DISEÑO DE ESTRUCTURA PLEGABLE BASADA EN ORIGAMI PARA LA PROTECCIÓN DE VEHÍCULOS

Álvaro José Rojas Herrera
Sebastián Londoño García

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CALI, COLOMBIA
2024

DISEÑO DE ESTRUCTURA DE SEGURIDAD BASADA EN ORIGAMI PARA LA PROTECCIÓN DE VEHÍCULOS

Álvaro José Rojas Herrera
Sebastián Londoño García

DIRECTORES:
José Isidro García Melo, Ph. D
José Tomás Buitrago, M. Sc.

DOCUMENTO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CALI, COLOMBIA
NOVIEMBRE 2024

I. AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que influyeron directa e indirectamente en el desarrollo de este proyecto de grado. A nuestros directores José Isidro García y José Tomas Buitrago por su orientación, paciencia y apoyo constante a lo largo de todo el proceso de investigación. A nuestras familias por su amor comprensión y motivación en momentos difíciles. A profesores y compañeros, quienes nos brindaron su conocimiento y apoyo cuando más se necesitó. Este logro es el resultado del esfuerzo colectivo, y a todos ustedes les debemos nuestro más profundo agradecimiento.

Álvaro – Agradezco a mi madre y a mi hermano por su inagotable apoyo y amor. A mis compañeros Sebastián y Obando por la ayuda inmediata cada que les consultaba. A mis profesores José Isidro, José Tomas, Diego Núñez, Cristhian Ramírez y Pablo por su orientación. A mis amigos quienes siempre me han alentado a lograr mis metas y a mi gran amiga quien siempre me daba la mano en los buenos y malos momentos. Especialmente agradezco a **Lucas**, Doko, Zeus y Cleo quienes fueron mis compañeros de trasnocho, los amo.

Sebastián – Este trabajo no es solo un documento es un puente que conecta sueños con realidades, una chispa del vasto universo del conocimiento que hemos intentado capturar. Es un espejo donde se reflejan la perseverancia y las ganas de avanzar, una página en la historia de nuestra superación. A mis abuelos, Carlos y Hermelinda, les dedico un agradecimiento eterno por ser raíces firmes y maestros de vida dejando su huella imborrable en este humilde aporte. A mis padres, custodios de mis pasos, gracias por su fe inquebrantable, por sostenerme cuando flaqueé y celebrar conmigo cada logro. A Dayana Martínez, mi compañera, quien vio en mí un potencial que a veces yo mismo dudaba, mi gratitud infinita. Y a Álvaro, compañero de viaje y amigo, gracias por caminar a mi lado no solo en las páginas de este documento, sino en los pasos de este largo sendero.

II. RESUMEN

Este trabajo sustenta en el objetivo general el diseño de una estructura basada en origami que contribuye a la seguridad de los vehículos. Para esto, fueron integrados conceptos de arquitectura e ingeniería. El marco metodológico adoptado planteó una secuencia en dos etapas de diseño, conceptual y básico. En la primera, fue seleccionada una estructura básica basado en un patrón de origami, Yoshimura. Por su parte, la segunda etapa el desarrollo de un modelo teórico, complementado con análisis por elementos finitos para estimar el comportamiento de la estructura bajo diferentes escenarios de carga.

Como resultado, aunque la solución planteada presenta una viabilidad técnica un coeficiente de seguridad de 2,5, la implementación es inviable debido a los costos asociados de la materia prima. En este contexto, este trabajo se presenta como un material bibliográfico en nuevas aplicaciones, como refugios de emergencia plegables. En este contexto, futuras investigaciones podrían centrarse en la integración de materiales compuestos avanzados y en sistemas de despliegue automatizado, con el fin de mejorar la comodidad de uso y reducir los costos.

.

III. PALABRAS CLAVE

- Origami: Arte japones de doblar papel para crear figuras, sin usar tijeras ni pegamento.
- Patrón: Guía visual o instrucción que muestra los pasos y pliegues necesarios para crear una figura.
- Esfuerzo: Es la medida de la fuerza aplicada sobre un material dividida por su área, usada para analizar su resistencia y deformación.
- Deformación: Es el cambio en la forma o tamaño de un material cuando se le aplica una fuerza.
- Parámetro: Es una variable o valor que define o influye en el comportamiento de un sistema o proceso.
- Malla: Es la división de un modelo en pequeñas partes llamadas elementos, usada para simular y analizar su comportamiento físico.
- Carga: Fuerza o condición aplicada a una estructura o material que genera esfuerzo y deformación.

IV. ABSTRACT

This thesis is based on the general objective of designing an origami-inspired structure to enhance vehicle safety. To achieve this, concepts from architecture and engineering were integrated. The adopted methodological framework followed a two-stage sequence: conceptual design and basic design. In the first stage, a basic structure was selected based on an origami pattern, Yoshimura. In the second stage, a theoretical model was developed and complemented with finite element analysis to estimate the structure's behavior under different load scenarios.

As a result, although the proposed solution achieves a safety factor of 2.5, its implementation is unfeasible due to the high costs associated with raw materials. In this context, this work serves as a bibliographic resource for new applications, such as foldable emergency shelters. Future research could focus on integrating advanced composite materials and automated deployment systems to enhance usability and reduce costs.

V. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Árbol del problema 3
Figura 2. Árbol de solución 4
Figura 3. Patrón diagonal (a), Patrón Miura-Ori (b), Patrón Yoshimura (c), (Curletto, 2016). 6
Figura 4. Yoshimura Tunnel Shelter (a), Yoshimura Dome Shelter (b), Miura-Ori Tunnel Shelter (c), (Norman & Arjomandi, 2017). 6
Figura 5. Esquemas que ilustran el proceso de implementación, (Lee & Gattas, 2016) 7
Figura 6. Comportamiento estático de diferentes estructuras plegables (Stavric & Wiltsche, 2014) 8
Figura 7. Plegado inverso con reflejo en el plano α, (Stavric & Wiltsche, 2014) 9
Figura 8. Patrón Miura-Ori, (Stavric & Wiltsche, 2014) 10
Figura 9. Patrón trapezoidal, (Stavric & Wiltsche, 2014) 11
Figura 10. Patrón Yoshimura, o patrón de diamantes, (Stavric & Wiltsche, 2014) 11
Figura 11. Patrón de plegado para la estructura regular más pequeña posible (p=5), (De Temmerman, arch, Mollaert, & Van Mele, 2007) 12
Figura 12. Las tres etapas del despliegue para una estructura plegable regular (p=7; β =120°): completamente desdoblada, posición erguida y totalmente compacta para transporte, (De Temmerman, arch, Mollaert, & Van Mele, 2007) 13
Figura 13. Para una estructura de P paneles, el ángulo β puede ser modificado como se desee con el fin de afectar el ancho de la envergadura, (De Temmerman, arch, Mollaert, & Van Mele, 2007) 14
Figura 14. Parámetros usados para describir completamente una estructura plegable, (De Temmerman, arch, Mollaert, & Van Mele, 2007) 15
Figura 15. Distribución de esfuerzos en una placa plana calculados con el método de elementos finitos. 18
Figura 16. Despliegue de la función de calidad (Bahill & Chapman, 1993) 20
Figura 17. Relación entre parámetros β y θ para diferente número de placas. 33
Figura 18. Dimensiones de la placa triangular A y B respectivamente. 34
Figura 19. Dimensiones generales de las bisagras. 34
Figura 20. Renderizado de la estructura desplegada cubriendo el automovil. 35
Figura 21. Disposición de las bisagras en la estructura para unir las placas triangulares. 36
Figura 22. Tercio de la estructura. 38
Figura 23. Representación geométrica del tercio de la estructura, (autoría propia). 40
Figura 24. Representación gráfica de los puntos de desplazamiento remoto. 40
Figura 25. Puntos de desplazamiento remoto en el modelo de elementos finitos. 40
Figura 26. Elementos de 30 mm con 450k nodos y 220k elementos. 42
Figura 27. Elementos de 20 mm con 630k nodos y 304k elementos. 42
Figura 28. Calidad de la malla con elementos de 5 mm. 42
Figura 29.Carga “Standard earth gravity” aplicada sobre la estructura en dirección -y. 44
Figura 30. Deformaciones máximas de 35,6 mm y 36,63 mm para las placas 3 y 8 respectivamente, escala x9. 45
Figura 31.Esfuerzo máximo de Von Mises de 31,8 MPa para el escenario 1 45
Figura 32.Presión de viento de 0,50 kN/m2 aplicada a las placas 4, 5, 9 y 10. 46
Figura 33.Deformación máxima de 42 mm para escenario 2, escala x8.1. 46
Figura 34.Esfuerzo máximo de 45 MPa en la placa 3 frente al escenario 2. 47

Figura 35. D.C.L. de una persona apoyada sobre una superficie plana. 47
Figura 36. Condiciones de borde. 48
Figura 37. Deformación máxima de 52 mm para el escenario 3. 48
Figura 38. Esfuerzo máximo equivalente de Von-Mises de 56 MPa para el escenario 3..... 49
Figura 39. Bisagra MKCL250, dimensiones. 57
Figura 40. Rueda FIXSER con freno. 58
Figura 41. Placas de aluminio. 59

VI. LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pasos para llevar a cabo el proceso de diseño, (Norton, 2009) 15
Tabla 2. Matriz de decisión para selección de tipo de plegado. 23
Tabla 3. Importancia relativa y dificultad estimada del desarrollo de cada característica..... 24
Tabla 4. Características finales con las que deberá contar el producto. 25
Tabla 5. Listado resumido de requerimientos del producto..... 26
Tabla 6. Matriz de decisión de las alternativas de diseño..... 30
Tabla 7. Dimensiones objetivo de la estructura. 31
Tabla 8. Dimensiones generales de la estructura y número de módulos. 33
Tabla 9. Propiedades de materiales elegidos para las placas triangulares y las bisagras..... 35
Tabla 10. Configuración de los apoyos para la simulación por elementos finitos. 40
Tabla 11. Masa [Kg] de los elementos para 1 módulo de la estructura. 43
Tabla 12. Elementos y cantidad de la estructura. 56
Tabla 13. Costo y cantidad de elementos de la estructura. 59
Tabla 14. Costos de operaciones..... 61
Tabla 15. Costos administrativos. 61
Tabla 16. Costo final de la estructura propuesta. 61

VII. TABLA DE CONTENIDO

I. AGRADECIMIENTOS I
II. RESUMEN II
III. ABSTRACT IV
IV. LISTA DE FIGURAS V
V. LISTA DE TABLAS VII
VI. TABLA DE CONTENIDO VIII
CAPÍTULO 1 1
1.1. Introducción 1
1.2. Objetivos 4
1.3. Objetivo general 4
1.4. Objetivos específicos 4
1.5. Estado del arte 5
CAPÍTULO 2 8
2. Marco conceptual 8
2.1. Estructuras plegables 8
2.2. Técnicas básicas de plegado 9
2.3. Patrón Miura-Ori 10
2.4. Patrón trapezoidal 10
2.5. Patrones triangulares 11
2.6. Geometría de estructuras planas plegables 11
2.7. Diseño paramétrico 14
2.8. Proceso de diseño 15
2.9. Método de elementos finitos 17
2.10. Criterios de falla 18
2.11. Criterio de falla de Von Mises 18
2.12. Despliegue de la función de calidad (Q.F.D.) 19
CAPÍTULO 3 21
3. Requerimientos 21
3.1. Alternativas del patrón de origami 21
3.2. Definición de características de diseño 23
3.3. Requerimientos de diseño 26
CAPÍTULO 4 28
4. Alternativas de solución 28

4.1. Estructura transportable con apoyos en rines o carrocería, enfoque de transportabilidad....28
4.2. Estructura fija en lugar con despliegue por ruedas, enfoque de seguridad....29
4.3. Elección de alternativa de solución....30
4.4. Cálculo de dimensiones de la estructura....31
CAPÍTULO 5....38
5. Análisis estructural....38
5.1. Calidad y convergencia de la malla....41
5.2. Escenario 1: Peso propio....43
5.3. Condiciones de carga....44
5.4. Análisis de deformaciones....44
5.5. Análisis de vulnerabilidad estática....45
5.6. Escenario 2: Carga de viento....45
5.7. Condiciones de carga....46
5.8. Análisis de deformaciones....46
5.9. Análisis de vulnerabilidad estática....46
5.10. Escenario 3: Estado combinado de cargas....47
5.11. Condiciones de carga....48
5.12. Análisis de deformaciones....48
5.13. Análisis de vulnerabilidad estática....49
CAPÍTULO 6....56
6. Elección de componentes....57
6.1. Bisagras....57
6.2. Ruedas....58
6.3. Placas de aluminio....58
6.4. Estimación de costos....59
CAPÍTULO 7....63
7. Conclusiones....63
7.1. Trabajos futuros....64
Anexos....66
Bibliografía....69

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción

Según estadísticas de enero y febrero del 2022, tomadas por el RUNT (Registro único nacional de tránsito) los colombianos compraron alrededor de 37 mil vehículos nuevos, esta cifra muestra un aumento del 7,6% con respecto al año pasado 2021, teniendo como lideres en ventas las marcas Renault, Mazda y Nissan, que representaron el 46% de total de ventas (El Tiempo, 2022). Cifras realmente importantes a la hora de analizar el mercado objetivo de nuestro país, y también demuestra que aun frente adversidades económicas las familias colombianas siguen prefiriendo como método de transporte el vehículo propio, por factores como comodidad y seguridad.

Una referencia complementaria sobre las tendencias del mercado automotriz nos comparte Andemos (Asociación Nacional de Movilidad Sostenible), indicando que el vehículo líder en ventas en nuevos por sobre todas las marcas fue el Chevrolet Spark modelo 2013. Adicionalmente, el sector de usados fue el vehículo que en 2021 vendió más de 54 mil unidades. Lo anterior es un claro ejemplo de que a pesar del impacto económico vivido durante la pandemia de COVID-19 los colombianos seguimos supliendo la necesidad de mejorar nuestra calidad de vida, que lastimosamente se ve afectada por el problema de inseguridad que ha existido siempre.

Entre enero y junio del mismo año se reportaron más de 18 mil robos de vehículos en el país, así lo afirmó el presidente de Asopartes, quien asegura que fueron robados 4.371 vehículos y 14.415 motocicletas, siendo los vehículos Renault, Chevrolet, Nissan y Toyota los principales objetivos (L, 2020). Esto, contribuye a generar un aumento en la incertidumbre e inseguridad en el país. Así, en (El Tiempo, 2021) se reporta que en agosto del 2021 el 38,7% de los encuestados carecía de una sensación de seguridad al salir de casa, esto es especialmente crítico si se considera que en noviembre del mismo año las cifras se incrementaron al 41,6%, creciendo un 2,9% en tan solo 4 meses.

Aunque los hurtos suceden en diferentes lugares y momentos del cotidiano, un momento crítico se presenta cuando el vehículo queda fuera de un parqueadero o zona segura, recurriendo con frecuencia a vigilancia ambulante con mínimos parámetros de confiabilidad.

El problema se incrementa si se considera que las actuales soluciones de vivienda limitan los espacios de seguridad a los vehículos. Según (El Tiempo, 2020) solo en la capital del país entre enero y mayo hubo 17 denuncias por hurto al día, teniendo un total de los 2.672 casos en el 2020, esto deja en evidencia que hay un campo en el que debemos trabajar para proporcionar seguridad y calidad de vida a los ciudadanos no solo Cali, sino del país.

Por esta razón, este proyecto está orientado a fomentar la creación de espacios de seguridad, mediante la implementación de soluciones modernas, tales como, las estructuras plegables inspiradas en origami. Para esto, se planteará una solución especifica tomando como modelo principal el vehículo top en ventas, esto para amplificar el impacto a las familias y personas a nivel nacional, dando una solución ingenieril al problema de seguridad que vivimos hoy como país y sociedad.

Las estructuras transformables en arquitectura tienen la capacidad de cambiar de forma y reajustarse en respuesta a condiciones y necesidades variables que pueden incluir cambios en el entorno y las condiciones climáticas, diferentes requisitos funcionales y situaciones de emergencia (Fenci, 2017). Estas se pueden clasificar de diferentes maneras dependiendo de su sistema estructural, debido a la amplia aplicabilidad en el campo de la arquitectura móvil, se adentró con más detalle a las estructuras de placas plegables (Temmerman, 2007).

El interés por las estructuras plegables y sus múltiples aplicaciones ha aumentado considerablemente desde la segunda mitad del siglo pasado. En la disciplina de la arquitectura, el futuro del diseño se basa en la creación de espacios dinámicos y flexibles, estructuras temporales y ligeras para una sostenible de ingeniería. Estudios recientes acerca de este tipo de estructuras como el de Chapel St. Loup (Buri & Weinand, 2010), y el de ICD/ITKE Research Pavilion, (la Magna & et al, 2013), describen aplicaciones arquitectónicas y estructurales de las mismas.

Basado en lo anteriormente expuesto, en esta propuesta se plantea la integración de las estructuras plegables como modelo de protección, esto debido a sus propiedades físicas de auto sustentación, con los materiales y el diseño correcto, podremos convertir esta idea en

una propuesta nunca vista a nivel nacional como solución a esta problemática de seguridad que nos afecta a todos.

A nivel nacional se carece de registros de propuestas de solución a la inseguridad parecida a la aquí planteada, además, no se registra desarrollo en el campo de estructuras plegables basadas en origami, haciendo que este proyecto sea el primero en su clase a nivel nacional. Este proyecto a su vez será precursor en la seguridad del hogar, dando inicio al mercado de estructuras plegables para proteger y ampliar espacios del hogar.

Con el objetivo de presentar de forma breve el hilo lógico-conductor que conecta las causas y efectos del desarrollo de este proyecto, se presenta la **Figura 1** que muestra el diagrama del árbol de problema en función de las causas esenciales, directas e indirectas que rodean el proyecto, así como sus consecuencias más directas y significativas.

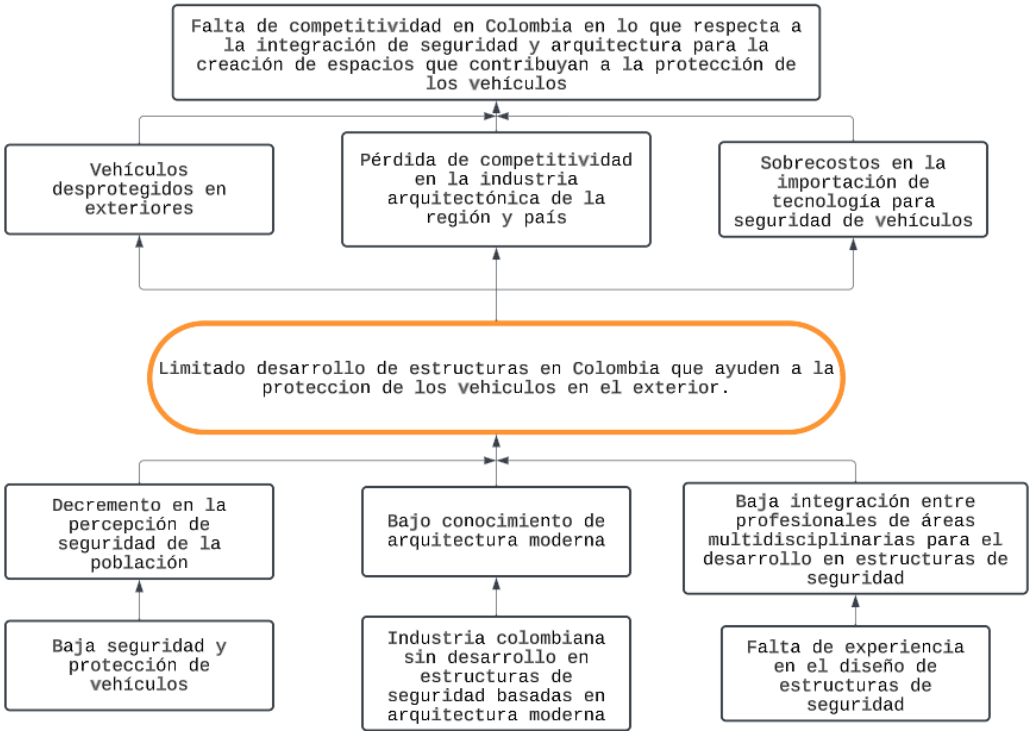


Figura 1. Árbol del problema

Por otra parte, la **Figura 2** muestra el esquema que recoje los criterios de evaluacion que pemiten brindar una adecuada solucion al problema previamente mencionado.

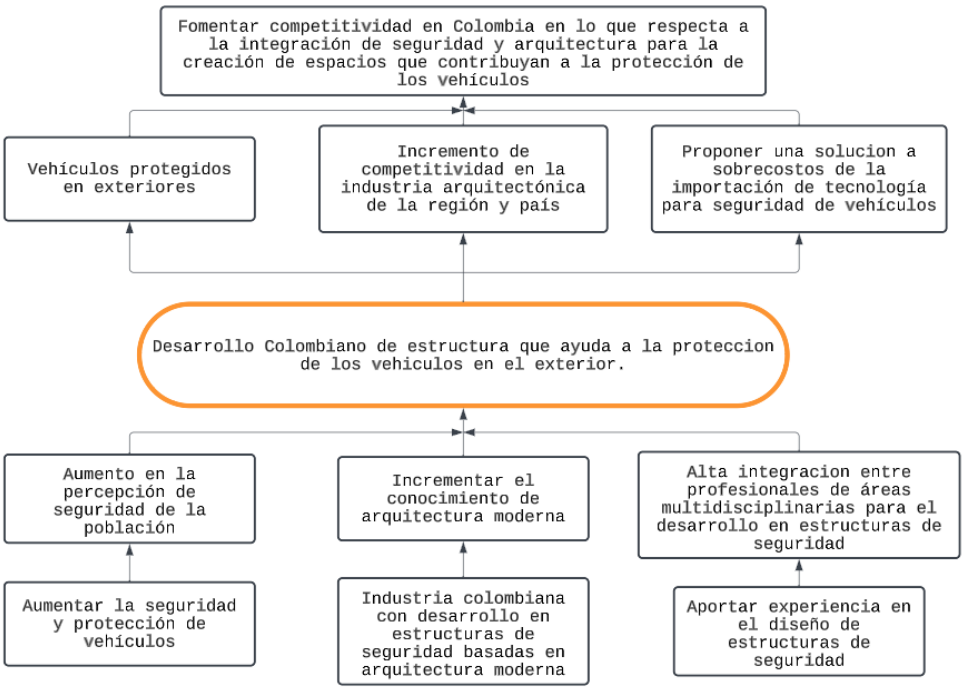


Figura 2. Árbol de solución

1.2. Objetivos

1.3. Objetivo general

Diseñar una estructura basada en origami que aporte a la seguridad de vehículos, integrando la arquitectura moderna y la ingeniería como elementos fundamentales en su concepción.

1.4. Objetivos específicos

- Definir los requerimientos comerciales y estructurales de la estructura plegable de seguridad.
- Realizar el diseño conceptual de la estructura plegable mediante un abordaje de diseño basado en modelos.
- Verificar los componentes mecánicos mediante herramientas computacionales o analíticas.

- Estimar costos de la solución teniendo en cuenta la tecnología regional.

1.5. Estado del arte

Con el tiempo, el desarrollo de nuevas técnicas aparece, por ello la naturaleza del arte y tecnología del ser humano ha ido evolucionando conforme crecen las necesidades de la sociedad. El origami es una actividad cultural tradicional de Japón que ha sido incorporada recientemente en aplicaciones de ingeniería. El Dr. Taketoshi Nojima fue el primero en proponer el concepto de ingeniería del origami en el año 2003 para aplicar sus ventajas en la industria. (Ichiro & Akiko, 2022)

En 2011 David Dureisseix del Laboratorio de Mecánica de Contacto y Estructuras en Francia, dio una visión general de los mecanismos y patrones con el origami, donde propuso que a nivel de diseño las estructuras tipo origami mezclan las propiedades globales (plegabilidad, presencia de mecanismos...) con varias restricciones (geometría particular, colocación de enlaces), y señaló que hay pocas herramientas disponibles para el desarrollo de estas, además mencionó algunas como: generación automática de patrones, condiciones de plegabilidad (teorema de Kawasaki-Justin), y la teoría de los mecanismos. (Dureisseix D. , 2012)

Hani Buri estudió los 3 diferentes patrones de plegado como se muestra en la **Figura 3**, que pueden ser usadas para aplicaciones arquitectónicas y estructurales, estos son los patrones Yoshimura, Miura-Ori y el diagonal (Norman & Arjomandi, 2017). La base del patrón Yoshimura es un pliegue en forma de diamante en una de sus diagonales, los cilindros de paredes delgadas presentan este patrón bajo compresión axial y cuanto más agudo sea el ángulo entre la diagonal del diamante y su borde, más plana será la curvatura del patrón. La base del patrón diagonal es un paralelogramo doblado en su diagonal y aparece cuando un cilindro de paredes delgadas se comprime con una distorsión, este patrón se diferencia principalmente del Yoshimura por el hecho de que los pliegues de valle del patrón de diamante forman una línea poligonal helicoidal. El patrón Miura-Ori tiene una característica de ondulación en zigzag en dos direcciones, esto permite extender y retraer el patrón en ambas direcciones. Miura usó esta capacidad para construir velas solares para satélites que podían empaquetarse de manera muy compacta y una vez desplegadas, tenían la máxima extensión. (Buri & Weinand, 2008).



Figura 3. Patrón diagonal (a), Patrón Miura-Ori (b), Patrón Yoshimura (c), (Curletto, 2016).

En (Curletto, 2016) se modelaron estructuras rígidas plegables de origami para comprender el comportamiento de los modelos de origami y el proceso de plegado, incorporando enfoques de modelamiento y diseño como los de (Miyazaki,1996) y (Tachi, 2009), y la metodología paramétrica como instrumento ideal para integrar tanto las características geométricas como las tecnológicas.

En 2017 bajo la problemática de los campos de refugiados en Malawi, donde el 44,3% de los albergues eran refugios improvisados con paja y tablas de madera según el Instituto de las Naciones Unidas para Formación Profesional e Investigaciones (UNITAR), los ingenieros Monica Norman y Kaveh Arjomandi se dieron a la tarea de diseñar una nueva estructura de polietileno de alta densidad basada en origami, usando dos tipos de pliegues diferentes (patrón Yoshimura y el patrón Miura-Ori) como en la **Figura 4**, para reemplazar estos refugios improvisados. (Norman & Arjomandi, 2017)

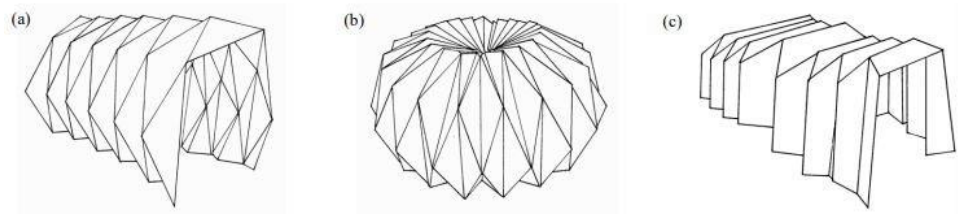


Figura 4. Yoshimura Tunnel Shelter (a), Yoshimura Dome Shelter (b), Miura-Ori Tunnel Shelter (c), (Norman & Arjomandi, 2017).

La profesora de mecánica aplicada de la Universidad de Harvard y autora principal del artículo (Melancon, B., Mora, Hoberman, & Bertoldi, 2021), diseñó estructuras inflables basadas en el origami, lo suficientemente compactas para ser transportadas fácilmente, pero que pueden adoptar configuraciones más grandes para diferentes aplicaciones, desde refugios hasta velas solares para satélites, estás estructuras idealmente deberían ocupar el mínimo

volumen al ser recogidas, y ser capaces de proporcionar una carcasa estructuralmente robusta al desplegarse, como se muestra en la **Figura 5**.

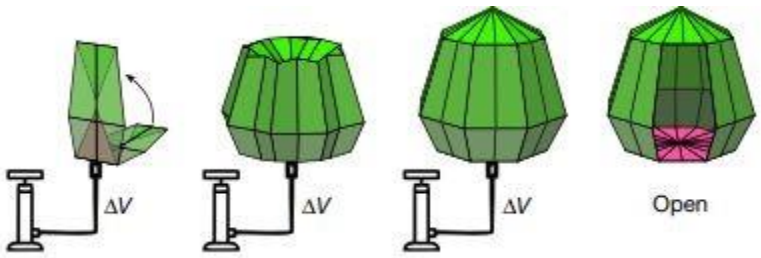


Figura 5. Esquemas que ilustran el proceso de implementación de estructuras inflables basadas en origami, (Lee & Gattas, 2016)

Basado en lo anteriormente expuesto y después de analizar diferentes soluciones comerciales y/o propuestas, el desarrollo de este proyecto presenta varios aspectos innovadores a nivel regional, como son: la integración de un concepto de estructura plegable que incrementa la seguridad de automóviles en parqueaderos basado en el concepto de origami. Adicionalmente, la solución propuesta esta soportada en diferentes herramientas y teorías propias de la ingeniería mecánica, tales como la resistencia de materiales y mecanismos, que permiten incrementar la confiabilidad de la solución planteada. Finalmente, fue analizada la manufactura de la solución planteada, considerando la infraestructura tecnológica de la región. En este contexto, este proyecto aporta a la consolidación de la generación de una aplicación de la ingeniería mecánica en la seguridad temporal de vehículos para el beneficio de una sociedad que actualmente percibe un alto nivel de inseguridad en esta área.

CAPÍTULO 2

2. Marco conceptual

En este apartado se presenta el marco teórico usado como referencia para la contextualización de los soportes teóricos que soportan la propuesta. Esta información aporta un apoyo al lector y su proceso de comprensión del marco metodológico en el cual se desglosaron los objetivos específicos y los antecedentes tecnológicos para conceptualizar al lector sobre la tecnología actual y el proceso de diseño que se siguió en el desarrollo del trabajo.

2.1. Estructuras plegables

Las estructuras plegables son una rama de la aplicación de las técnicas de plegado, también conocidas como origami, la cual está enfocada en el diseño de arquitectura moderna. Las estructuras plegables son especialmente usadas debido a dos razones principales, el desarrollo de estructuras arquitectónicas creativas con grandes ventadas en la capacidad de carga y la generación de arquitectura plegable estética y moderna (Lee & Gattas, 2016). Las superficies horizontales pueden cubrir grandes áreas, sin embargo, estas tienden a doblarse bajo su propio peso muerto; como solución a esto se proponen pliegues, estos pliegues le dan resistencia para soportar cargas, como se puede ver en la **Figura 6**, representado desde una superficie plana (**Figura 6.a**), hasta la capacidad de una estructura plegable para soportar varias veces su propio peso (**Figura 6.e**).

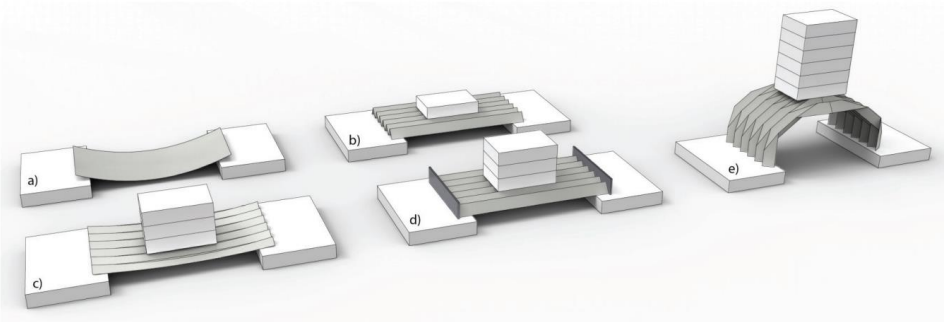


Figura 6. Comportamiento estático de diferentes estructuras plegables (Stavric & Wiltsche, 2014)

Para ser capaces de modelar estructuras complejas y generar patrones de doblez, primero se debe entender la teoría del plegado. Esto incluye el conocimiento básico de patrones de plegado, métodos de plegado, y las transformadas espaciales del proceso de plegado.

2.2. Técnicas básicas de plegado

La fabricación de estructuras plegables en tres dimensiones envuelve dos técnicas dominantes, los pliegues paralelos y los pliegues inversos.

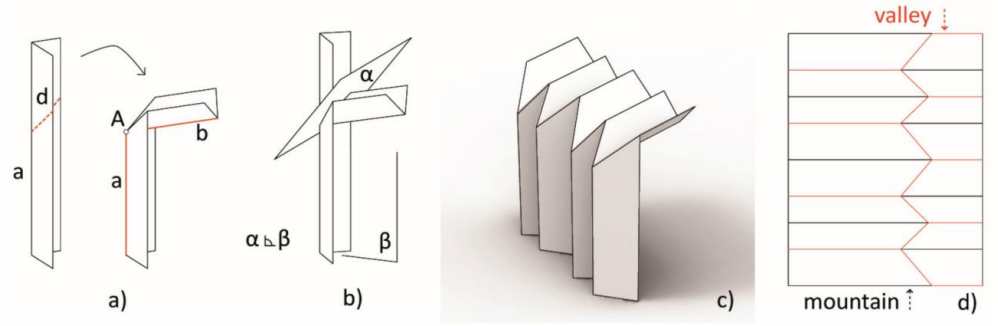


Figura 7. Plegado inverso con reflejo en el plano α, (Stavric & Wiltsche, 2014)

La técnica de pliegues paralelos es un proceso que implica el doblado de un material a lo largo de las líneas del patrón, lo que da como resultado la creación alternada de valles y montañas, tal como se ilustra en la **Figura 7 (b, d).** En este contexto, se define como valles a los pliegues que generan una forma convexa, mientras que las montañas corresponden a los pliegues que producen una forma cóncava.

En particular, al observar la **Figura 7 (a)** y realizar un doblez a lo largo de la diagonal (d), podemos notar un fenómeno interesante. La montaña que se forma a lo largo de la línea (a) se divide en dos segmentos divididos por el punto (A), uno de los cuales sigue siendo una montaña, mientras que el otro se convierte en un valle. Esto ejemplifica de manera clara cómo es posible transformar montañas en valles y viceversa mediante un proceso de plegado inverso.

Mediante las dos técnicas de plegado anteriores, se pueden caracterizar los más relevantes patrones de plegado conocidos hoy en día, entre los que destacamos el patrón Miura-Ori, el patrón trapezoidal, y los patrones triangulares.

2.3. Patrón Miura-Ori

Este tipo de patrón de plegado es especialmente usado en sistemas estructurales espaciales que generan energía cinética solar en el espacio (ver **Figura 8**). La mayor característica de este patrón es que al desplegarse los nodos permanecen todos en un mismo plano linear, esto es particularmente interesante para los diseñadores que buscan elementos lineares o elementos planos.

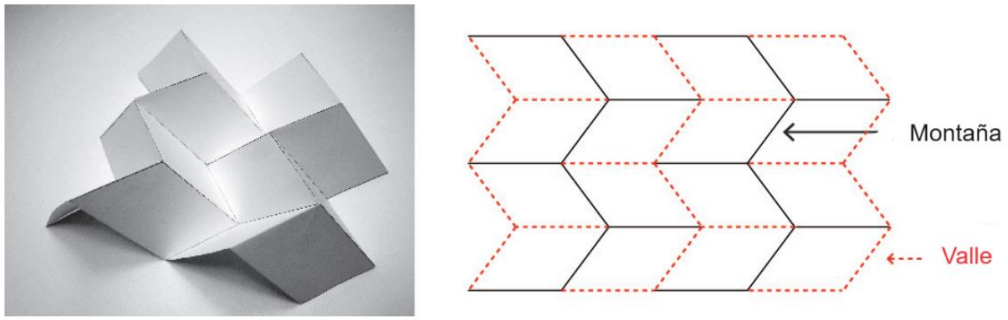


Figura 8. Patrón Miura-Ori, (Stavric & Wiltsche, 2014)

2.4. Patrón trapezoidal

Este patrón se desarrolla al reemplazar los paralelogramos del patrón Miura-Ori con trapezoides congruentes, sus principales usos abarcan la arquitectura y algunas aplicaciones de ingeniería (ver **Figura 9**). Su mayor característica es que al doblarse genera un cilindro y demás variedades de formas dependiendo de la simetría de sus trapezoides.

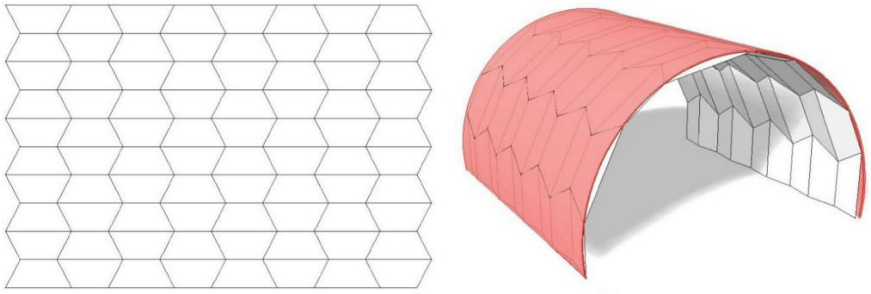


Figura 9. Patrón trapezoidal, (Stavric & Wiltsche, 2014)

2.5. Patrones triangulares

Estos patrones son particularmente desafiantes de simular debido a la gran cantidad de grados de libertad involucrados. Sin embargo, es posible derivar estos patrones a partir de patrones trapezoidales mediante la reducción de uno de los bordes paralelos. Dentro de la categoría de patrones triangulares, es relevante mencionar el patrón diamante o patrón Yoshimura (consulte la **Figura 10**), el cual se desarrolló al observar la deformación de cilindros delgados sometidos a compresión axial.

En el contexto de este proyecto, se ha llevado a cabo un estudio particularmente detallado de este tipo de patrón, dado que posee diversas características altamente beneficiosas. Estas características incluyen la capacidad de incorporar una distribución de curvatura arbitraria y una alta resistencia a la flexión circunferencial. El patrón Yoshimura se compone de un conjunto de triángulos isósceles idénticos, conectados de manera simétrica en cada fila, de modo que dos triángulos se asemejan a la forma de diamantes.

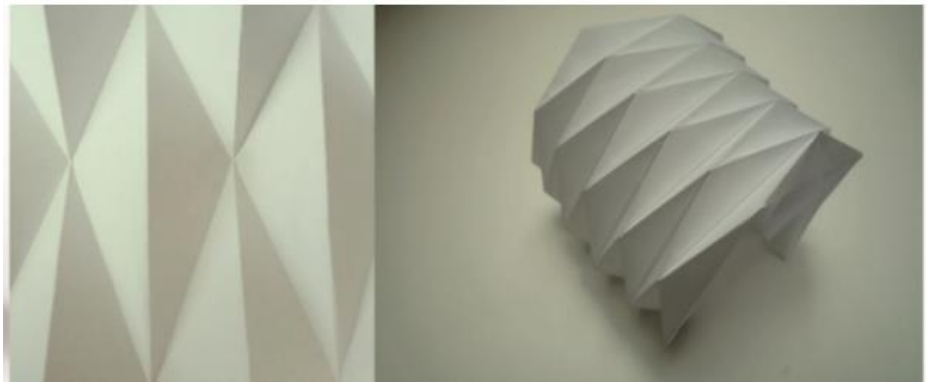


Figura 10. Patrón Yoshimura, o patrón de diamantes, (Stavric & Wiltsche, 2014)

2.6. Geometría de estructuras planas plegables

Las estructuras planas plegables se componen de una serie de placas triangulares que están unidas a lo largo de sus bordes mediante bisagras. Estas bisagras desempeñan un papel fundamental al permitir que la estructura se doble siguiendo un patrón de origami

predefinido, que se forma mediante la intersección de pliegues de valles y montañas. En la **Figura 11** se ilustra cómo el patrón de plegado se basa en la repetición del elemento básico denominado "P", el cual tiene una forma triangular y un ángulo de al menos 90 grados. A esta serie de placas conectadas en la dirección directriz se le denomina módulo "M", y el patrón de plegado puede expandirse al repetir el módulo M tantas veces como sea necesario en la dirección generatrix.

La caracterización de las estructuras plegables planas se basa en varios parámetros clave. Uno de ellos es el número de placas (p) que se encuentran a lo largo del módulo M. Los valores válidos para p son todos números impares iguales o superiores a 5, ya que de lo contrario la estructura podría volverse asimétrica, lo cual no es deseable en este contexto. Otro parámetro importante es el ángulo ápice (β), que determina cómo se intersecan las montañas en la estructura. Este ángulo β es especialmente relevante, ya que ejerce una influencia significativa en la curvatura resultante al desplegar la estructura. En resumen, los tres parámetros mencionados: p, M y β, son cruciales para definir la morfología de la estructura al desplegarse.

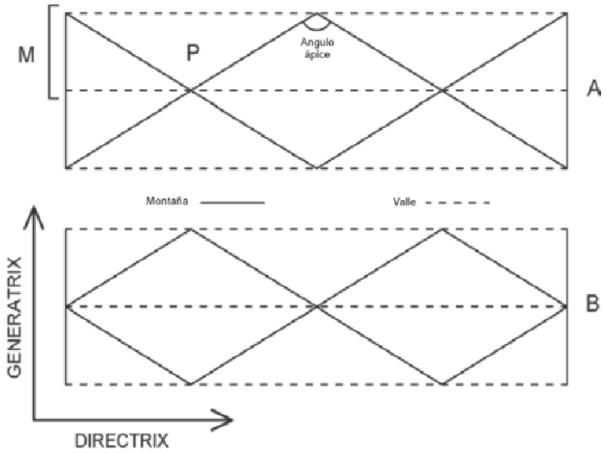


Figura 11. Patrón de plegado para la estructura regular más pequeña posible (p=5), (De Temmerman, arch, Mollaert, & Van Mele, 2007)

El ángulo β puede ser variable o no dentro de la estructura, definiéndola, así como estructura regular (β sin cambios) o estructura irregular (β cambia), esto da lugar a un sin número de diferentes patrones de plegado, sin embargo, entre más exótico el patrón de doblado, menos útil el espacio encapsulado por la estructura. Al momento de diseñar una

estructura móvil, buscamos que la versión doblada de esta sea compacta, por temas de transportabilidad. La **Figura 12** nos muestra una estructura regular con p = 7, y un β = 120°.

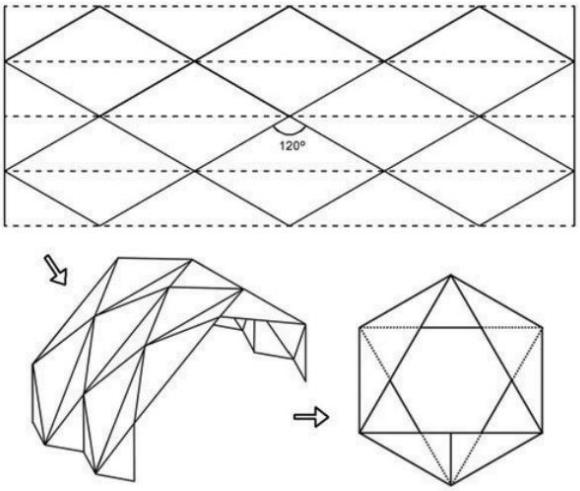


Figura 12. Las tres etapas del despliegue para una estructura plegable regular (p=7; β =120°): completamente desdoblada, posición erguida y totalmente compacta para transporte, (De Temmerman, arch, Mollaert, & Van Mele, 2007)

La **Ecuación 1** da como resultado el ángulo ápice β que hace que la estructura sea lo más compacta posible.

$$\beta = \pi \frac{(p-3)}{(p-1)} \qquad \textbf{(1)}$$

Es interesante notar como el ángulo β no solo afecta la capacidad de plegado, sino la geometría de toda la envergadura, como se puede ver en la **Figura 13** hay dos estructuras similares con el mismo número de paneles P, sin embargo, tienen deferentes ángulos β y su envergadura es afectada dramáticamente. En conclusión, el material de construcción puede ser usado de manera más eficiente y ahorrar en costos.

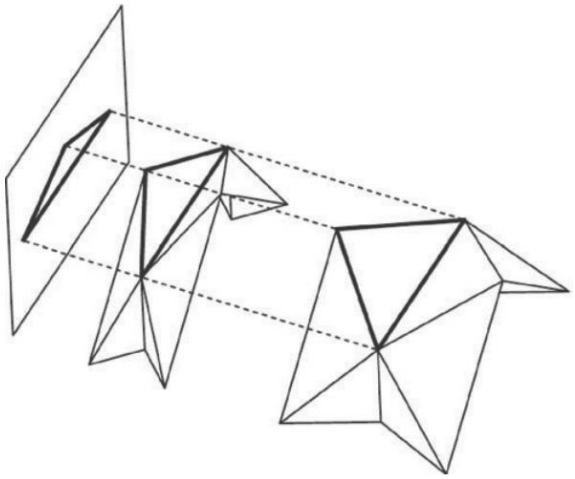


Figura 13. Para una estructura de P paneles, el ángulo β puede ser modificado como se desee con el fin de afectar el ancho de la envergadura, (De Temmerman, arch, Mollaert, & Van Mele, 2007)

2.7. Diseño paramétrico

Con el fin de diseñar la estructura debemos parametrizar completamente el módulo y la estructura tanto como se deba. En la **Figura 14** podrá visualizar parámetros como el ángulo ápex (β), longitud de barra (L), la envergadura (S), la altura (R), el ancho (W), el número de placas (P) y el ángulo de despliegue (θ) en un módulo. El ángulo θ mencionado anteriormente es sumamente relevante puesto que determina hasta qué punto estará desplegada la estructura, este ángulo puede variar desde 0° (posición compacta) hasta 90° (Posición plana, completamente desdoblada). Entre los extremos anteriores existe un valor único de θ que corresponde a la posición totalmente erguida de la estructura.

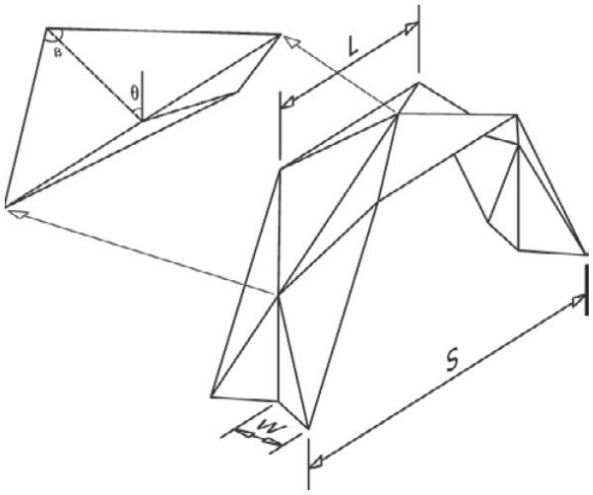


Figura 14. Parámetros usados para describir completamente una estructura plegable, (De Temmerman, arch, Mollaert, & Van Mele, 2007)

En este caso, como se comentó anteriormente, se enfocará en estructuras regulables. La relación entre el ángulo ápex y ángulo de despliegue fue calculada por (Temmerman, 2007), que, en conclusión, encontró la **Ecuación 2** donde el ángulo de despliegue θ es proporcional al arcoseno producto de la tangente entre pi y la cantidad de elementos y la tangente de la mitad del ángulo ápex.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\tan\left(\frac{\pi}{2(p-1)}\right)\tan\frac{\beta}{2}\right) \qquad \textbf{(2)}$$

Gracias a las **ecuaciones 1 y 2** podemos obtener el diseño de estructura ideal para realizar simulaciones y análisis.

2.8. Proceso de diseño

El diseño en ingeniería se define como el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización, este diseño puede ser simple o muy complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático; puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia. En la **Tabla 1** se enumeran los 10 pasos de diseño, que han sido usados por más de 40 años en la ingeniería, según (Norton, 2009).

Tabla 1. Pasos para llevar a cabo el proceso de diseño, (Norton, 2009)

Paso	Proceso
1	Identificación de la necesidad
2	Investigación preliminar
3	Planteamiento de objetivos
4	Especificaciones de desempeño
5	Ideación e invención
6	Análisis
7	Selección
8	Diseño detallado
9	Creación de prototipos y pruebas
10	Producción

En el marco de nuestro contexto, se han llevado a cabo tres de los diez pasos esenciales para la ejecución del proceso de diseño. Estos pasos incluyen la identificación de la necesidad, abordada de manera temprana en el texto y respaldada por el análisis del árbol del problema. La investigación preliminar ha sido detalladamente tratada en la sección correspondiente al estado del arte. Asimismo, el planteamiento de objetivos ha sido abordado en la sección dedicada a los objetivos generales y específicos, respaldado por el desglose proporcionado en el árbol de soluciones.

En los capítulos siguientes, se dirigirá nuestra atención hacia los pasos **4 al 9** del proceso de diseño, ya que nuestros objetivos no incluyen el paso **10,** la implementación de este diseño en producción. La realización eficiente de este proceso requiere fundamentos científicos que respalden nuestras decisiones. A tal efecto, se empleará el QFD (Despliegue de la Función de Calidad, por sus siglas en inglés) para abordar el paso 4, centrado en las especificaciones de desempeño. En cuanto al análisis, correspondiente al paso 5, se hará uso de una herramienta computacional conocida como la técnica de elementos finitos, proporcionando así un respaldo matemático a nuestras evaluaciones en términos de funcionalidad y resistencia. Para los pasos 6, 7, 8 y 9, aplicaremos los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestra formación en ingeniería mecánica. Posteriormente, se detallará la aplicación de estos conocimientos en cada uno de estos pasos.

2.9. Método de elementos finitos

Muchos problemas en ingeniería no nos permiten obtener una solución exacta a un sistema de ecuaciones. Por tanto, es necesario el uso de métodos que permitan obtener soluciones aproximadas. El método de elementos finitos nos permite discretizar un dominio y dar solución a las ecuaciones de gobierno de un fenómeno físico. Es parte fundamental en la ingeniería actual y constituye la base de los softwares de simulación de comportamiento mecánico.

Permite aplicarse a una variedad enorme de problemas, se usa en diseño y mejora productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos, en la **Figura 15** podemos ver un ejemplo de ello. Se pueden nombrar las siguientes etapas a la hora de crear un modelo con elementos finitos:

1) Discretizar el dominio: Se divide el dominio continuo en elementos de un tamaño finito.
2) Definir funciones de aproximación de la función solución: Se aproxima la solución como la combinación lineal de funciones conocidas.
3) Obtener la matriz de rigidez del elemento.
4) Ensamblar la matriz de rigidez global y obtener el sistema de ecuaciones completo del problema: Se construye una matriz que tiene en cuenta el aporte de cada elemento.
5) Solucionar el sistema para encontrar los valores desconocidos: Se resuelve el sistema de ecuaciones globales.
6) Cálculo de magnitudes derivadas: A partir de los valores soluciones posible obtener otras cantidades.

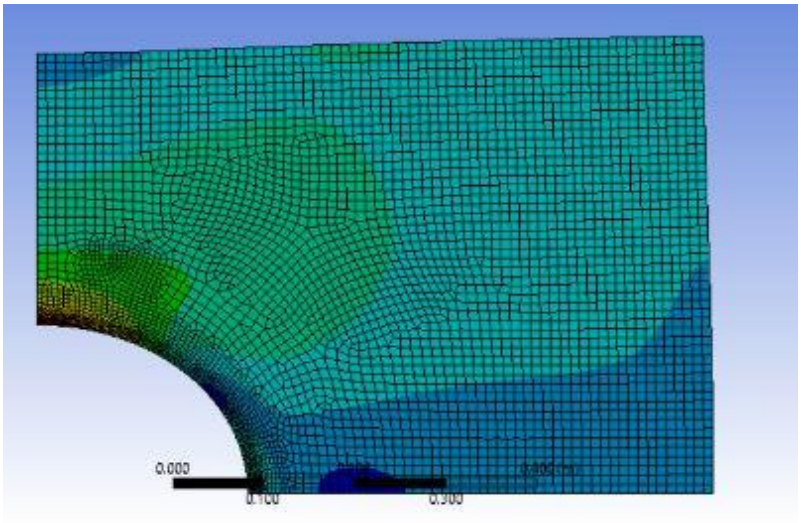


Figura 15. Distribución de esfuerzos en una placa plana calculados con el método de elementos finitos.

2.10. Criterios de falla

Los criterios de falla son fundamentales ya que proporcionan un marco para prever y entender como los materiales y estructuras pueden fallar bajo diferentes condiciones de carga específicas. Estos criterios proporcionan una base para el diseño y la evaluación de la integridad estructural en una variedad de aplicaciones.

2.11. Criterio de falla de Von Mises

El criterio de falla de Von Mises evalúa la falla de un material basándose en la combinación de tensiones principales, considerando tanto la tensión normal como las tensiones tangenciales (cortantes) (Budynas & Nisbett, 2011).

Este criterio es comúnmente utilizado para evaluar materiales que tienen una ductilidad significativa, como metales.

$$\sigma_{eq}=\sqrt{\frac{((\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2)}{2}} \quad \textbf{(3)}$$

La **Ecuación *3*** es la fórmula para el criterio de Von Mises, si el valor calculado por la fórmula es menor o igual a la tensión de fluencia del material, entonces se considera que el material no fallará.

2.12. Despliegue de la función de calidad (Q.F.D.)

Despliegue de la función de calidad o Q.F.D. por sus siglas en inglés, es una metodología utilizada en la gestión de calidad para convertir las necesidades del cliente en características de diseño y desarrollo. Fue desarrollado en Japón en la década de 1960 y se ha utilizado ampliamente en la ingeniería y la gestión de proyectos.

Su objetivo es alinear los productos o servicios con las expectativas y necesidades del cliente, en la **Figura 16** podemos ver un ejemplo de ello. Ayuda a traducir las voces del cliente en características técnicas específicas, asegurando así que los productos o servicios resultantes cumplan con las expectativas del cliente. Este proceso tiene varias etapas:

1. Identificación de las necesidades del cliente
2. Despliegue de las necesidades del cliente.
3. Desarrollo de la casa de calidad.
4. Priorización de características.
5. Despliegue interno y externo.
6. Desarrollo de planes de acción.

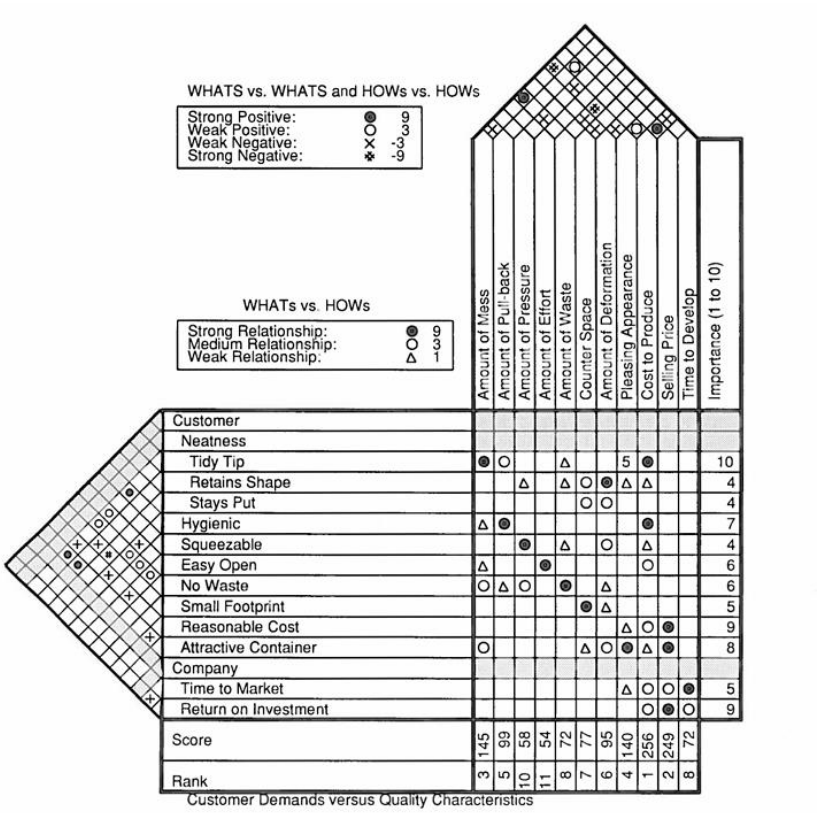


Figura 16. Despliegue de la función de calidad (Bahill & Chapman, 1993)

CAPÍTULO 3

3. Requerimientos

En este capítulo se presentan requerimientos y restricciones del producto que se quiere obtener en términos de geometría, dimensiones, seguridad y resistencia, generados a partir del análisis del problema, haciendo un análisis de las alternativas de solución con la capacidad de ser una solución viable para el problema que se encuentran actualmente disponibles en el mercado.

Una vez identificada la problemática en Colombia relacionada con la carencia de estructuras que contribuyan a la protección de los vehículos, el siguiente paso consiste en la elaboración de un producto que aborde de manera efectiva dicha cuestión. En línea con este objetivo y respaldados por la teoría de desarrollo de productos, llevamos a cabo una encuesta con el propósito de definir de manera satisfactoria las especificaciones que tanto un consumidor como un cliente pueden esperar comercialmente de dicho producto.

Más adelante en este capítulo se usarán los resultados de la encuesta, aplicando la teoría de la Casa de la Calidad, para procesar la información recogida en las encuestas y convertir las necesidades del usuario en características de calidad obtenidas en la etapa de diseño final. Luego, se hará un análisis minucioso para determinar cuál patrón de origami nos daría la alternativa más viable para nuestra solución.

3.1. Alternativas del patrón de origami

Basado en (Dureisseix D. , 2012), existen diversos tipos de patrones de plegado en el origami con alta aplicabilidad en el campo de la ingeniería. Según (Norman & Arjomandi, 2017) comparan 3 tipos de estructuras que se basan en el patrón Yoshimura y el Miura Ori, como se observa en la **Figura 4.** Las estructuras siguen 2 criterios de diseño muy importantes, estos son: (i) la estructura debe ser cómoda para 5 personas, (ii) la altura de la estructura debe ser adecuada para la estatura de un adulto promedio. Con los dos criterios de

diseño obtenemos unas dimensiones limpias para el túnel Yoshimura de: 10m x 2,5m x 2,5m, para el Domo Yoshimura se obtienen unas dimensiones limpias de: 9m x 4.5m y para el túnel Miura-Ori obtuvieron unas dimensiones limpias de: 11,25m x 2m x 2,5m.

Las pruebas y resultados se plasmaron en la matriz de la tabla 2 que nos permitió elegir la mejor opción a partir de 3 criterios de selección como el desplazamiento bajo carga, masa y volumen.

El primer criterio de selección hace referencia a cómo reacciona la estructura bajo cargas como el peso propio, y cargas externas como viento y lluvia. Para esto se realizó un análisis de esfuerzos y se determinó el caso de carga máxima para cada elemento de área, el esfuerzo experimentado por el elemento de área para el caso de carga principal se calculó promediando el esfuerzo producido en las juntas adyacentes, luego se comparó el esfuerzo promedio con el esfuerzo de fluencia para determinar los factores de seguridad. En este caso el rango de los factores de seguridad calculados para el refugio de túnel de Yoshimura (a) se situó entre 5 y 70, entre 19 y 1180 para el refugio de cúpula de Yoshimura (b), y entre 19 y 800 para el refugio de túnel de Miura-Ori (c). A partir de estos rangos entre las tres estructuras la estructura del túnel de Yoshimura parecía distribuir las tensiones de forma más uniforme por toda la estructura. La cúpula de Yoshimura mostró un comportamiento elástico casi lineal bajo cargas gravitacionales y laterales. El refugio Miura-Ori fue incapaz de soportar cargas tan intensas como las dos configuraciones anteriores, mientras que la estructura experimentó una elevada no linealidad.

El segundo criterio de selección hace referencia a la masa y peso de cada estructura, según las propiedades técnicas, la masa de cada refugio es de 1046,7 kg, 1602,1 kg y 1235,6 kg respectivamente.

El último criterio de selección se refiere al volumen ocupado y como optimizan el espacio usado. Completamente montado, la estructura del túnel Yoshimura ocupó un volumen aproximado de 74m^3 y la cúpula de Yoshimura ocupó aproximadamente 245 m^3 y el túnel de Miura-Ori ocupó aproximadamente 120 m^3. Comparando la masa con el volumen se obtuvo 14,2 kg/m^3 6,3 kg/m^3 y 10,3 kg/m^3 para cada refugio, respectivamente. Según estas cifras, la cúpula de Yoshimura es capaz de utilizar el material y el espacio resultante de forma más eficiente.

A continuación, en la **Tabla 2** podemos observar la matriz de decisión cuya escala varía de 1 a 3, siendo 1 poco eficiente y 3 eficiente, esta tabla fue llenada usando los datos anteriormente mostrados y calificándolos de manera relativa entre ellos.

Tabla 2. Matriz de decisión para selección de tipo de plegado.

Característica	Túnel Yoshimura	Cúpula Yoshimura	Miura-Ori Túnel
Comportamiento de desplazamiento bajo carga	3	2	1
Masa	1	3	2
Volumen	3	1	2
Total	**7**	**6**	**5**

Por lo tanto, la alternativa que ofrece el mejor comportamiento de desplazamiento bajo cargas y mejor relación peso/volumen es la alternativa del túnel Yoshimura.

3.2. Definición de características de diseño

Utilizando los datos recopilados a través de encuestas y la herramienta de la Casa de Calidad, que es una parte integral del Despliegue de la Función de Calidad (QFD), se siguió el siguiente proceso estructurado:

En el primer paso, se identificaron las características clave que los consumidores buscaban en el nuevo producto:

- *Funcionalidad:* El producto debe proteger eficazmente los accesorios del automóvil, como llantas, retrovisores, faroles, etc.
- *Calidad de manufactura:* Se busca un producto duradero, de alta calidad y bajo peso.
- *Compactibilidad y facilidad de transporte.*
- *Apertura manual:* Los usuarios prefieren un mecanismo de apertura manual.
- *Mantenimiento:* La capacidad de realizar mantenimiento para evitar recompras innecesarias.

- *Fiabilidad:* La seguridad del vehículo depende directamente de la fiabilidad del producto.

En el segundo paso, se determinaron la importancia relativa de estas características al contar la cantidad de personas que deseaban cada una. Esto permitió priorizar las características según la preferencia del consumidor.

El tercer paso consistió en identificar a los competidores principales en dispositivos de seguridad, excluyendo aquellos que estaban centrados en la protección del vehículo locativa. Se descubrió que, de los competidores posibles el bloqueador de dirección era popular, pero el bloqueador de encendido destacaba por cumplir mejor con las funciones deseadas, a pesar de algunas deficiencias en manipulación directa, manufactura y funcionalidad. En el cuarto paso, se desarrollaron estrategias para cumplir con los requisitos funcionales:

- *Diseño basado en origami:* Se centrará el diseño en una estructura moderna inspirada en origami.
- *Seguridad multipropósito:* Se implementarán medidas de seguridad para proteger tanto al vehículo como a sus accesorios.
- *Materiales ligeros:* Se emplearán materiales que garanticen un peso mínimo para facilitar el transporte y almacenamiento.
- *Despliegue manual:* Optaremos por un mecanismo de despliegue manual en lugar de asistido.
- *Plegabilidad:* El diseño se enfocará en hacer que el producto sea plegable para mayor versatilidad.

En el quinto paso, se determinó en qué medida nuestras estrategias pueden satisfacer las necesidades de nuestros clientes y se evaluó la complejidad de implementar estas características en un producto final. Este análisis arrojó como resultado la ponderación o relevancia de cada una de nuestras estrategias con respecto a las necesidades previamente identificadas. En la **Tabla 3**, se presenta un enfoque inicial de la importancia relativa y la dificultad estimada asociada a cada característica.

Tabla 3. Importancia relativa y dificultad estimada del desarrollo de cada característica.

Característica	Dificultad	Peso relativo (%)
Diseño de una estructura moderna	4	15,8
Seguridad multipropósito	9	23,4
Materiales de fabricación	6	21,5
Despliegue manual	8	18,4
Estructura plegable	8	20,9

La escala de dificultad se gradúa del 1 al 10, donde 1 representa una facilidad extrema de implementación y 10 denota una dificultad considerable. Asimismo, el peso relativo se refiere a la importancia relativa de cada característica en comparación con las demás.

El sexto y último paso consistió en transformar las características identificadas como estrategias en requisitos del usuario. Este procedimiento adicional puede repetirse según sea necesario con el objetivo de buscar una estrategia específica que contribuya a definir o clarificar el proceso de diseño del producto, en este caso se consideró que con este nivel de abstracción sería suficiente para generar una matriz de decisión completa. Al considerar estas estrategias como requisitos de usuario, se pudo redefinir aquellas estrategias que serían más útiles, ya que se tradujeron en requisitos más detallados y concretos que nuestro producto debe cumplir. En la **Tabla 4**, se presentan las características finales que el producto deberá cumplir, junto con sus respectivas ponderaciones relativas y niveles de dificultad asociados.

Tabla 4. Características finales con las que deberá contar el producto.

Característica	Dificultad	Peso relativo (%)
Mantenimiento y durabilidad	6	22,9
Seguridad	10	14,6

Costo total	8	29,2
Flexibilidad y adaptabilidad	9	15,8
Impacto en cronograma	8	17,5

De la anterior tabla se puede concluir la importancia que tiene cada característica en el diseño final, sin embargo, el nivel de dificultad nos sugiere que vamos a gastar una cantidad alta de tiempo en el proceso de diseño de determinadas características, a su vez, sugiere que es más probable gastar más recursos de los esperados inicialmente. Por lo que si bien se planteó una solución que satisface estos requerimientos, debemos decir que hay campos de mejora que podrán ser abordados en estudios y desarrollos posteriores a esta tesis.

3.3. Requerimientos de diseño

Usando la **Tabla 4, Tabla 2** e **Introducción** como punto de partida para establecer los fundamentos de nuestro proyecto de diseño. Este proceso implica recopilar información pertinente para la concepción del diseño y la satisfacción del cliente. En la **Tabla 5**, se presenta un resumen detallado de los requisitos propuestos para el desarrollo del proyecto, clasificándolos en tres categorías principales: requisitos funcionales, requisitos dimensionales y requisitos de diseño. Cada categoría incluye una serie de sub-requisitos diseñados para proporcionar especificaciones detalladas en cada área correspondiente.

Tabla 5. Listado resumido de requerimientos del producto

Listado de requerimientos de MAPOS		
Requerimientos funcionales	Requerimientos dimensionales	Requerimientos de diseño

Montaje rápido (MR): • Debe ser capaz de desplegarse en un tiempo menor que 10 minutos y el proceso debe ser intuitivo. **Estabilidad y resistencia (ER):** • Debe ser capaz de resistir condiciones climáticas adversas como viento y lluvia. Debe tener estabilidad estructural durante el uso. **Espacio interior utilizable (EI):** • El diseño debe adaptarse a un Chevrolet Spark GT y debe dar comodidad para maniobrar. **Versatilidad de uso (VU):** • Debe haber posibilidad de usar la cúpula en diferentes entornos y situaciones. **Materiales y durabilidad (MD):** • Los materiales usados deben garantizar la durabilidad y resistencia a largo plazo.	RD1: Cuando la cúpula esté retraída o plegada debe ocupar un volumen menor que el 30% con respecto al volumen cuando está desplegado para garantizar su función de portabilidad. RD2: Cuando la cúpula esté desplegada debe tener las siguientes dimensiones internas: Ancho mínimo interno: 2,5 m Largo mínimo: 5 m Altura mínima: 2 m	RC1: El diseño de la cúpula debe estar basado en el patrón Yoshimura de origami para cumplir funciones de pliegue y despliegue. RC2: El diseño de la cúpula debe tener una apariencia moderna y elegante.

CAPÍTULO 4

Diseño de estructura plegable

En esta sección se presenta los aspectos relevantes que orientaron el diseño conceptual. En este sentido, son presentadas las alternativas de diseño y la toma de decisiones que orientaron la definición del diseño conceptual.

4. Alternativas de solución

En la actualidad, aunque la oferta de productos similares es limitada, se identificaron diversas alternativas mediante un exhaustivo análisis de propuestas con objetivos similares disponibles en el mercado. Además, se han desarrollado alternativas específicas basadas en los requisitos y necesidades de los usuarios. Cabe recalcar que las siguientes alternativas cumplen con lo mínimo requerido para el producto, como lo es que sean plegables y de accionamiento manual.

4.1. Estructura transportable con apoyos en rines

Esta opción se centra en la capacidad del producto para ser transportado, lo que implica que el usuario pueda acceder a sus beneficios desde cualquier punto de estacionamiento. Esta propuesta se basa en dos requisitos principales:

- La estructura puede ser transportable en el maletero del vehículo.
- La estructura debe ser fácil y cómoda de desplegar, lo que implica que sea liviana y de fácil manejo para los usuarios.

Ventajas:

Portabilidad: Permite a los usuarios llevar consigo el producto a diferentes lugares, lo que aumenta su utilidad y conveniencia.

Facilidad de uso: Al ser diseñada para ser liviana, esta alternativa reduce la complejidad de uso y requerimientos de esfuerzo para los usuarios.

Mayor alcance de mercado: Al satisfacer las necesidades de portabilidad, el producto puede atraer a un segmento más amplio de clientes.

Desventajas:

Limitaciones de espacio: El tamaño del maletero puede restringir el tamaño y la capacidad de la estructura.

Costo adicional: La implementación de apoyos en rines o carrocería podría elevar el costo del producto.

Seguridad limitada: El diseño bajo estrictas restricciones de peso compromete en gran medida la seguridad que el producto pueda proporcionar a los usuarios.

Complejidad de instalación: Se requiere un análisis exhaustivo para idear una solución que sea fácilmente instalable considerando las preferencias del público objetivo para abarcar la mayor población posible.

4.2. Estructura fija en lugar con despliegue por ruedas, enfoque de seguridad.

Esta opción se centra en garantizar la seguridad del vehículo mediante una estructura fija ubicada en un parqueadero dentro de la casa o un conjunto residencial. Este enfoque brinda al usuario una protección integral para su vehículo para evitar el robo de espejos, rayones y/o golpes de objetos contundentes, mediante una estructura semi robusta con un mecanismo de posicionamiento manual guiado por ruedas o rodachines. La propuesta se fundamenta en dos requisitos principales:

- La estructura debe ser desplegable manualmente, esta deberá estar soportada en ruedas que faciliten su despliegue.
- La estructura debe ofrecer protección integra al usuario, lo que implica una estructura más robusta y resistente.

Ventajas:

Espacio dedicado: La estructura fija ofrece un espacio destinado principalmente a proteger un automóvil, pero también puede utilizarse para resguardar motocicletas, bicicletas o monopatines.

Durabilidad: La estructura es robusta y tiene una vida útil más larga.

Facilidad de despliegue: El mecanismo de despliegue mediante ruedas.

Desventajas:

Limitación de movilidad: Al estar fija en un lugar, la estructura tendrá un alcance de uso limitado.

Requerimientos de espacio y permisos: Se necesita un espacio adecuado dentro de la casa o en el garaje para la instalación de la estructura. Además, podrían surgir dificultades legales al intentar modificar la estructura de un estacionamiento residencial al instalar rieles incrustados en el cemento o pavimento.

4.3. Elección de alternativa de solución

En la **Tabla 6** se presenta la comparación de las dos alternativas mediante la matriz de decisión.

Tabla 6. Matriz de decisión de las alternativas de diseño.

Factor de decisión	Peso relativo	Estructura fija		Estructura transportable	
		Calificación	Calif. Ponderada	Calificación	Calif. Ponderada
Mantenimiento y durabilidad	0,23	2	0,45	1	0,22
Seguridad	0,15	2	0,29	1	0,14
Costo total	0,29	1	0,58	2	0,58

Flexibilidad y adaptabilidad	0,16	1	0,31	2	0,31
Impacto en cronograma	0,18	2	0,35	1	0,17
Total			2		1,45

La calificación dentro de la matriz de decisión va de 0 al 2; siendo el 0 no cumple, el 1 cumple y el 2 como la mejor opción. Como resultado se decidió que el enfoque del diseño apuntaba a una estructura fija en lugar de una transportable.

4.4. Cálculo de dimensiones de la estructura

Lo primero que se debe saber son las dimensiones objetivo que la estructura deberá tener disponible para que el vehículo entre cómodamente, para esto, se usará como vehículo base el Chevrolet Spark GT en su modelo 2019 como se mencionó en el principio de este documento, estas dimensiones se encuentran en la **Tabla 7**. La elección del vehículo se debió a que fue el vehículo líder en ventas en un año especifico, así mismo, se planeó que este proyecto pudiera llegar a la mayor cantidad de población posible. La información técnica del automóvil puede ser consultada en la página principal de Chevrolet, también puede encontrarla en nuestra bibliografía.

Tabla 7. Dimensiones objetivo de la estructura.

Característica	Dimensión [mm]	Dimensión con factor de seguridad de espacio [mm]
Envergadura (S)	1597	1756,7
Alto (R)	1522	1674,2
Largo (w_{total})	3635	3998,5

El factor de seguridad de espacio se decidió del 10%, esto con el fin de que el vehículo entre con holgura dentro de la estructura plegable, y a su vez, minimizar el aumento de costo por sobre estimación del espacio total ocupado.

El alto y la envergadura dependen directamente de la longitud de la placa y el largo depende del ángulo de despliegue (θ). Es importante recalcar que por geometría el ángulo β solo puede ir desde los 90° hasta los 179°.

Con las dimensiones objetivo-definidas, se realizaron los cálculos para encontrar las dimensiones clave como L, S, R y W que fueron previamente definidas al inicio del capítulo. Para el cálculo de L y S tenemos **Ecuación 4**, por otro lado, para el cálculo de R la **Ecuación 5**, y para el cálculo de W se tiene la **Ecuación 6**.

$$\frac{L}{S} = \sin\left(\frac{\pi}{p-1}\right) \tag{4}$$

$$R = \frac{S}{2} \tag{5}$$

$$W = \frac{L}{2}\cot\frac{\beta}{2}\sin\theta \tag{6}$$

$$w_{total} = MW \tag{7}$$

Si se analizan detenidamente las ecuaciones anteriores, se concluye que la dimensión crítica para el cálculo es R. Aunque es posible seleccionar un valor de L que permita a S satisfacer el requerimiento, esto no garantiza que R lo cumpla. En cambio, al seleccionar un valor adecuado de R, es posible determinar valores de S y L que cumplan con los requisitos establecidos. Por otro lado, se escogió un valor de β y θ coherente, es decir, que permitiera por lo menos desde el diseño que la estructura fuera autosoportante y estable.

En la **Figura 17** se observa la relación entre los parámetros β y θ utilizando diferentes valores de P. Se concluye que, a medida que aumenta el número de placas P, es posible utilizar un ángulo β menos agudo. Además, para un ángulo β fijo, un incremento en P genera un aumento en el ángulo θ; mientras que, con un número de P constante, un aumento en el ángulo β resulta en una disminución del ángulo θ.

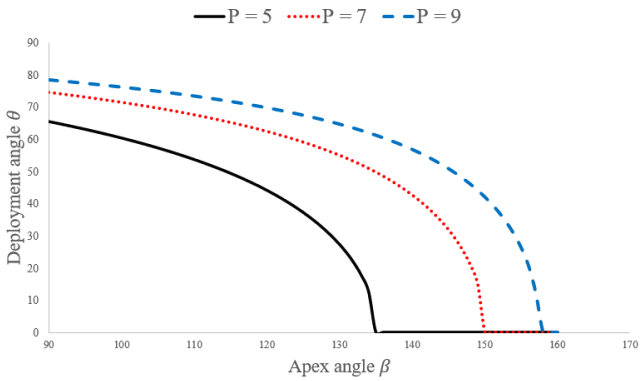


Figura 17. Relación entre parámetros β (ángulo ápice) y θ(ángulo de despliegue) para diferente número de placas.

Para este caso de estudio, se eligió *P*=5 y un ángulo de diseño β de 120° como primera prueba, lo cual resultó en un ángulo θ de 44,15°. Esto implica que el ángulo entre placa y placa será de aproximadamente 88,4°. Con los datos anteriores y usando **Eq. 4, 5, 6 y 7** teniendo en cuenta el R de diseño de la **Tabla 8** se obtuvieron las dimensiones de la estructura plegable que mostramos en la siguiente

Tabla 8. Dimensiones generales de la estructura y número de módulos.

Característica	Dimensión [mm]
Alto (R)	1674,20
Envergadura (S)	3348,40
Longitud placa (L)	2367,60
Largo unitario (w)	476,50
Largo (w_{total})	3998,50
N° módulos	8,39

Con todos los cálculos realizados, se definieron las dimensiones acordes para las placas triangulares que se usaron en el desarrollo de los módulos triangulares, las cuales se puede observar en la **Figura 18**. A partir de estas medidas se hizo una propuesta de bisagra referenciada en modelos comerciales, como se observa en la **Figura 19**. Lo que permitió obtener valores aproximados de cuanto debía soportar cada bisagra para posteriormente elegir una en un catálogo comercial.

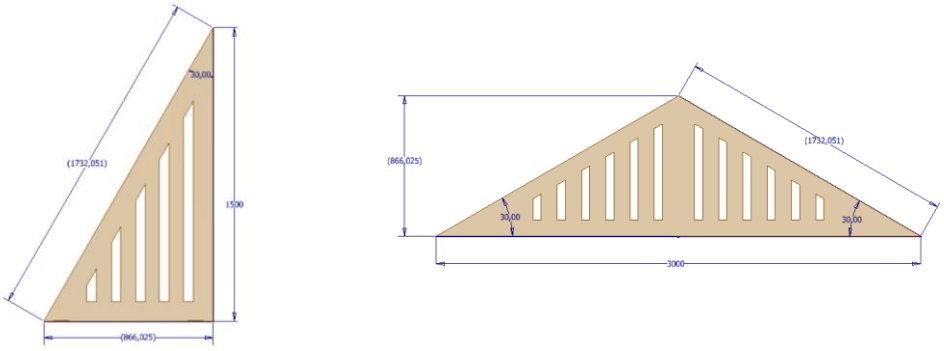


Figura 18. Dimensiones de la placa triangular A y B respectivamente.

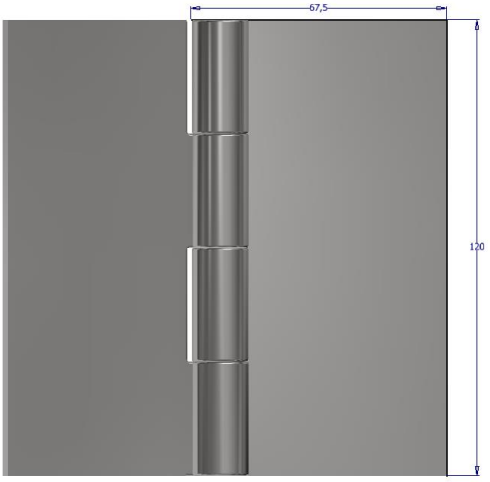


Figura 19. Dimensiones generales de las bisagras.

Las placas triangulares se modelaron usando aluminio AW 6061 con un espesor de ¼ de pulgada y para las bisagras se usó acero inoxidable 316, las propiedades de ambos materiales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Propiedades de materiales elegidos para las placas triangulares y las bisagras.

Característica mecánica	316SS	Aluminio AW6061
Densidad (kg/mm^3)	7.85E-06	2.7 E-06
Módulo de Young (GPa)	200	69,5
Coeficiente de Poisson	0,3	0,33
Límite de elasticidad (MPa)	250	185
Resistencia máxima a la tracción (MPa)	460	220

Con las dimensiones de las componentes listas, se hizo un modelado de la solución estructural. En la **Figura 20** podemos observar una posición de despliegue de la estructura con el automóvil seleccionado dentro, como se espera al momento de usar. En la **Figura 21** podemos ver la disposición de las bisagras.

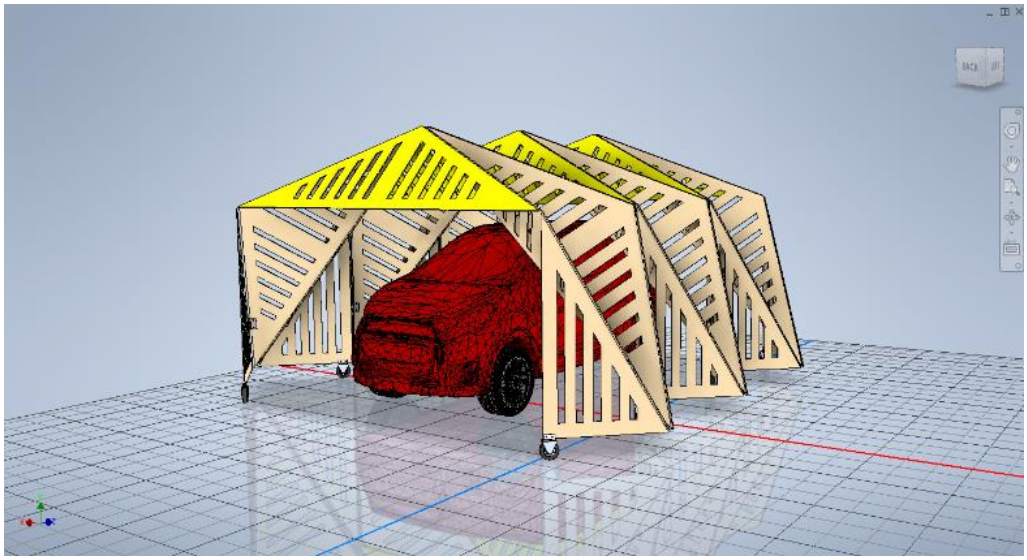


Figura 20. Renderizado de la estructura desplegada cubriendo el automovil.

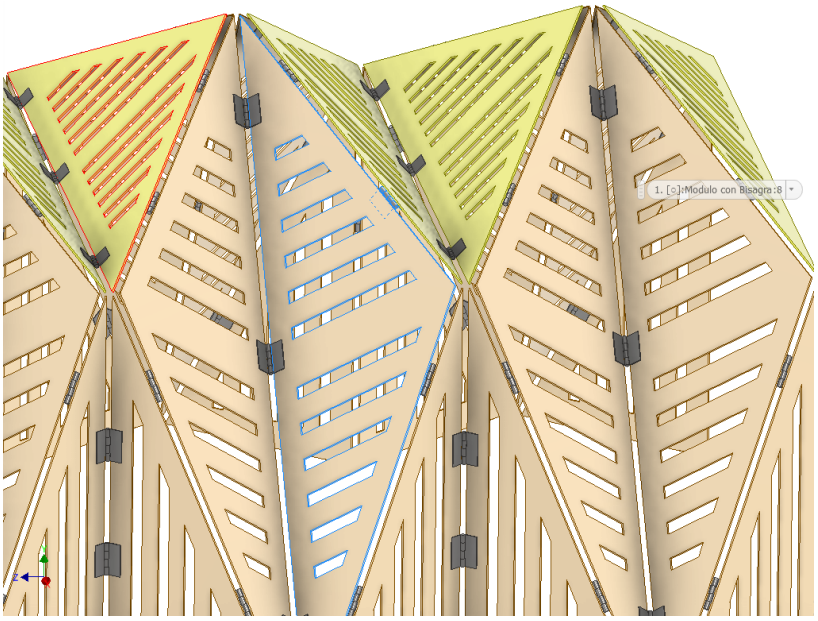


Figura 21. Disposición de las bisagras en la estructura para unir las placas triangulares.

4.5. Cálculo de número de ruedas y facilidad de uso

Se realizaron los cálculos necesarios para determinar si la estructura era fácil de plegar y desplegar para una persona promedio, así mismo se determinó la cantidad necesarios de ruedas para que la estructura fuera fácil de mover.

De acuerdo con el estudio biomecánico y ergonómico de (Quintero Barbosa, 2004), La fuerza promedio de halar sin problemas para una persona es de 147 N y una fuerza máxima de 183 N. La fuerza promedio de empujar sin problemas es de 113 N y una fuerza máxima de 194 N.

Conociendo el peso de la estructura que es igual a 450 Kg, y la capacidad de peso que soporta cada rueda que es de 80 Kg (sección 6,2) se calculó el número mínimo de ruedas que se necesitan para soportar la estructura.

$$W \text{ (peso total)} = 450 \text{ Kg} \times 9{,}81 \text{ m/s}^2 = 4414{,}5 \text{ N}$$

$$C \text{ (capacidad máx. De cada rueda)} = 80 \text{ Kg} \times 9{,}81 \text{ m/s}^2 = 784{,}8 \text{ N}$$

$$\mathbf{n_r}\ (\text{Número mínimo de ruedas}) = \frac{W}{C} = \frac{4414{,}5}{784{,}8} = 5{,}62$$

La cantidad mínima de ruedas que puede tener la estructura es de 6 para poder distribuir bien su carga, pero, debido al tamaño de la estructura se decidió hacer una configuración de 4 rodachines por cada módulo estructural, lo que da un total de 12 ruedas.

Para saber si la estructura era fácil de plegar y desplegar para una persona promedio se calculó la fuerza de fricción de rodamiento. Para el coeficiente de fricción por rodadura se tomó un promedio con materiales usados comúnmente y similares al PTE de las ruedas elegidas en la sección 6,2 lo que arrojó un valor de μ_r = 0,02. La tabla de coeficientes de fricción por rodadura se deja en anexos.

$$F_f = \mu_r \times N = 0{,}02 \times 4414{,}5 = 88{,}29\ N$$

La fuerza requerida para mover la estructura es de 88,29 N, lo que nos permite concluir que una persona promedio sí podría plegar y desplegar sin problema.

CAPÍTULO 5

5. Análisis estructural

En este apartado se presenta el análisis estructural de la solución planteada. Para esto, se adoptó la simulación mediante el método de elementos finitos, usando el software ANSYS, específicamente, fue empleada la herramienta de análisis estructural estático. Este tipo de análisis fue seleccionado bajo las siguientes suposiciones:

- ***Equilibrio cuasi estático****:* Aunque la estructura constituye en sí un sistema dinámico, se prevén movimientos tan lentos que permiten asumir un equilibrio estático en cada instante. A partir de este punto, el sistema será tratado como una estructura.
- ***Uso ocasional de la estructura:*** Se diseñó para que la estructura fuera usada 2 o 3 veces al día, esto ocasiona que el desgaste y los efectos por fatiga por uso sean despreciables.
- ***Cargas de viento no cíclicas:*** Esta suposición acota el análisis, entendiendo que, las presiones en las caras ocasionadas por las cargas de viento no se presentarán de forma cíclica. Lo anterior permite despreciar la fatiga presentada debido a cargas cíclicas provenientes del viento variante.

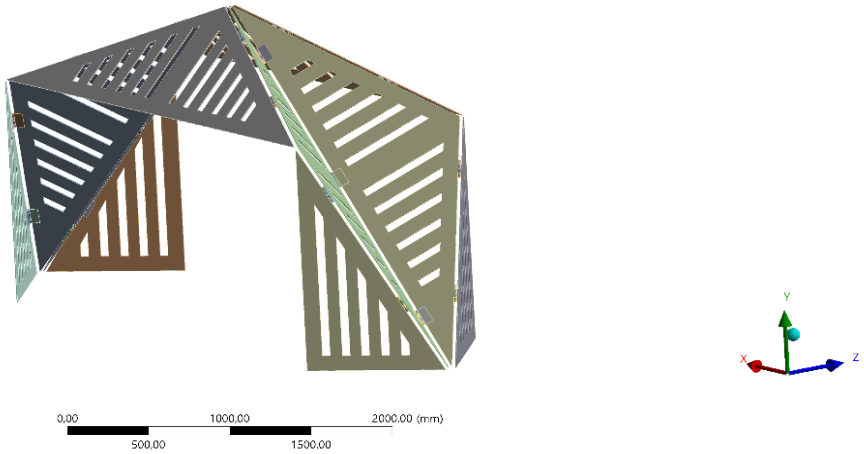


Figura 22. Tercio de la estructura.

Para el análisis inicial se modeló solo un tercio de la estructura sometido a diferentes escenarios (equivalente al módulo central) como se muestra en la **Figura 22**, y para el análisis

final se modelo el mismo tercio de la estructura sometido al escenario más crítico, pero en este caso teniendo en cuenta las cargas consecuencia de los otros dos módulos (simulación de estructura completa).

En este caso se optó por este tipo de acercamiento debido a capacidad computacional y de software educativo. Para el análisis inicial se consideraron fuerzas gravitacionales distribuidas y fuerzas laterales distribuidas, ya que son escenarios de carga comunes que puede experimentar una estructura a la intemperie. Por ejemplo: las fuerzas gravitacionales distribuidas tienen en cuenta el peso propio de la estructura y las fuerzas laterales distribuidas tienen en cuenta cargas externas como las presiones generadas por la fuerza del viento.

Para efectos de este estudio, se define la estructura como el conjunto de placas interconectadas mediante bisagras. En primer lugar, se analizará la configuración general de la estructura y, a continuación, se discutirán los resultados de los esfuerzos aplicados en las bisagras. Cabe destacar que las simulaciones se realizaron considerando tanto las placas como las bisagras. Estas últimas fueron modeladas mediante 44 elementos sólidos unidos a las placas mediante conexiones tipo *bonded*. Entre las bisagras se estableció una conexión de tipo *frictionless* entre los cuerpos que las conforman, y adicionalmente se implementó una conexión *joint del tipo revoluta* entre dichos cuerpos, garantizando una interacción precisa entre las diferentes partes (véase **Figura 23**).

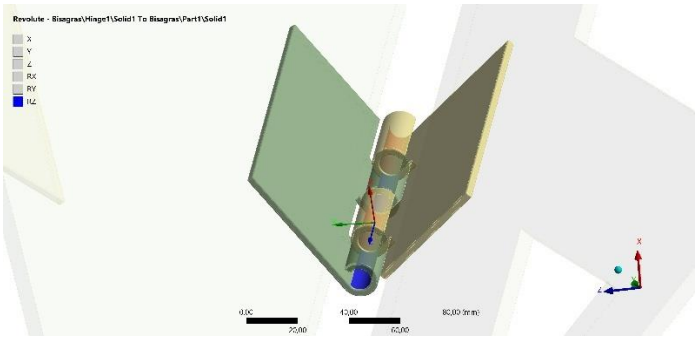


Figura 23. Bisagra unida con conexión joint tipo revoluta alrededor del eje Z.

Para las condiciones de borde de cada escenario debemos tener en cuenta la **Figura 23** en la que se definieron en enumeración del 1 al 10 las placas triangulares, además, se recuerda que las líneas punteadas identifican los valles mientras que las líneas continuas identifican las montañas como se definió previamente en el **CAP 2.**

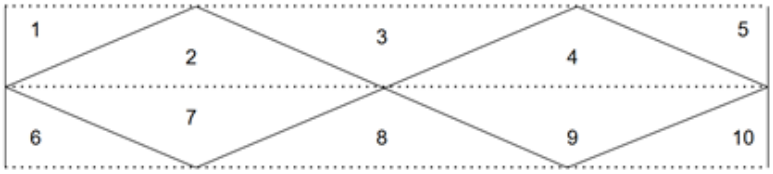


Figura 24. Representación geométrica del tercio de la estructura, (autoría propia).

Con el fin de resumir los escenarios en lo más posible, se presenta de antemano la condición de borde que nos garantiza una correcta representación de los apoyos. En la **Figura 24** se puede ver la representación gráfica de los puntos de desplazamiento remoto que se usaron dentro de la simulación, mientras que en la **Figura 25** podemos ver cómo fue aplicada al modelo.

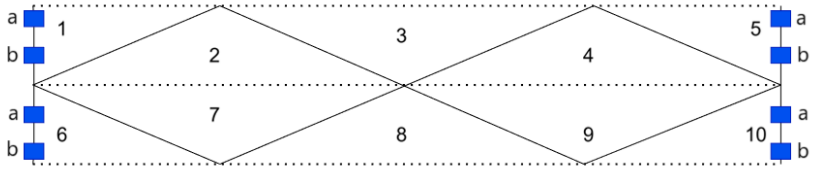


Figura 25. Representación gráfica de los puntos de desplazamiento remoto.

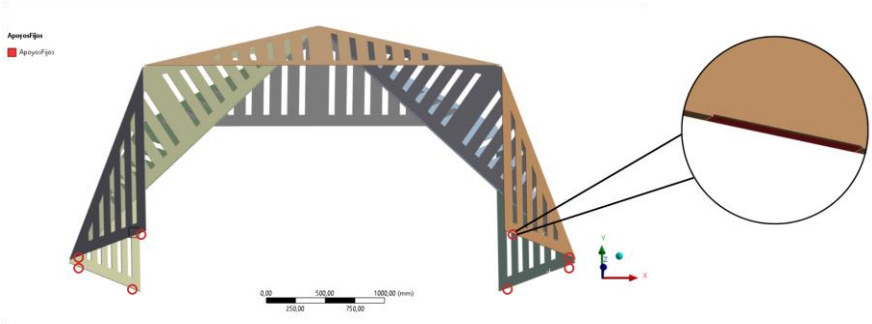


Figura 26. Puntos de desplazamiento remoto en el modelo de elementos finitos.

En concreto la configuración de los apoyos remotos se describe en la **Tabla 10**, donde podemos observar por cara y tipo de restricción.

Tabla 10. Configuración de los apoyos para la simulación por elementos finitos.

Placa	Elemento	Restricción

1	a, b	X=0; Y=0; Z=0; RX=Free; RY= Free; RZ= Free.
5	a, b	X=0; Y=0; Z=0; RX=Free; RY= Free; RZ= Free.
6	a, b	X=0; Y=0; Z=0; RX=Free; RY= Free; RZ= Free.
10	a, b	X=0; Y=0; Z=0; RX=Free; RY= Free; RZ= Free.

Se estudiaron 3 casos con condiciones de carga diferentes, cada uno permitió analizar diferentes escenarios. La geometría usada en todos los casos representa la estructura desplegada, tal como se desea en el momento de uso para cubrir el automóvil.

5.1. Calidad y convergencia de la malla

Debido a restricciones de hardware (12 GB de RAM) y software (licencia estudiantil), se priorizó un enfoque basado en calidad de malla sobre estudios de convergencia. Las placas triangulares se discretizaron mediante una estrategia multizona híbrida, combinando elementos tetraédricos (geometrías complejas) y piramidales (zonas de transición), con tamaño óptimo de 48 mm. Para las bisagras, se implementó un refinamiento localizado (patch conforming) con tetraedros de 6 mm, resolviendo concentraciones de tensión y rotaciones no lineales durante el plegado.

En las **Figuras 27, 28 y 29** se observa la mejora en la calidad de la malla a medida que se reduce el tamaño de los elementos que conforman las placas. En este ejercicio se notó que, para alcanzar una calidad cercana a 1 sería necesario reducir considerablemente el tamaño de los elementos, esto no representó una variación mayor al 7% en los esfuerzos resultantes entre las mallas de las **Figuras 27 y 28**. Evidenciando que, aunque la malla no tuviera una calidad óptima, representaba adecuadamente el fenómeno, lo cual tiene sentido ya que las placas triangulares no están compuestas por geometrías complejas.

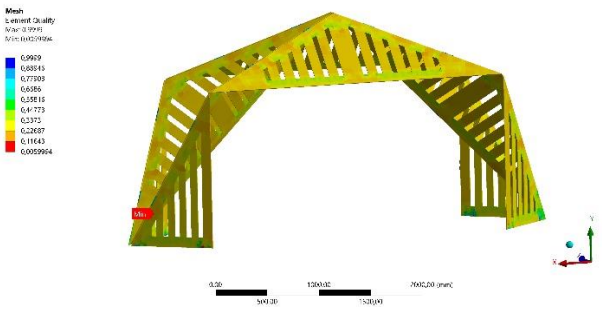


Figura 27. Elementos de 48 mm con 418k nodos y 192k elementos.

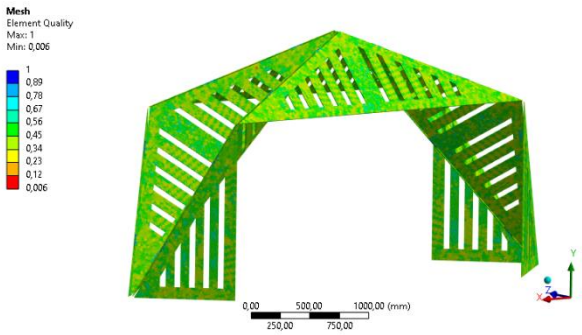


Figura 28. Elementos de 20 mm con 630k nodos y 304k elementos.

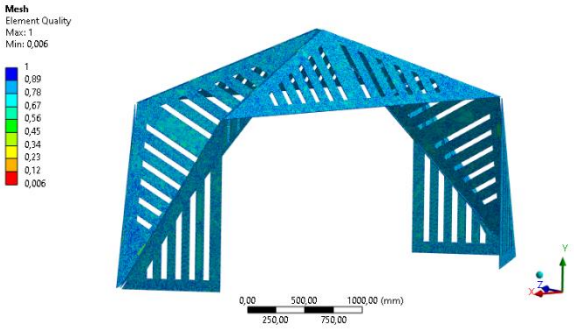
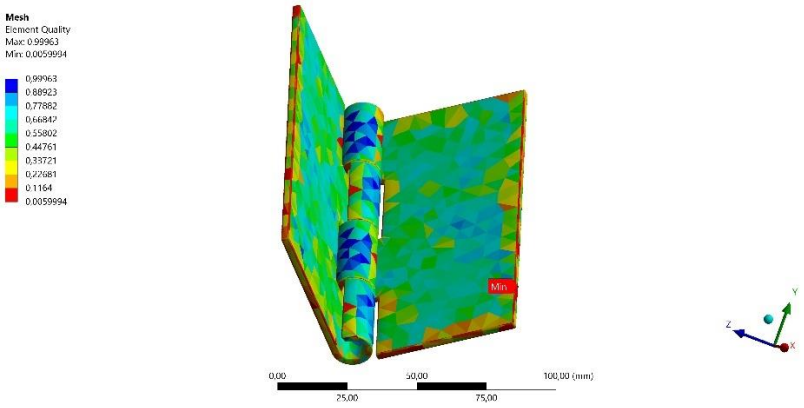


Figura 29. Calidad de la malla con elementos de 5 mm.

Se concluye que el uso de elementos de 48 mm en la malla del modelo de elementos finitos proporcionó una solución eficiente que mantiene una precisión adecuada sin requerir recursos computacionales excesivos. Aunque una malla de mayor calidad podría reducir ligeramente la variación en los esfuerzos calculados, los resultados obtenidos con esta malla son suficientemente representativos para el análisis estructural, dado que las zonas de interés presentan geometrías lo suficientemente grandes como para que la discretización de 48 mm capture con precisión el comportamiento general.

Por otra parte, el punto donde previamente (ver **Figura 27**) se mostró el mínimo de calidad de malla, hace referencia a la calidad de malla en la bisagra, que se puede observar en la **Figura 30**; En este caso se observó que alrededor del 90% de los elementos se encontraban en una calidad de malla por encima de 0,44.



5.2. Escenario 1: Peso propio

Para la primera condición evaluamos si el módulo podía aguantar su peso propio o debíamos agregar refuerzos o espesor a cada placa para aumentar su resistencia, en la siguiente tabla se muestra en detalle el peso de cada placa por modulo (siendo 3 módulos en total).

Tabla 11. Masa [Kg] de los elementos para 1 módulo de la estructura.

Elemento	Masa [kg]
Placa 1	8,98
Placa 5	8,98
Placa 5	8,98
Placa 10	8,98
Placa 2	19,03
Placa 3	19,03
Placa 4	19,03
Placa 7	19,03
Placa 8	19,03

Placa 9	19,03
Total	150,12

Esto quiere decir que cada módulo pesa aproximadamente de 150 Kg, la estructura completa está compuesta por 3 módulos, es decir, 450 Kg.

5.2.1. Condiciones de carga

Para la condición del primer escenario se utilizó únicamente la opción de "Standard earth gravity" de ANSYS, en la **Figura 29** se puede observar la condición de carga o borde en cuestión.

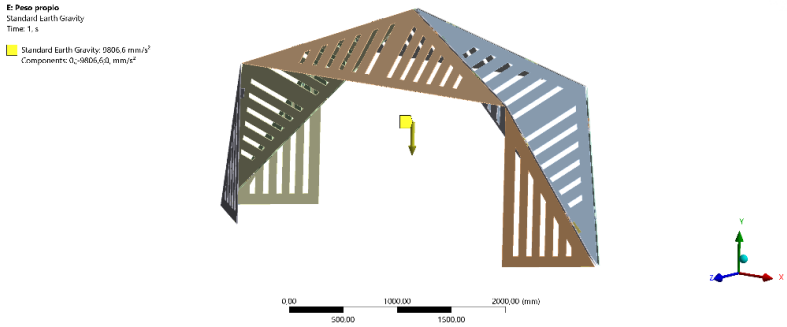


Figura 30.Carga "Standard earth gravity" aplicada sobre la estructura en dirección -y.

La condición de los apoyos es con exactitud la misma descrita anteriormente y será la misma para cada uno de los 3 escenarios.

5.2.2. Análisis de deformaciones

En la **Figura 30** se presenta la deformación total de la estructura vista desde un plano superior, esto puesto que de esta manera se logra ver a mayor detalle el comportamiento analizado. Se resaltaron dos puntos en particular que corresponden a los puntos de máxima deformación, siendo estos 36,53 mm y 36,62 mm.

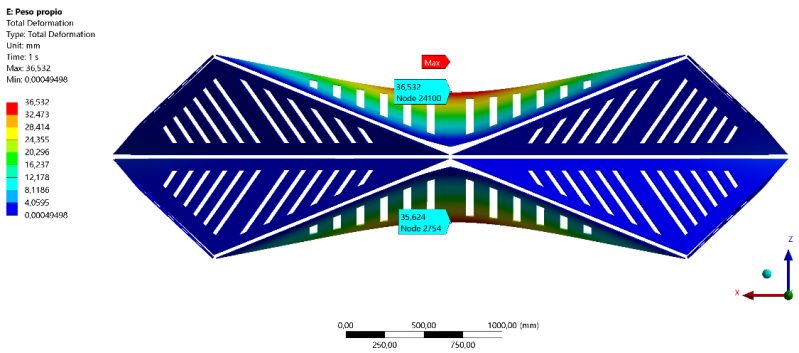


Figura 31. Deformaciones máximas de 35,6 mm y 36,63 mm para las placas 3 y 8 respectivamente, escala x9.

5.2.3. Análisis de vulnerabilidad estática

En la **Figura 31** se presenta de manera grafica la distribución de esfuerzos a lo largo de las placas triangulares, presentando un valor máximo de 31,8 MPa, dando un indicador de seguridad estática de 5.

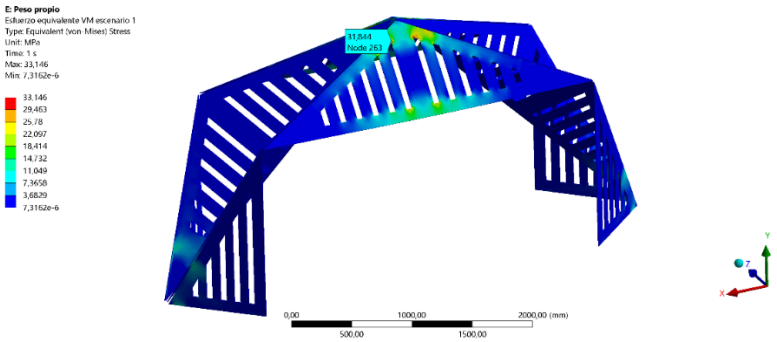


Figura 32.Esfuerzo máximo de Von Mises de 31,8 MPa para el escenario 1

5.3. Escenario 2: Carga de viento

De acuerdo con el reglamento colombiano de construcción sismoresistente NSR-10, en el Titulo B – Capitulo B.6.1.3 - Carga de viento de diseño mínima, Para una edificación cerrada, parcialmente cerrada o **para cualquier estructura**, y sus componentes y revestimientos, la presión de viento de diseño no será menor que una presión neta de 0,40 kN/m^2 actuando en cualquier dirección normal a la superficie.

Siguiendo lo estipulado en esta norma y bajo recomendación de diferentes ingenieros, se decidió trabajar con una presión de 0,50 kN/m^2 actuando perpendicular a las caras de los

cuerpos mostrados en la **Figura 32**, que fueron seleccionados como el caso más desafiante para la estructura en caso de vientos a altas velocidades.

5.3.1. Condiciones de carga.

Para la condición de borde del estado de carga se usaron los datos calculados previamente, se aplicó una presión de 0,50 kN/m^2 según muestra la **Figura 32**.

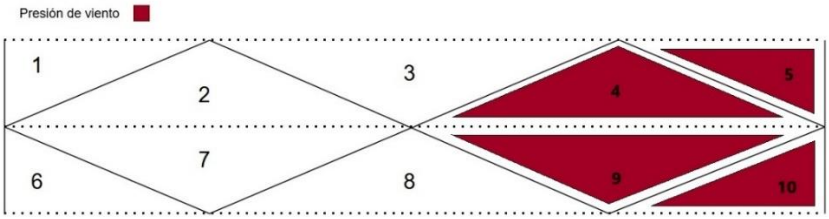


Figura 33.Presión de viento de 0.50 kN/m2 aplicada a las placas 4,5,9 y 10.

5.3.2. Análisis de deformaciones

En la **Figura 33** se puede observar una deformación máxima de 42 mm en la cara 3 debido a la presión del viento.

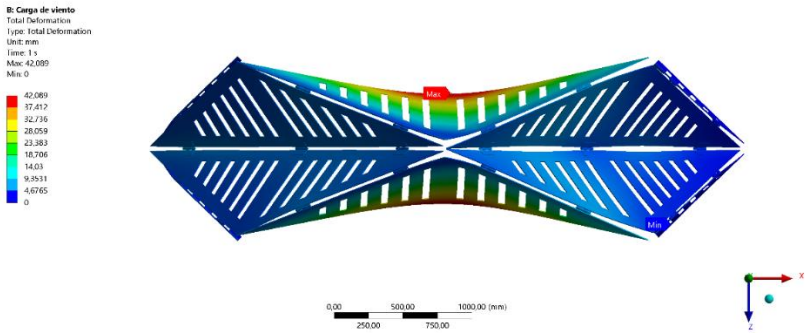


Figura 34.Deformación máxima de 42 mm para escenario 2, escala x8.1.

5.3.3. Análisis de vulnerabilidad estática

En la **Figura 34** podemos notar que el esfuerzo de Von Mises máximo que presenta la estructura es de 43 Mpa frente al escenario 2 de carga de viento, dando un indicador de seguridad estática de 2,8. Este esfuerzo fue un poco mayor que el previamente calculado en el escenario 1 de peso propio, los datos son coherentes.

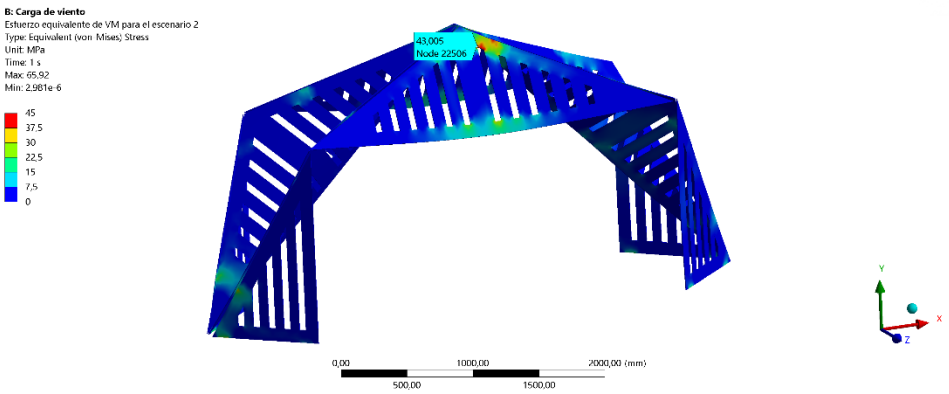


Figura 35.Esfuerzo máximo de 45 MPa en la placa 3 frente al escenario 2.

5.4. Escenario 3: Estado combinado de cargas

En este escenario se suman las cargas del escenario 1, las cargas del escenario 2 y una carga adicional que es generada por una persona al apoyarse a la estructura.

Para este caso, se asume que la persona tiene una masa de 100 kg. En la **Figura 35** se presenta la descomposición de fuerzas, de la cual se obtendrá la fuerza resultante que se aplicará al elemento 5.

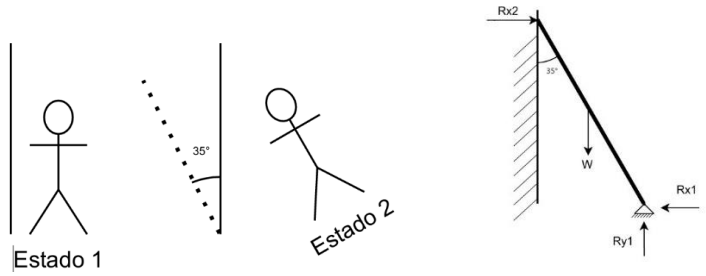


Figura 36. D.C.L. de una persona apoyada sobre una superficie plana.

Para el cálculo de la fuerza resultante se utilizó el diagrama de cuerpo libre mostrado en la **Figura 35** que nos generó la **Ecuación 8**.

$$R_{x_2} = \frac{w}{2 \cdot \tan(55)} \qquad \textbf{(8)}$$

Se obtuvo que, $R_{x_2} = 343{,}4\,N$, valor que representa la reacción en la superficie como respuesta al peso propio de la estructura. De este modo, usando un factor de seguridad de 2 aproximamos la fuerza resultante considerada para el diseño asciende a $343\ \mathrm{N} * 2 =$

686 ≅ 700 N, lo cual permite anticipar condiciones de impacto o cargas imprevistas de mayor magnitud.

5.4.1. Condiciones de carga

A continuación, se detallan las condiciones de borde aplicadas en el modelo de origami, representado previamente en la **Figura 36**. La condición A corresponde a los puntos de desplazamiento remoto especificados anteriormente; la condición B representa las caras sometidas a presión de viento; y la condición C modela la carga aplicada por una persona que, al perder el equilibrio, se apoya sobre una de las placas.

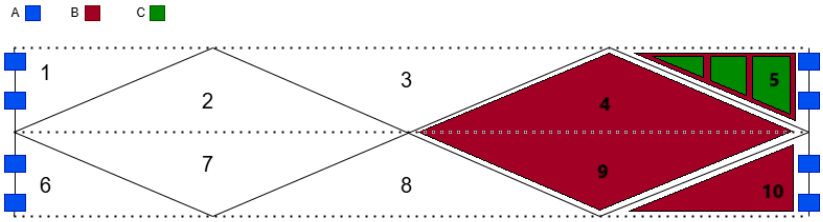


Figura 37. Condiciones de borde.

De acuerdo con la disposición de estas condiciones de borde, la condición A se aplica a las placas 1, 5, 6 y 10; la condición B, a las placas 4, 5, 9 y 10; y la condición C únicamente a la placa 5.

5.4.2. Análisis de deformaciones

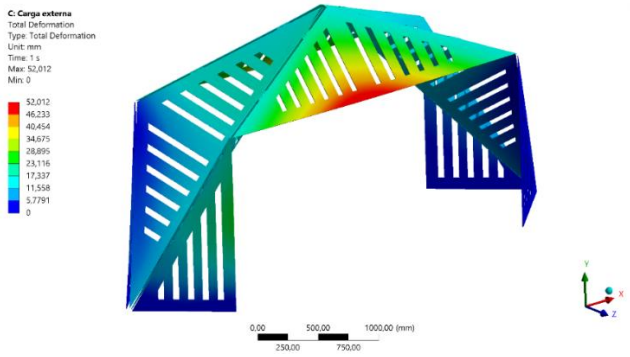


Figura 38. Deformación máxima de 52 mm para el escenario 3.

En la **Figura 37** se pueden apreciar las deformaciones máximas del modelo, que, según los resultados, aparecen en su punto máximo en la placa 3 llegando a un máximo de 52 mm.

5.4.3. Análisis de vulnerabilidad estática

En la **Figura 38** se muestran los resultados del esfuerzo de Von Mises calculados durante la simulación en el escenario 3.

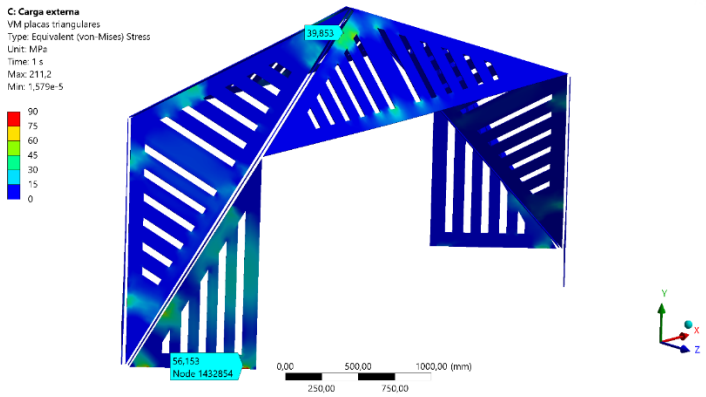


Figura 39. Esfuerzo máximo equivalente de Von-Mises de 56 MPa para el escenario 3

En la estructura se observaron esfuerzos de hasta 90 MPa en condiciones normales sobre toda la estructura, aunque se identificaron algunos picos de hasta 211 MPa, como se muestra en la **Figura 38**. Estos valores máximos se atribuyen a singularidades numéricas, producto de la aplicación de cargas en áreas extremadamente pequeñas, cercanas a cero, lo cual genera concentraciones de esfuerzo irreales. Para evitar distorsiones en la interpretación de los resultados, el modelo se ajustó para mostrar solo los esfuerzos en el rango de 0 a 90 MPa. Este límite fue seleccionado para mantener un factor de seguridad de 2, considerando que el esfuerzo de fluencia del material de las placas es de 185 MPa.

En la **Figura 38** mostrada anteriormente se identificaron dos puntos de prueba, en los cuales se observaron esfuerzos de 39,85 MPa y 56,15 MPa, respectivamente. Estos puntos fueron seleccionados para ilustrar que la estructura, en condiciones máximas, estaría soportando estos niveles de esfuerzo, dando un indicador de seguridad estática de 2,5.

5.5. Escenario 4: Estado combinado de cargas entre módulos.

Dada la imposibilidad computacional de simular integralmente los tres módulos finales del sistema plegable, se implementó un enfoque simplificado mediante la teoría de áreas tributarias. Esta metodología permite distribuir eficientemente las cargas estructurales entre componentes adyacentes, asignando proporciones de carga a elementos soporte mediante relaciones geométricas. Se asumió homogeneidad en las condiciones de carga para todos los módulos, replicando el Escenario 3 (estado combinado: peso propio, carga eólica y fuerza dinámica lateral equivalente a 700 N, correspondiente a una persona en desequilibrio).

5.5.1. Verificación del equilibrio estático

Para validar la estabilidad del sistema, se analizó un módulo aislado únicamente bajo carga gravitacional, restringido en 8 nodos con coacciones completas (UX=UY=UZ=0) mostrados en la **Figura 40**. Los resultados obtenidos se encuentran en la **Tabla 12**, gracias a la cual se verificó el equilibrio estático mediante dos criterios:

Anulación recíproca de reacciones horizontales: Las componentes X y Z en los apoyos mostraron valores opuestos (±δ), cancelándose mutuamente ($\Sigma Fx = \Sigma Fz \approx 0$).

Conservación de carga vertical: La sumatoria de reacciones en Y ($\Sigma Fy = 1{,}571$ N) coincidió con el peso teórico total del subsistema (160 kg: 150 kg de estructura principal + 10 kg de 44 bisagras de 0.2 kg c/u), considerando $g=9.81$ m/s² ($160 \text{ kg} \times 9.81 = 1{,}569.6 \text{ N} \approx 1{,}571$ N).

Esta correspondencia numérica (±0.09% de error) confirma que el módulo analizado satisface las condiciones de equilibrio de fuerzas ($\Sigma F=0$), validando tanto la metodología simplificada como la estabilidad estructural bajo las cargas de diseño. El enfoque demuestra que las interacciones módulo-adyacente pueden modelarse eficazmente mediante distribución tributaria cuando las limitaciones computacionales impiden análisis integrales.

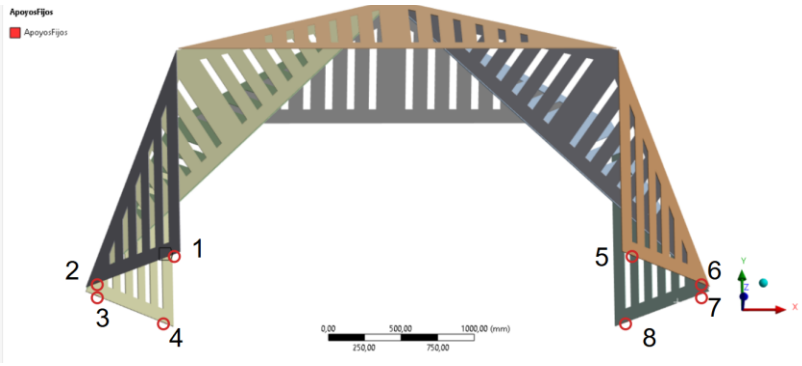


Figura 40. Enumeración de puntos de apoyo para equilibrio estático.

Tabla 12. Reacciones obtenidas en los 8 soportes analizando condición de carga por peso propio.

Reacción soportes			
Soporte	Rx [N]	Ry [N]	Rz [N]
1	25,247	81,395	25,251
2	131,51	320,4	70,471
3	123,2	307,15	-68,761
4	27,304	76,853	-27,1
5	-27,68	83,007	27,228
6	-125,1	309,65	68,883
7	-129,94	318,08	-71,099
8	-24,536	74,993	-24,872
Total	0,005	1571,528	0,001

5.5.2. Determinación de cargas en bisagras

El modelo numérico se implementó restringiendo los grados de libertad (UX=UY=UZ=0) en las 7 bisagras laterales adyacentes a los módulos 1 y 3, bajo las

condiciones de carga del Escenario 3 previamente definido. La solución del sistema reveló las reacciones en las 14 interfaces modulares (7 por lateral), donde las componentes en Z se descartaron debido a su cancelación mutua por simetría geométrica y homogeneidad material.

La orientación espacial (izquierda/derecha) se estableció según la dirección predominante del viento definida en el frente de referencia principal, tal como se ilustra en las **Figuras 41.a** (vista izquierda) y **41.b (vista derecha)**, que detallan la ubicación de los puntos de apoyo y su contribución a la transmisión interfaz-modular de fuerzas.

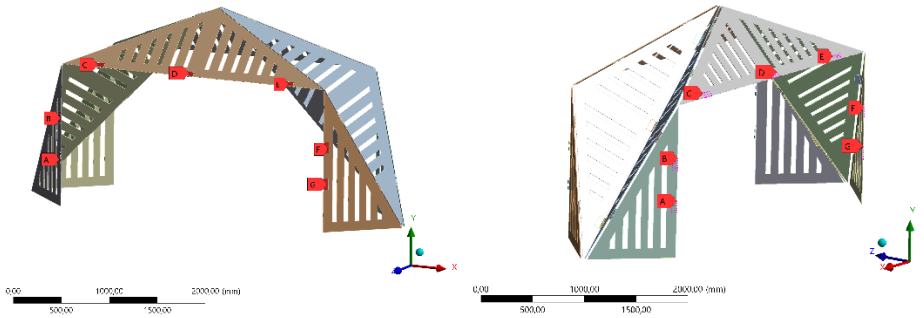


Figura 41. Puntos de apoyo en bisagras de la vista izquierda y vista derecha respectivamente

Los resultados cuantitativos de esta interacción se resumen en la **Tabla 13**, donde se especifican las reacciones equivalentes en bisagras producto del acoplamiento estructural con módulos adyacentes.

Tabla 13. Reacciones y fuerzas equivalentes en las bisagras producto de la interacción con los módulos derecho e izquierdo

Conexión al módulo izquierdo				
Bisagra	Rx [N]	Ry [N]	Fx [N]	Fy [N]
G	12,525	47,945	-12,53	-47,95
F	34,339	60,985	-34,34	-60,99
E	219,15	-85,513	-219,15	85,51
D	85,242	95,187	-85,24	-95,19
C	36,029	78,651	-36,03	-78,65

B	19,319	25,321	-19,32	-25,32
A	2,2776	22,964	-2,28	-22,96
Conexión a módulo derecho				
Bisagra	Rx [N]	Ry [N]	Fx [N]	Fy [N]
A	86,481	155,84	-86,48	-155,84
B	134,67	607,16	-134,67	-607,16
C	353,52	-133,98	-353,52	133,98
D	94,972	81,44	-94,97	-81,44
E	8,5337	86,228	-8,53	-86,23
F	19,293	41,946	-19,29	-41,95
G	5,8608	11,664	-5,86	-11,66

5.5.3. Condiciones de carga

El acoplamiento modular se modeló mediante un esquema de acción-reacción, las fuerzas resultantes en las bisagras del módulo izquierdo se aplicaron como cargas externas en las correspondientes del lado derecho, y viceversa (**Figura 42**).

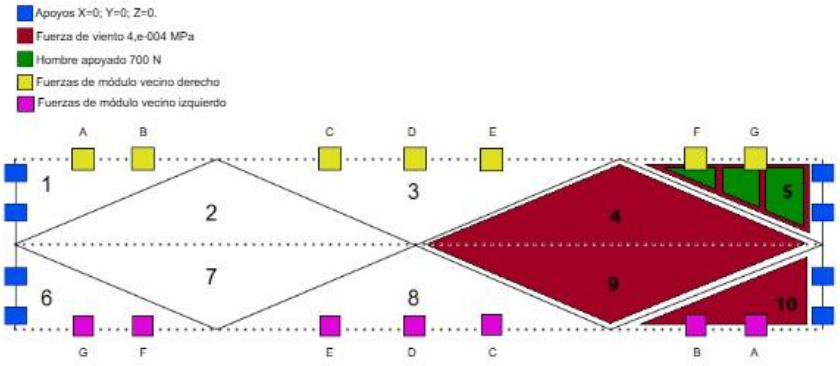


Figura 42. Condiciones de borde para Escenario 4

5.5.4. Análisis de deformaciones

En la **Figura 43** se puede observar una deformación máxima de 94 mm en la cara 3 debido a la acción combinada de presión de viento, peso propio, persona apoyándose y fuerzas intermodulares.

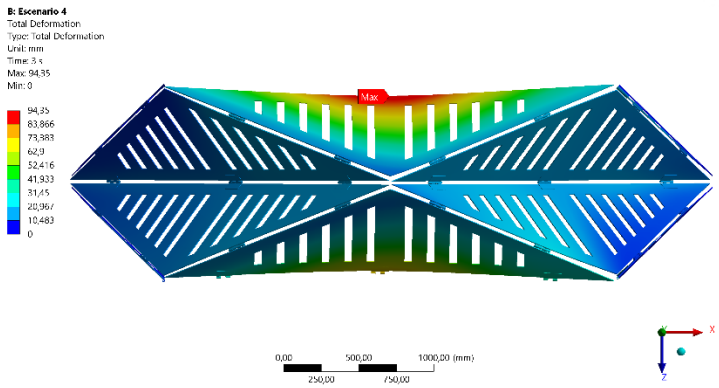


Figura 43.Deformación máxima de 94 mm en la cara 3 debido a Escenario 3 y fuerzas intermodulares.

5.5.1. Análisis de vulnerabilidad estática

El análisis estático reveló tensiones máximas de 108 MPa en condiciones operativas normales, concentradas en el nodo 1097 (**Figura 44**). Se identificaron picos localizados de hasta 594 MPa, clasificados como singularidades numéricas asociadas a concentración de tensiones en zonas de transición geométrica aguda (esquinas bisagra, esquinas vástago).

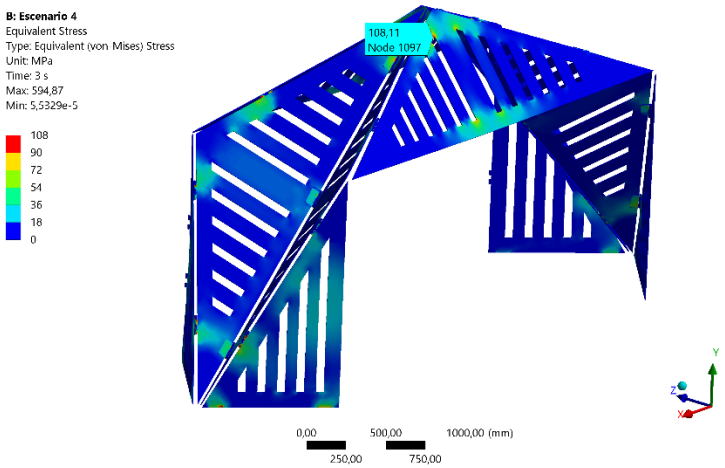


Figura 44. Esfuerzo máximo equivalente de Von-Mises de 108 MPa.

Para conocer si eran singularidades numéricas se realizó un análisis más detallado del elemento en cuestión en la sección 5.6, lo que arrojó un esfuerzo máximo de 180,09 MPa. Posteriormente se definió el límite máximo de 180 MPa puesto que representa el pico

máximo encontrado en el modelo. El factor de seguridad calculado (FS=1.7) se determinó mediante la relación:

$$Fs = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} = \frac{185\ MPa}{108{,}11\ MPa} = 1.71$$

5.6. Esfuerzos en bisagras

Como caso representativo de las condiciones más adversas del Escenario 4, se seleccionó para análisis detallado la bisagra que exhibió el pico de tensión máximo registrado (180,09 MPa).

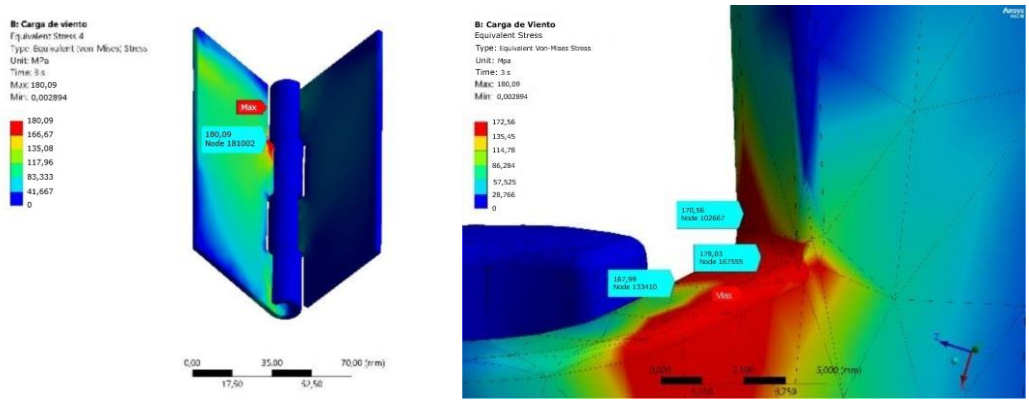


Figura 45. Distribución de esfuerzos en Bisagra analizada (a) y bisagra en detalle (b)

Con un refinamiento de malla se puedo observar que sí eran singularidades numéricas y que los esfuerzos tuvieron una distribución de 0-180 MPa, donde el máximo (limite elástico del material) se encuentra marcado en rojo en la Figura **45.b.**

Esto hace parte de análisis informativo, puesto que nuestro enfoque radicó en el diseño de la estructura. Se recomienda realizar un análisis más detallado para definir cuál es el esfuerzo máximo final del elemento que presenta dicha singularidad.

CAPÍTULO 6

Etapa de selección de componentes y estimación de costos

En este capítulo usaremos los resultados del documento para calcular de manera realista los costos, materiales y elementos. Debemos recordar los elementos que componen la estructura y la cantidad de estos (ver **Tabla 14**).

Tabla 14. Elementos y cantidad de la estructura.

Elemento	Cantidad
Placas triangulares	21
Bisagras	88
Ruedas	12

Debemos hacer hincapié en que los sobrecostos en el proyecto pudieron haberse generado porque las cotizaciones iniciales se realizaron con base en un prototipo y no en una producción a gran escala. En la fabricación de prototipos, los costos unitarios suelen ser significativamente más altos debido a la baja cantidad de unidades producidas, el uso de materiales sin optimización de costos y la ausencia de economías de escala. Al pasar a una producción en serie, los costos unitarios disminuyen porque se pueden negociar mejores precios con diferentes proveedores, optimizar procesos de manufactura y reducir el desperdicio de material. Además, los costos fijos, como el diseño y la puesta en marcha de la producción, se distribuyen entre un mayor número de unidades, lo que reduce el impacto financiero por unidad y hace que el proyecto sea más rentable.

6. Elección de componentes

6.1. Bisagras

En la simulación se configuraron conectores tipo joint que únicamente permitían el movimiento en el eje transversal, esto con el objetivo de simular las condiciones de uso lo más real posible. Este paso adicional permitió encontrar las fuerzas [N] a las que estaban sometidas las bisagras. Por lo tanto, se encontró que para el escenario 3 la fuerza máxima que iba a soportar una bisagra era de 950 N, es decir alrededor de 96 Kg en la resultante de las fuerzas.

Se seleccionó el tipo de bisagra MKCL250 del catálogo de McKinney ASSA ABLOY, cuyo material es acero inoxidable 304 (que es una buena alternativa al 316 ya que se puede encontrar en el mercado de manera más común) y soporta hasta 136Kg, proporcionando un FS de 1,4. Las dimensiones se pueden observar en la **Figura 46.**

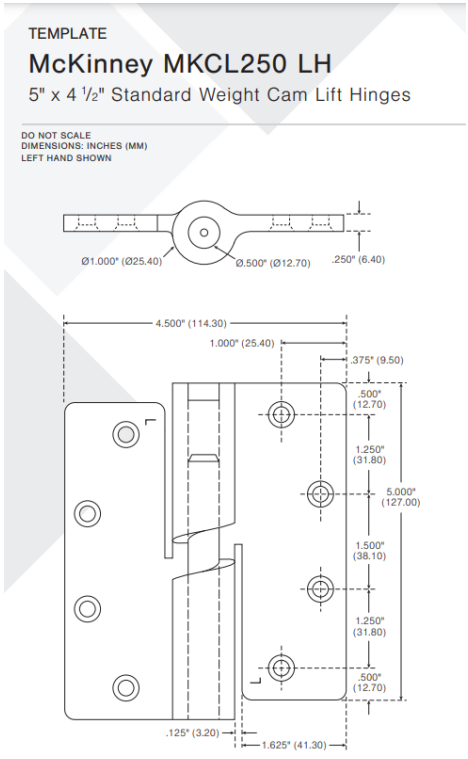


Figura 46. Bisagra MKCL250, dimensiones.

6.2. Ruedas

Conociendo que un módulo de la estructura pesa aproximadamente 150Kg y que va soportado en 4 ruedas, se seleccionó una de la marca FIXSER que es comercial en Colombia, y soporta un peso máximo de 80Kg dando un indicador de seguridad de 2,1, también cuenta con freno para poder dejar la estructura en alguna posición en particular si se desea. El material de la rueda es TPE que es resistente al desgaste y al impacto, las dimensiones generales de la rueda o rodachín son 6 cm x 7,5 cm x 12 cm.



Figura 47. Rueda FIXSER con freno.

6.3. Placas de aluminio

Se seleccionó una placa de aluminio de 1000 mm x 3000 mm x 6.35 mm de A6061 para la manufactura de las placas de los módulos, ya que posee características favorables como su resistencia y durabilidad, resistencia a la corrosión atmosférica, incluso en ambientes húmedos o salinos, lo que prolonga la vida útil del refugio, es fácil de mecanizar, es ligero y económico en comparación a otros materiales metálicos de características similares.



Figura 48. Placas de aluminio.

6.4. Estimación de costos

A pesar de que la estructura se compone de pocos elementos diferentes, algunas especificaciones como dimensiones, material y/o capacidad de carga generaron complicaciones en la cotización de estos. Se trató de seguir la consigna de trabajar con tecnología regional, pero en el ítem de las bisagras en particular se deberá cumplir con la excepción a esta consigna, ya que no se pudo encontrar un catálogo de alguna empresa o distribuidor nacional con la especificación más importante en este caso que era la de capacidad de carga, por ende, se decidió buscar diferentes alternativas, al final se seleccionó la bisagra MKCL250 que se mostró en la sección anterior.

Teniendo lo anterior en cuenta, en la **Tabla 15** se presenta una estimación de costos basados en los elementos seleccionados y las cotizaciones presentadas, donde hay que recalcar que las diferentes cotizaciones son de carácter académico y son un aproximado del precio final en algunos casos.

Tabla 15. Costo y cantidad de elementos de la estructura.

Elemento	Precio unitario (COP)	Cantidad	Precio acumulado (COP)
Placa de aluminio 6061 (3000mm x 1000mm x 6,35mm) / nov 2024	$1.015.843	21	$21.332.713
Rodachín FIXSER 80Kg / nov 2024	$32.900	12	$394.800
Bisagra MKCL250 / nov 2024	$651.386	88	$57.321.968
		TOTAL	$79.049.481

Por efectos de consulta académica y no empresarial, fue difícil cotizar el servicio de corte láser y ensamblaje en alguna empresa especializada, sin embargo, preguntando de manera particular a varios trabajadores de empresas relacionadas a los servicios, se obtuvo la siguiente información de costos, que puede brindar un aproximado del precio real.

En general, el costo del corte láser en Colombia en noviembre de 2024 puede oscilar entre $30.000 COP y $80.000 COP por metro cuadrado de material cortado, dependiendo de factores como complejidad del diseño, cantidad de piezas, ubicación del proveedor y material adicional o tratamiento. Esto implica que:

- Área total de la placa: 3000mm x 1000mm = 3m x 1m = 3m²
- Costo estimado del corte:
- Bajo costo: 3m² x $30.000 COP = $90.000 COP
- Alto costo: 3m² x $80.000 COP = $240.000 COP

Dando un promedio de $165.000 COP por placa, para un total de $3.465.000 COP.

El costo de la mano de obra para ensamblar un sistema de este tipo puede variar según el nivel de especialización requerido y el tiempo estimado de trabajo.

En promedio, el costo de la mano de obra para ensamblajes metálicos o de estructuras similares en noviembre de 2025 puede oscilar entre $30.000 COP y $70.000 COP por hora. Un proyecto de estas dimensiones podría llevar entre 6 y 24 horas de trabajo, dependiendo de la complejidad.

Por lo tanto, el costo de operaciones mostrado en la **Tabla 16** para el ensamblaje de un sistema de placas y bisagras podría estar en $600.000 COP, dependiendo de los factores mencionados.

Tabla 16. Costos de operaciones.

Operación	Costo (COP)
Corte de placas	$3.465.000
Ensamblaje	$600.000
Total	$4.065.000

Para los costos administrativos se tuvo en cuanta el costo de arrendamiento de una bodega, que en noviembre de 2024 puede estar en un promedio de $1.200.000 COP mensuales con unas dimensiones suficientes para almacenar las estructuras plegadas, los costos de transporte de las estructuras a las cuales se debe agregarle un alquiler de montacarga que sumados pueden llegar a $500.000 COP dentro de la misma ciudad. Podemos verlo en la **Tabla 17.**

Tabla 17. Costos administrativos.

Descripción	Costo (COP)
Alquiler bodega	$1.200.000
Transporte	$500.000
Total	$1.700.000

En la **Tabla 18** mostramos el costo final estimado de la estructura, teniendo en cuenta los costos anteriormente mencionados y un apartado de costos indirectos, como imprevistos, seguros, mantenimiento de equipos, permisos y documentación, el cual será de un 10%.

Tabla 18. Costo final de la estructura propuesta.

Descripción	Costo (COP)

Materiales	$79.049.481
Operaciones	$4.065.000
Administrativos	$1.700.000
Indirectos	$8.311.448
Total	$91.425.929

CAPÍTULO 7

7. Conclusiones

Los resultados del abordaje metodológico adoptado permitieron cumplir el objetivo del proyecto, *diseño de una estructura basada en origami que aporte a la seguridad de vehículos, integrando la arquitectura moderna y la ingeniería como elementos fundamentales en su concepción*.

El análisis de literatura especializada complementada con experiencias personales y consulta con expertos permitió la definición de requerimientos que orientaron el desarrollo de este proyecto. Para esto, la adopción del diseño de la estructura plegable, aunque permitió mejorar su capacidad estructural también presentó un incremento del peso propio. A través del enfoque basado en modelos, fue posible reducir las iteraciones de diseño al prever problemas estructurales en fases tempranas, aumentando así la eficiencia del proceso. En conclusión, gracias a los métodos de Norton y a un enfoque basado en modelos se alcanzó el cumplimiento a todos requerimientos funcionales, dimensionales y de diseño planteados en la **Tabla 5.** Complementariamente, el análisis por elementos finitos arrojó que la estructura plegable alcanzaba una distribución uniforme de tensiones en toda la geometría, la estructura propuesta cumple con el coeficiente de seguridad establecido de 1.7. Las simulaciones indicaron que las zonas críticas se concentraban en las zonas cercanas a las bisagras o rodachines, donde las tensiones alcanzaron un 50% de la resistencia máxima del material. Estos resultados validan la estabilidad estructural en condiciones de carga estática y sugieren que el diseño podría soportar incrementos moderados en la carga sin comprometer la integridad estructural. Por otra parte, la aplicación del concepto de equilibrio cuasi estático fue una aproximación eficaz para analizar la estructura plegable en condiciones de carga controlada y lenta. Este enfoque permitió modelar la estructura bajo el supuesto de equilibrio estático en cada fase de su despliegue, lo cual simplificó el análisis al evitar complejas ecuaciones dinámicas.

El análisis de costos reveló que el uso de aluminio puede conllevar a costos excesivos en el costo de producción. Sin embargo, se identificó que el componente con mayor impacto

en la estructura de costos fue el de las bisagras. Diseñar tus propias bisagras podría reducir costos porque eliminarías intermediarios y márgenes de beneficio externos. Además, podrías optimizar el diseño para reducir el uso de material y simplificar procesos, además de usar materiales más económicos o locales. Al evitar importaciones, también reducirías significativamente los sobrecostos asociados. En resumen, la fabricación propia te da control total sobre los costos y materiales, permitiéndote adaptar la bisagra a tus necesidades específicas.

En general, aunque el diseño planteado presentó costos altos para la población objetivo ubicada en la clase media colombiana, la bibliografía presentada aporta a la maduración de la tecnología que genera la posibilidad en un futuro a una reducción de costos para incrementar la competitividad en el mercado.

7.1. Trabajos futuros

En futuras investigaciones se recomienda el análisis dinámico completo para evaluar el comportamiento en condiciones de carga rápida o fluctuante, lo cual sería necesario si el diseño se adaptara a aplicaciones de despliegue rápido. Además, se recomienda evaluar el comportamiento de la estructura a fatiga.

Adicionalmente, aunque el análisis de sostenibilidad del diseño mostró que el uso de materiales reciclables como el aluminio ofrece una opción viable en términos de durabilidad y resistencia, se sugiere explorar la viabilidad de utilizar materiales compuestos más livianos para reducir aún más el peso estructural sin comprometer la resistencia. Esta modificación podría no solo mejorar la eficiencia en el transporte y ensamblaje, sino también contribuir a una menor huella de carbono en su ciclo de vida.

Finalmente, se recomienda explorar el potencial del diseño de estructura plegable en otras aplicaciones potenciales en diversas industrias, incluyendo la arquitectura modular y la robótica. Para esto, se recomienda caracterizar la capacidad de plegado y despliegue controlado en estructuras temporales en eventos o refugios de emergencia. Además, el

concepto de modularidad y la simplicidad de ensamblaje permitirían una adaptación a estructuras robóticas, donde el plegado eficiente es crucial. Las investigaciones futuras podrían explorar la automatización del despliegue para optimizar su utilidad en entornos de difícil acceso.

Anexos

回复：Quotation Feedback-Luchi Steel Pipe Manufacturing Co., Limited

Thank you for your inquiry. I am MS.YOYO from Luchi Steel Pipe Manufacturingco.,Limited. Nice to meet you.

We produce aluminum plates and have five years of export experience. We look forward to establishing a good cooperative relationship with you in the future.

Please check the quotation below. This is the price reference of aluminum plate A6061.

PRODUCT NAME	SIZE(MM)	UNIT PRICE(USD)/PC
Aluminum Plate A6061	1000*3000*6.35	$108.00

Could you please share with me the quantity you need? I will prepare a quotation for you with more details.

Looking forward to your reply.

Best regards,

MS.YOYO
(Sales Manager)
LUCHI
LUCHI STEEL PIPE
Luchi Steel Pipe Manufacturingco.,Limited
Email: 009@luchizhizao.com
Cel/Whatsapp/Wechat:+86 173 5383 7083

发件人：易营宝信息科技（北京）有限公司 <service@notice.eyingbao.com>
发送时间：2024年11月13日(星期三) 11:54
收件人：009<009@luchizhizao.com>
主　题：Luchi Steel Pipe Manufacturing Co., Limited - 您有一个新的表单反馈!

Activar Windows
Ve a Configuración para activar Windows.

Anexo 1. Cotización placa de aluminio empresa China.

Carlos Rivera Ext. 404 <crivera@aragonaluminio.com>
para mí

Buen día Alvaro,

Esa lamina en esas medidas no la manejamos sin embargo te doy el precio x kilo aprox de lo que tenemos

17.500 x kilo +iva

Esa lamina pesa aprox 45.78 kilos

Ósea que para tu ejercicio la lamina podría estar alrededor de 853.650 + iva

Estos costos son estimados, no son para cotizacion o venta.

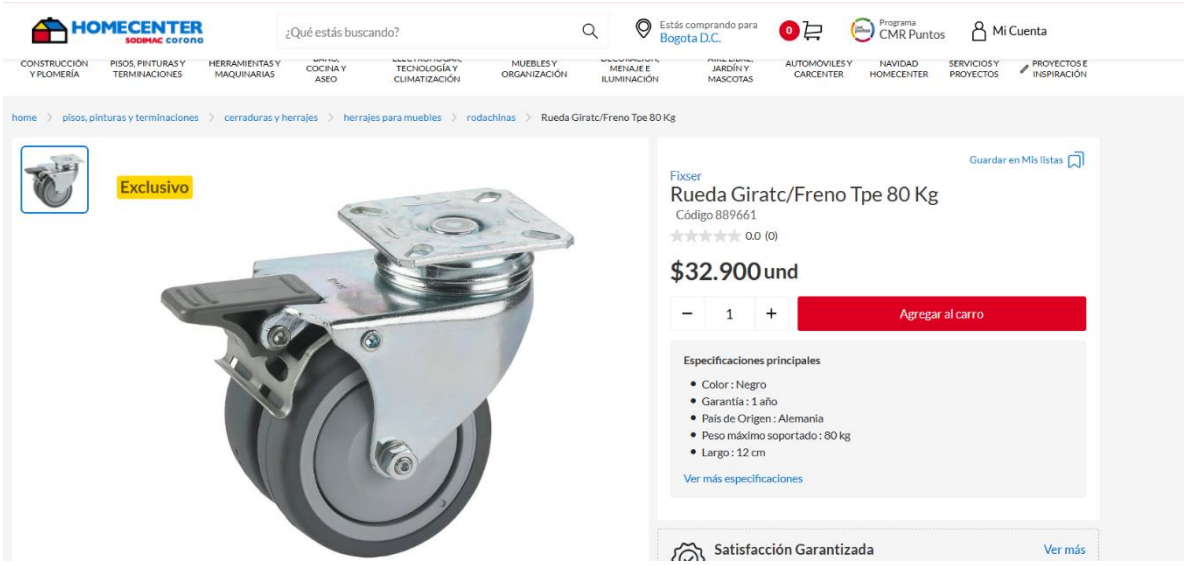
Solo para efectos educativos

Cordialmente/ Best Regards

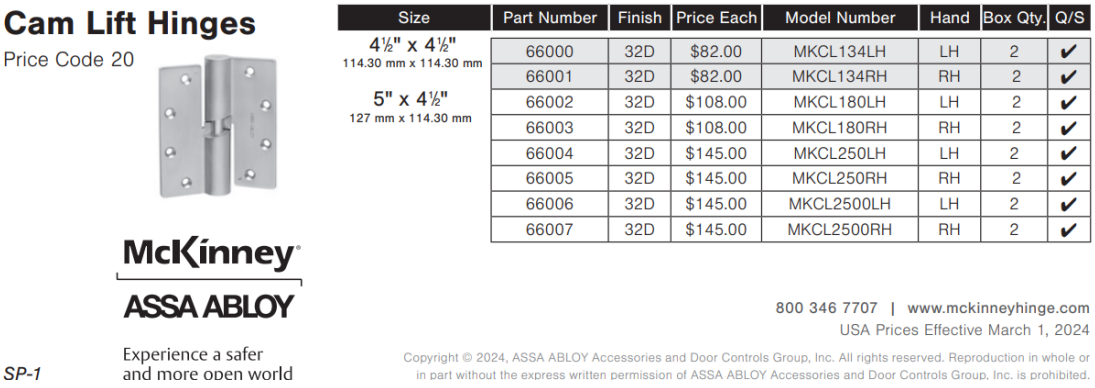
Carlos Rivera
+573155275893
Director de Ventas Nacional y Productos Complementarios

De: Mercadeo Aragon Aluminio <mercadeo@aragonaluminio.com>
Enviado el: miércoles, 13 de noviembre de 2024 9:01 a. m.
Para: Carlos Rivera Ext. 404 <crivera@aragonaluminio.com>
Asunto: RV: Consulta Aragon Aluminio Pagina Web

Anexo 2. Cotización placa de aluminio nacional.



Anexo 3. Cotización rodachin.



Size	Part Number	Finish	Price Each	Model Number	Hand	Box Qty.	Q/S
4½" x 4½" 114.30 mm x 114.30 mm	66000	32D	$82.00	MKCL134LH	LH	2	✔
	66001	32D	$82.00	MKCL134RH	RH	2	✔
5" x 4½" 127 mm x 114.30 mm	66002	32D	$108.00	MKCL180LH	LH	2	✔
	66003	32D	$108.00	MKCL180RH	RH	2	✔
	66004	32D	$145.00	MKCL250LH	LH	2	✔
	66005	32D	$145.00	MKCL250RH	RH	2	✔
	66006	32D	$145.00	MKCL2500LH	LH	2	✔
	66007	32D	$145.00	MKCL2500RH	RH	2	✔

Anexo 4. Cotización bisagra.

Materiales en contacto	**Coeficiente de fricción por rodadura.**
Ruedas de ferrocarril sobre rieles de acero	0,0002 a 0,001
Neumáticos ordinarios sobre asfalto	0,03 a 0,035

Ruedas de caucho sobre concreto	0,02 a 0,01

Anexo 5. Tabla de coeficientes de fricción por rodadura típicos.

Bibliografía

Bahill, A. T., & Chapman, W. (1993). A Tutorial on Quality Function Deployment. *Engineering Management*, 24-25.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Diseño de ingenieria mecánica de Shigley.* New York: McGraw-Hill.

Buri, H., & Weinand, Y. (Enero de 2008). *Folded Plate Structures, Architecture. Suiza.* Suiza.

Buri, H., & Weinand, Y. (2010). *Origami aus brettsperrholz.* Suiza.

Curletto, G. (2016). *RIGID-FOLDABLE ORIGAMI STRUCTURES: PARAMETRIC MODELLING WITH GRASSHOPPER.* Genoa, Italy.

Curt, S. (1960). *STRUKTURFORMEN der modernen Architektur.* München: Georg D. W. Callwey.

De Temmerman, I., arch, N., Mollaert, M., & Van Mele, I. (2007). Design and Analysis of a Foldable Mobile Shelter System. *International journal of space structures*, 161-168.

Dureisseix, D. (2012). An Overview of Mechanisms and Patterns with Origami. *International Journal of space structures*, 1-14.

Dureisseix, D. (2012). An Overview of Mechanisms and Patterns with Origami. *International Journal of space structures*, 1-14.

El Tiempo. (2020). Cada día se denuncian 17 robos en residencias en Bogotá. Bogotá, Colombia.

El Tiempo. (6 de Diciembre de 2021). Aumentó la sensación de inseguridad en Colombia, según encuesta. Bogotá, Colombia.

El Tiempo. (15 de Abril de 2022). Pese a inflacion, venta de motos y autos nuevos registró un aumento en Colombia. Bogotá, Colombia.

Fenci, G. ,. (2017). Deployable structures classification: A review. *International Journal of Space Structures.*, 112-130.

Ichiro, H., & Akiko, K. (2022). *Origami Engineering: inspired by Japanese folding culture.* Enginsoft.

L, G. (11 de Mayo de 2020). Las marcas de carros y motos preferidas por los ladrones en Colombia. Bogotá, Colombia.

la Magna, R., & et al. (2013). From nature to fabrication: Biomimetic design principles for the production of complex spatial structures. *International Journal of Spatial Structures*, 27-39.

Lee, T., & Gattas, J. (2016). Geometric Design and Construction of Structurally Stabilized Accordion Shelters. *ASME*.

Melancon, D., B., G., Mora, C., Hoberman, C., & Bertoldi, K. (2021). Multistable inflatable origami structures at the metre scale. *Nature*, 546-560.

Norman, M., & Arjomandi, K. (2017). Origami Applications in Structural Engineering: A Look at Temporary Shelters. *2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering.* Barcelona.

Norton, R. L. (2009). *Diseño de maquinaria.* Worcester, Massachusetts: McGrawHill.

QUINTERO BARBOSA, L. F. (2004). *DETERMINACION DE LA FUERZA MAXIMA ACEPTABLE PARA EMPUJAR Y HALAR CARGAS POR PARTE DE TRABAJADORES CON EXPERIENCIA PREVIA EN LA MANIPULACION DE CARGAS, EN UNA MUESTRA DEL PERSONAL DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.* BOGOTÁ.

Stavric, M., & Wiltsche, A. (2014). Quadrilateral patterns for rigid folding structures. *International journal of architectural computing*.

Temmerman, N. (2007). *Design and analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications.* Brussel: Vrije Universiteit .