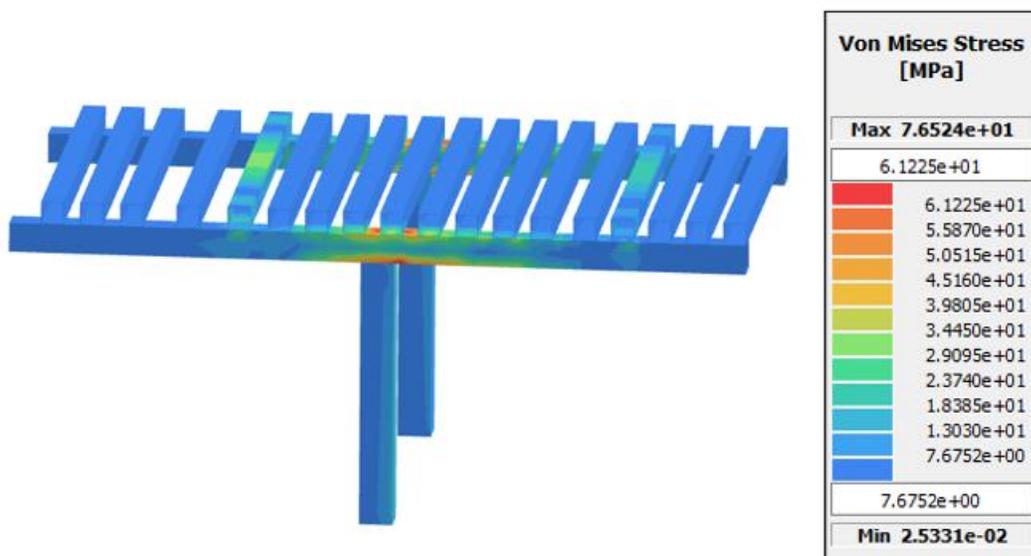


Fuente: Propia

3.2 Columna perfil cuadrado

Figura 49.

Resultados simulación esfuerzo de Von Mises Perfil Cuadrado



Fuente: Propia

Se realiza la simulación al trabajar con una columna cuadrada de 250 mm y espesor de 3 mm y longitud de 2 m. En la figura 49 se puede apreciar que el esfuerzo máximo ocurre en la superficie de la viga principal presentando un valor de 76 MPa.

Figura 50.

Resultados simulación desplazamiento Perfil Cuadrado

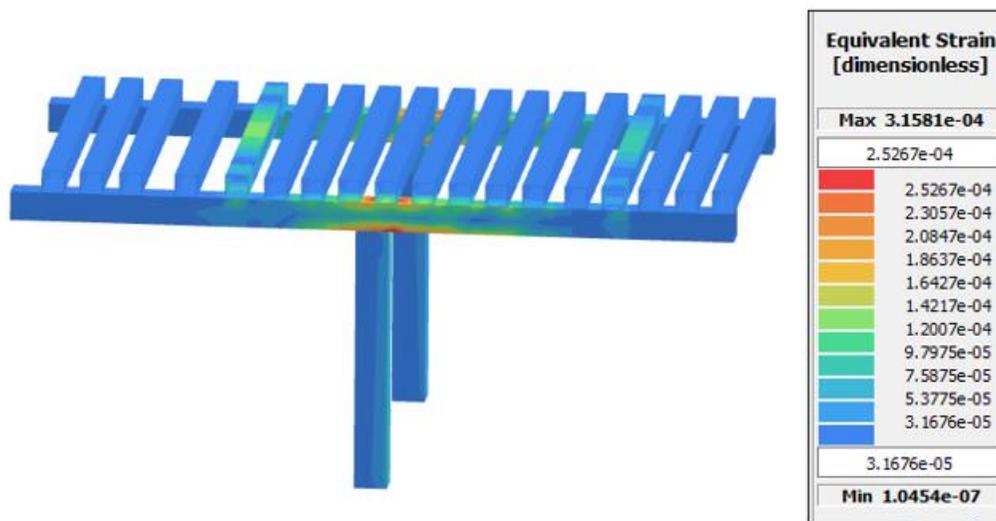


Fuente: Propia

En la figura 50. se puede apreciar el resultado de la simulación de desplazamiento al trabajar con perfil cuadrado. El valor máximo de desplazamiento ocurre en la parte más alejada de la viga principal donde se ubica la mayor parte de la carga del vehículo (60%) presentando un valor máximo de 5.48 mm. La figura 51 muestra los resultados de la simulación de deformación unitaria al trabajar con columna cuadrada.

Figura 51.

Resultados de la simulación de deformaciones unitaria, perfil cuadrado

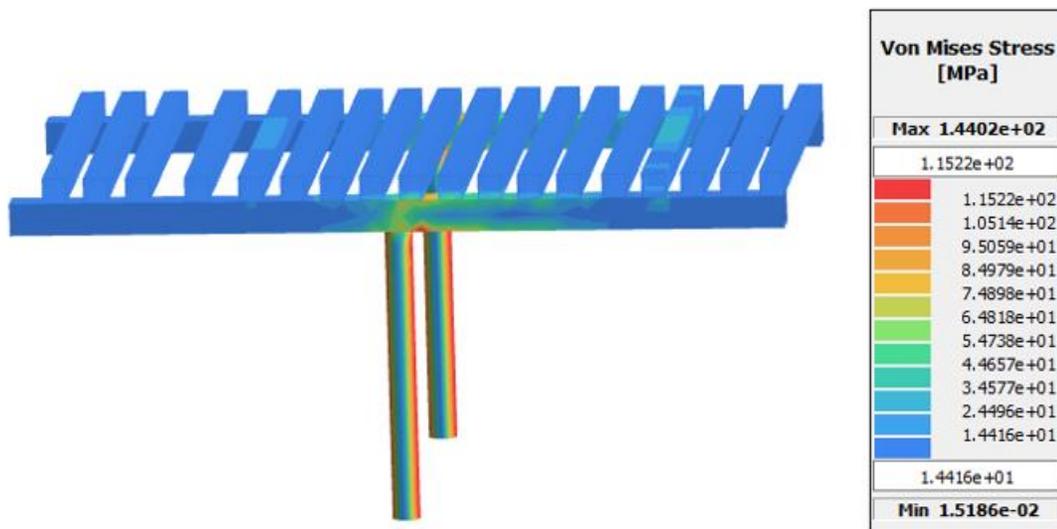


Fuente: Propia

3.3 Columna Perfil Circular

Figura 52.

Resultados simulación esfuerzo de Von Mises Perfil Circular



Fuente: Propia

Se realiza la simulación al trabajar con una columna circular diámetro 200 mm y espesor 3 mm. En la figura 52. se puede apreciar que el esfuerzo máximo ocurre en las columnas, presentando un valor máximo de 144 MPa.

Figura 53.

Resultados simulación desplazamiento Perfil Circular

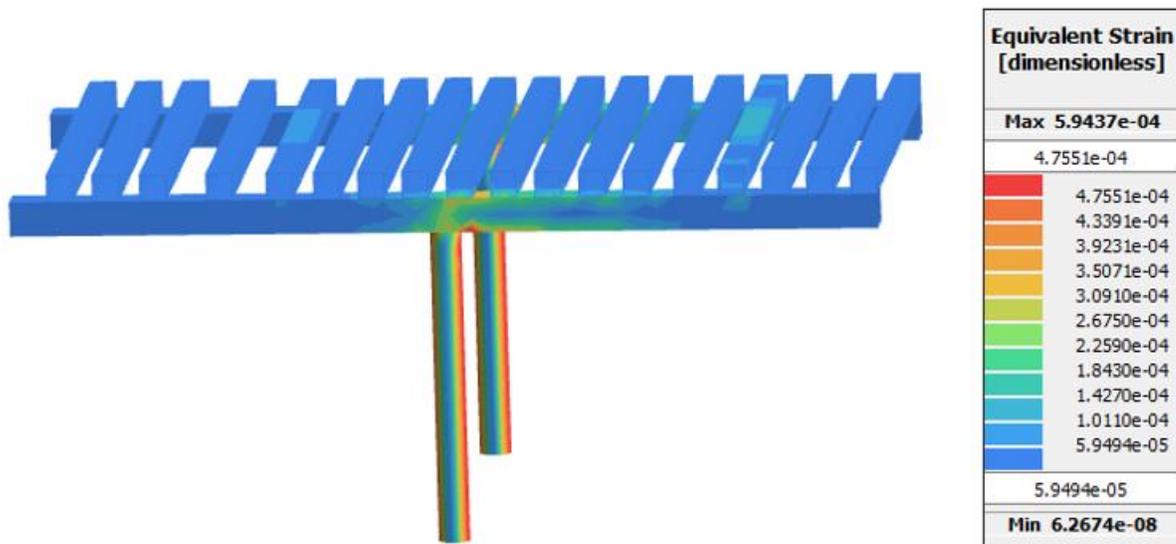


Fuente: Propia

En la figura 53. se puede apreciar el resultado de la simulación de desplazamiento al trabajar con perfil circular. El valor máximo de desplazamiento ocurre en la parte más alejada de la viga principal donde se ubica la mayor parte de la carga del vehículo (60%) presentando un valor máximo de 4.6mm. La figura 54. muestra los resultados de la simulación de deformación unitaria al trabajar con columnas perfil circular.

Figura 54.

Resultados de la simulación de deformación unitaria con columnas circulares



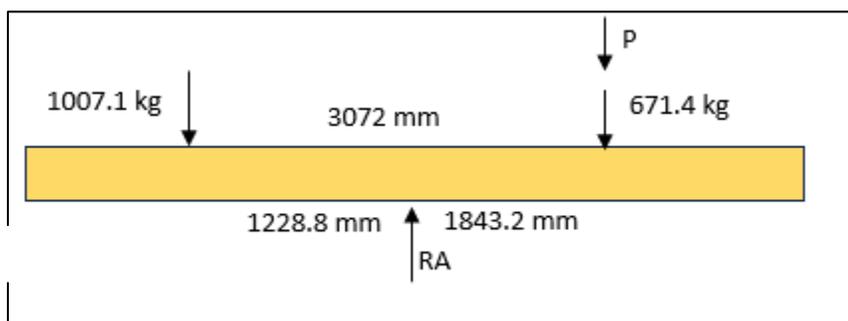
Fuente: Propia

3.4 Validación Simulaciones

Para verificar los valores obtenidos de las simulaciones se procede a calcular el desplazamiento máximo que ocurre en la viga principal mediante el uso del teorema de Castigliano. La figura 55 muestra el diagrama de cuerpo libre de la viga principal al aplicar una carga ficticia P en el punto donde se desea determinar el desplazamiento.

Figura 55.

Diagrama de cuerpo libre de la viga principal



Fuente: Propia

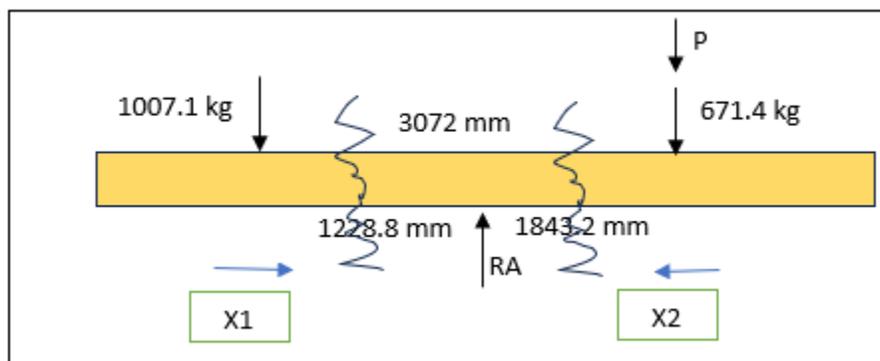
$$\sum F_y = 0$$

$$R_A = 1678.5 + P$$

Para analizar la viga principal se realizan dos cortes como se muestra en la figura 56 y después se determina la ecuación de momentos que actúa en cada uno de los segmentos para finalmente aplicar el teorema de Castigliano y determinar el desplazamiento.

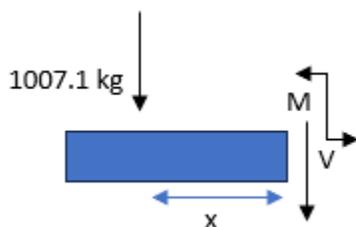
Figura 56.

Diagrama de cuerpo libre – cortes



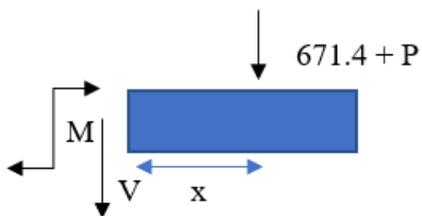
Fuente: Propia

Corte 1 $0 \leq X1 \leq 1228.8 \text{ mm}$



$$M = -1007.1 x$$

Corte 2 $0 \leq X2 \leq 1843.2 \text{ mm}$



$$M = -(671.4 + P) x$$

Cálculo del desplazamiento usando el teorema de Castigliano. $E = 2141404.04 \text{ kg/cm}^2$. $I = 2044.0532 \text{ cm}^4$.

$$\Delta_A = \int_0^L \frac{\left(\frac{\partial M}{\partial P}\right)_{(M_{P=0})}}{EI} dx$$

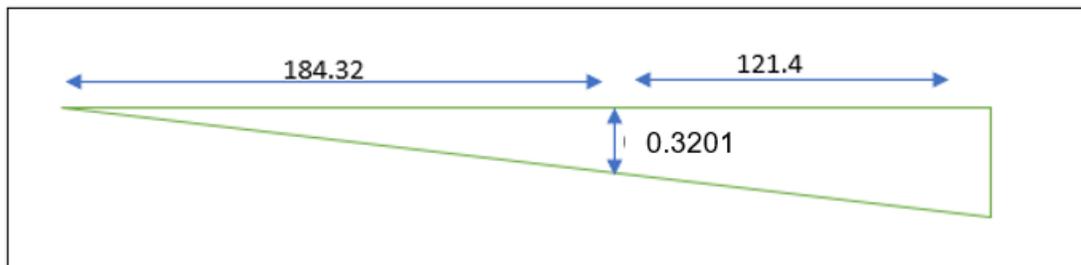
$$\Delta_A = \int_0^{122.88} \frac{(-1007.1x)(0)}{EI} dx + \int_0^{184.32} \frac{(-671.4x) * (-x)}{EI} dx$$

$$\Delta_A = 0.3201 \text{ cm}$$

Para determinar el desplazamiento máximo que tiene en el lugar en el punto más alejado de la viga se utiliza relaciones geométricas y el desplazamiento calculado. Ver Figura 57. Deflexión en la viga principal.

Figura 57.

Deflexión en la viga principal



Fuente: Propia

Al aplicar la función tangente inversa entre los lados conocidos se puede determinar el ángulo del triángulo y a partir de ello se puede determinar el desplazamiento máximo en la esquina de la viga.

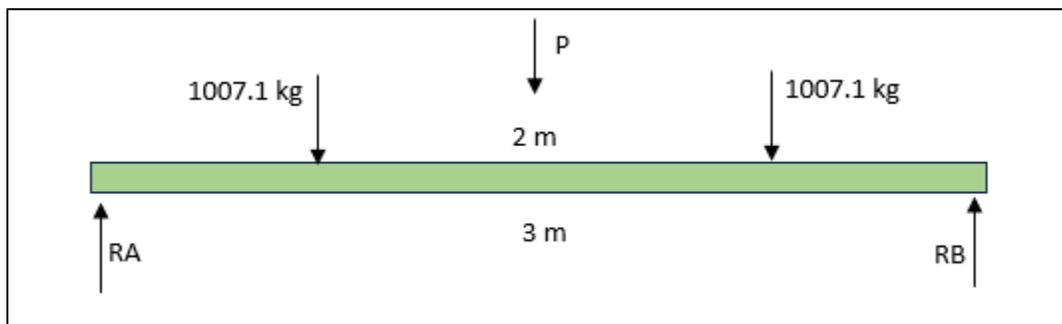
$$\theta = \tan^{-1} \frac{0.3201}{184.32} = 0.099$$

$$\Delta_x = 0.528 \text{ cm}$$

Se procede a realizar el cálculo de la deflexión de la viga secundaria. El desplazamiento máximo ocurre en el centro de la viga que soporta 2100 kg distribuidos en dos puntos de apoyo. La figura 58 muestra el diagrama de cuerpo libre de la viga secundaria aplicada la carga ficticia P en el punto donde se desea determinar el desplazamiento.

Figura 58.

Diagrama de cuerpo libre viga secundaria.



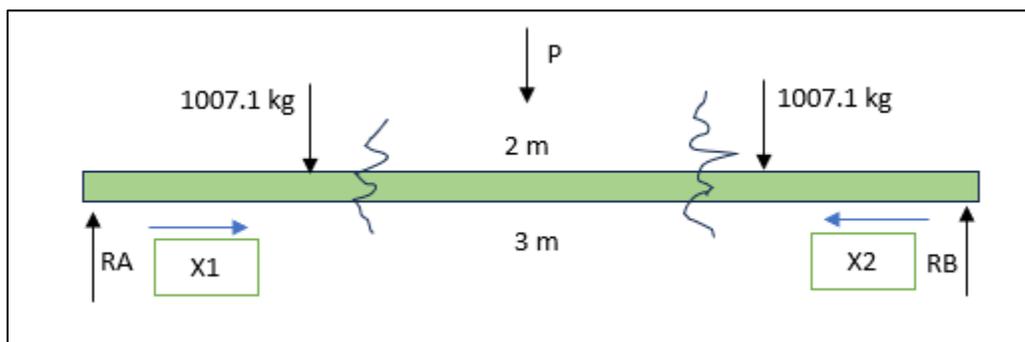
Fuente: Propia

$$\begin{aligned} \sum F_Y &= 0 \\ R_A + R_B &= 2014.2 + P \\ \sum M_A &= 0 \\ 3R_B - 0.5(1007.1) - (2.5)(1007.1) - P(1.5) &= 0 \\ R_B &= 1007.1 + 0.5P \\ R_A &= 1007.1 + 0.5P \end{aligned}$$

La figura 59 muestra un esquema del corte en la viga que se utiliza para realizar el análisis mediante el teorema de Castigliano.

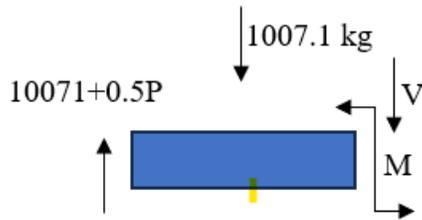
Figura 59.

Esquema del corte en la viga secundaria



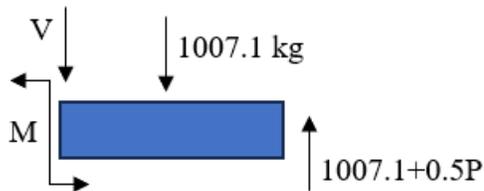
Fuente: Propia

Corte 1 $0 \leq X1 \leq 1.5 \text{ m}$



$$M = (0.5P + 1007.1)x - 1007.1(x - 0.5)$$

Corte 2 $0 \leq X_2 \leq 1.5 \text{ m}$



$$M = (0.5P + 1007.1)x - 1007.1(x - 0.5)$$

Cálculo del desplazamiento en el punto central de la viga secundaria usando el teorema de Castigliano. $E = 21414040400 \text{ kg/m}^2$. $I = 7.7426 \times 10^{-6} \text{ m}^4$.

$$\Delta_A = \int_0^L \frac{\left(\frac{\partial M}{\partial P}\right)_{(M_P=0)}}{EI} dx$$

$$\Delta_A = \int_0^{1.5} \frac{(503.55)(0.5x)}{EI} dx + \int_0^{1.5} \frac{(1007.1x - 335.7x^2)(0.5x)}{EI} dx$$

$$\Delta_A = 0.0034 \text{ m} = 3.4 \text{ mm}$$

4. Discusión de Resultados

Para comparar los resultados obtenidos se utiliza una tabla en la que se ubican los valores máximos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria al trabajar con columnas de perfil cuadrado, perfil circular y perfil tipo I. La tabla 10, 11 y 12 muestran los resultados de las simulaciones sobre distintos perfiles.

Tabla 10.*Resultados Perfil H220B*

	Esfuerzo analítico	Esfuerzo Simulación	Desplazamiento analítico	Desplazamiento Simulación
Viga Principal	83 MPa	74 MPa	5.28	4.9 mm
Viga Secundaria	51 MPa	49 MPa	3.4 mm	3.6 mm

Fuente: Propia

A continuación, se muestra el resultado del cálculo del error entre el resultado que se obtiene analíticamente y el resultado que se obtiene mediante simulaciones del perfil H.

$$\% E_{Esfuerzo} = \frac{83 - 74}{83} * 100 = 10.8 \%$$

$$\% E_{Desplazamiento} = \frac{3.4 - 3.6}{3.4} * 100 = |-5.9|\%$$

$$\% E_{Desplazamiento} = \frac{3.4 - 3.6}{3.4} * 100 = 5.9\%$$

Tabla 11.*Resultados Perfil cuadrado*

	Esfuerzo analítico	Esfuerzo Simulación	Desplazamiento analítico	Desplazamiento Simulación
Viga Principal	83 MPa	76 MPa	5.28 mm	5.4 mm
Viga Secundaria	51 MPa	45 MPa	3.4 mm	3.6

Fuente: Propia

A continuación, se muestra el resultado del cálculo del error entre el resultado que se obtiene analíticamente y el resultado que se obtiene mediante simulaciones del perfil cuadrado.

$$\% E_{Esfuerzo} = \frac{83 - 76}{83} * 100 = 8.4 \%$$

$$\% E_{Desplazamiento} = \frac{5.28 - 5.4}{5.28} * 100 = |-2.27|\%$$

$$\% E_{Desplazamiento} = \frac{5.28 - 5.4}{5.28} * 100 = 2.27\%$$

Tabla 12.*Resultados Perfil circular*

	Esfuerzo analítico	Esfuerzo Simulación	Desplazamiento analítico	Desplazamiento Simulación
Viga Principal	83 MPa	85 MPa	5.28 mm	4.63 mm
Viga Secundaria	51 MPa	54 MPa	3.4 mm	3.5 mm

Fuente: Propia

A continuación, se muestra el resultado del cálculo del error entre el resultado que se obtiene analíticamente y el resultado que se obtiene mediante simulaciones del perfil cuadrado.

$$\% E_{Esfuerzo} = \frac{83 - 85}{83} * 100 = |-2.4|\%$$

$$\% E_{Esfuerzo} = \frac{83 - 85}{83} * 100 = 2.4 \%$$

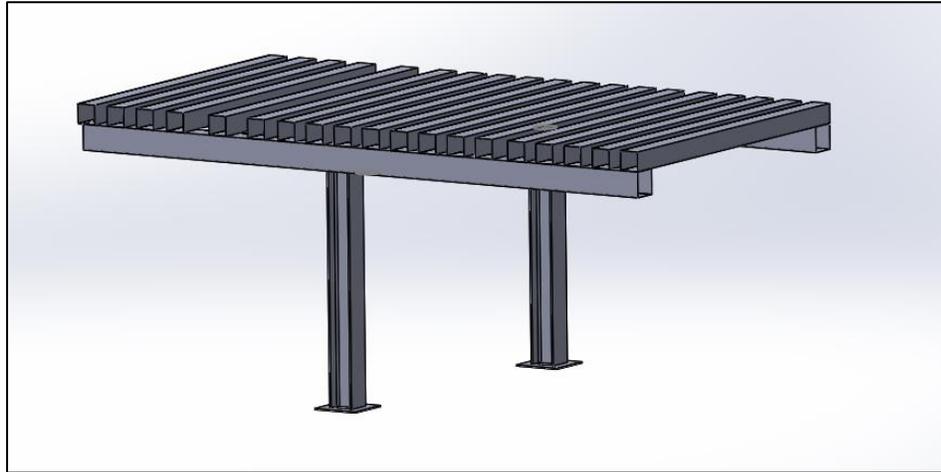
$$\% E_{Desplazamiento} = \frac{5.28 - 4.63}{5.28} * 100 = 12.3 \%$$

Teóricamente, los desplazamientos que ocurren en la viga principal deberían ser los mismos, sin embargo, estos difieren en su valor ya que para realizar el análisis y cálculo analítico se toma en cuenta que el contacto entre la viga principal y la columna ocurre en un solo punto. Mientras que al trabajar con el software SimSolid, el contacto ocurre en toda la cara de la columna, y ya que las columnas presentan geometrías diferentes, el valor de desplazamiento varía ligeramente.

La estructura que se selecciona para la construcción es la que presenta columnas tipo H220B debido a que la columna se encuentra disponible en el mercado y los elementos que componen en la plataforma se pueden fabricar a partir de planchas de acero de espesor 3 mm La figura 60 muestra la alternativa seleccionada de la estructura de elevador de autos para parqueaderos verticales.

Figura 60.

Alternativa seleccionada de la estructura de elevador de autos para estacionamientos verticales.



Fuente: Propia

5. Conclusiones

Se pudo determinar mediante la simulación realizada en el software SimSolid, a partir del prototipo generado en SolidWorks, que la viga principal de la plataforma es el elemento donde se desarrollan mayores esfuerzos, específicamente en la unión con la columna presentando un valor de 83 MPa para el perfil W seleccionado. Además, dicho elemento es el que presenta mayor desplazamiento en uno de sus puntos, esto ocurre en el punto más lejano con respecto a la columna donde se ubica el eje que presenta la mayor carga (60 % del peso del vehículo 2100 kg) debido a la ubicación del motor. El valor de desplazamiento máximo que se obtiene es 4.9 mm.

Se pudo comprobar mediante simulaciones que la resistencia del acero ASTM 572 grado 50 $S_y = 350$ MPa es adecuada para fabricar los elementos que conforman la estructura ya que presenta un factor de seguridad general de 4.2 al elevar un vehículo con un peso total de 3.5 toneladas.

Se determinó mediante cálculos estructurales y simulación mediante el software SimSolid, tomando en cuenta que la plataforma debe soportar la carga del vehículo Chevrolet Tahoe 2023

(3.5 toneladas) y presentar un factor de seguridad superior a 4, que la estructura de la plataforma se compone de vigas principales, vigas secundarias y columnas. Las vigas principales son tubos cuadrados de dimensión 170 x 3 mm, las vigas secundarias 200 x 3 mm y la columna seleccionada es perfil tipo H 220 HB.

El estudio concluye indicando que, desde el punto de vista estructural, la plataforma y la estructura del elevador si son factibles de materializar ya que los elementos que los componen: vigas de 200 x 3 mm, vigas de 170 x 3 mm y columna H220 HB son perfiles metálicos que se encuentran disponibles en el mercado. Además, es una estructura segura debido a que el factor de seguridad de diseño es 4.

6. Recomendaciones

Se recomienda que el trabajo de diseño estructural presentado en este documento se continúe y se desarrolle el mecanismo de elevación a partir de los elementos estructurales seleccionados.

Se recomienda desarrollar un prototipo del elevador propuesto en el presente trabajo para que este puede ser presentado a posibles consumidores y a partir de los datos obtenidos evaluar una posible entrada al mercado.

Se recomienda determinar el valor actual de los elementos seleccionados en el mercado ecuatoriano y establecer una viabilidad económica para la construcción de la estructura del elevador.

REFERENCIAS

- Aguilar, A. (21 de mayo de 2020). *Historia de los Elevadores*. Obtenido de <https://elevadoresdeauto.com/2020/05/21/historia-de-los-elevadores-2/>
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2011). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: Novena edición, McGraw Hill.
- CHEVROLET. (Junio de 2023). *ESPECIFICACIONES: TAHOE* . Obtenido de <https://www.chevrolet.com.ec/content/dam/chevrolet/south-america/ecuador/espanol/index/technical-sheets/15-pdfs/ft-tahoe.pdf>
- Coba, G. (24 de Septiembre de 2023). *PRIMICIAS*. Obtenido de <https://www.primicias.ec/noticias/economia/ventas-nuevos-vehiculos-ecuador/#:~:text=Eso%20es%20igual%20a%20un,del%20Centro%20de%20Matriculaci%C3%B3n%20Bicentenario.>
- Codimec. (21 de diciembre de 2016). *¿QUÉ ES UNA ESTRUCTURA METALICA?* Obtenido de <https://www.codimec.com/single-post/2016/12/21/c2bfquc389-es-una-estructura-metalica>
- Dassault Systems. (2018). *Diagramas de vigas*. Obtenido de https://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/cworks/HIDD_HELP_BEAM_BENDING_MOMENT.htm
- Diaz, M. (2020). *Manual técnico de estructuras metálicas*. Cartagena - Colombia: Fundación tecnológica Antonio de Arevalo.
- DISMETAL. (2022). *VIGAS DE ACERO HEB*. Obtenido de <https://dismetal.ec/productos/vigas/heb>

- Frias, E. (2004). El método de los elementos finitos. En *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante el método de los elementos finitos* (págs. 111 - 352). Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- GAMT. (2022). *Análisis de elementos finitos*. Obtenido de <https://gamtperu.com/servicios/analisis-de-elementos-finitos/>
- GLS Industrias. (19 de agosto de 2021). *Software de Simulación*. Obtenido de <https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/software-de-simulacion>
- HIDRO PARK. (2020). *MULTIPLICADORES DE PARQUEO*. Obtenido de https://es.hydropark.com/product/multiplicadores-de-parqueo.html?gclid=Cj0KCQjwvL-oBhCxARIsAHkOiu2PkQYc4AgdgTLaLfy8W3CukUqZvkWGbMsi0XxXaJKnlzD9dy9i-saAgX0EALw_wcB
- Ingenieros Asesores. (21 de febrero de 2023). *La simulación estructural más allá de los elementos finitos*. Obtenido de <https://ingenierosasesores.com/actualidad/simulacion-estructural/>
- IPP. (Noviembre de 2021). *Proceso creativo*. Obtenido de <https://www.ipp.edu.pe/blog/proceso-creativo-etapas/>
- Juárez, A. (2019). *ARCUX*. Obtenido de Tipos de estructuras metálicas: <https://arcux.net/blog/tipos-de-estructuras-metalicas/>
- Kareyan, T. (2017). *DISEÑO Y CÁLCULO DE UN ESTACIONAMIENTO VERTICAL*. Barcelona: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.
- López, J. (2016). *DISEÑO DE UN ESTACIONAMIENTO VERTICAL PARA EDIFICIO MARIÑO*. Quito: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL.
- Olesa. (2018). *¿Qué es un cilindro hidráulico?* Obtenido de <http://olesa.es/cilindro-hidraulico/>
- Perez, R. (2016). *Método para el diseño conceptual mecánico*. Cuba: Universidad de Granma.

- Prestige Litf. (2023). *Elevadores*. Obtenido de <https://1lifts.es/product/elevador-de-coches-columnas>
- Riba, C. (2002). *Diseño Concurrente*. Barcelona: UPC Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB).
- Tamayo, P. (2003). *Diseño de un elevador de autos para mantenimiento*. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Tamborero, J. (2017). *Elevadores de vehículos: seguridad*. España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT).
- TAS. (2023). *Elevadores de Vehículos*. Obtenido de <https://www.tas-seguridad.com/productos/control-de-acceso-vehicular/elevadores-de-vehiculos>
- Wikipedia. (2020). *Distribución de peso*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_de_peso
- Wilson, D., Buffa, J., & Lou, B. (2007). *Física*. México: Sexta Edición, Pearson.