

**Análisis de diseño estructural para soporte de barcazas mediante software tipo CAD y
CAE**

Adrian Enrique Manosalva Chinome

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Ingeniería Mecatrónica
Tunja
2022**

**Análisis de diseño estructural para soporte de barcas mediante software tipo CAD y
CAE**

Adrian Enrique Manosalva Chinome

**Trabajo de grado para optar al título de:
Ingeniero Mecatrónico**

Director:

Ing, Magister en Materiales. Yeison Daniel Molina Monsalve

Codirector:

Ing, Magister en Ingeniería. José Ricardo Sandoval García

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Ingeniería Mecatrónica
Tunja
2022**

Nota de aceptación:

Firma Presidente Del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 4 de Octubre de 2022

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.
(Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual).

A Dios por permitirme llegar al final de esta meta, por bendecirme con experiencias de vida enriquecedoras, enseñarme el camino de la humildad y las buenas acciones, rodearme de maravillosas personas, compañeros, profesionales y académicos.

A mis padres Eugenio Manosalva y Auralicia Chinome quienes son mi mayor fuente de inspiración y mi ejemplo a seguir, por sus enormes sacrificios, lecciones de vida y su apoyo incondicional para cumplir mis sueños.

A mis hermanas Nelcy, Laura y Sofía por su paciencia, consejos, por apoyarme en los buenos y malos momentos, por enseñarme a continuar adelante y jamás desistir.

A mis sobrinos y familiares por llenar mi vida de felicidad, por siempre estar presentes, acogerme en su corazón y en sus hogares.

A todos y cada uno de mis compañeros y docentes de pregrado que me apoyaron de una u otra manera para culminar este trabajo.

Agradecimientos

Especialmente al ingeniero Diego Cely por su apoyo en el desarrollo de este trabajo, a mi director y codirector de trabajo de grado los ingenieros Yeison Molina y Ricardo Sandoval, por su colaboración y tiempo valioso invertido en cada una de las fases de esta investigación, aportes y conocimientos, infinitas gracias.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	19
1. Embarcaciones como medio de transporte de carga.....	20
1.1 Barcazas como medio de transporte marítimo.....	23
1.1.1 Tipos de barcazas.....	23
1.1.2 Aspectos que deterioran el casco de una barcaza.....	24
1.1.3 Métodos usados en la protección del casco de embarcaciones.....	25
1.2 Aplicación de software CAD/CAE en el diseño y análisis de estructuras.....	26
1.3 Aplicación de software CAD/CAE en este proyecto.....	26
1.4 Ubicación geográfica de la problemática.....	27
2. Tecnología e ingeniería de diseño.....	29
2.1 Software de diseño y simulación.....	29
2.1.1 PTC Creo.....	29
2.1.2 Altair Simsolid.....	30
2.1.3 Ansys.....	31
2.1.4 Solidworks.....	32
2.1.5 Solid Edge.....	33
2.2 Criterios de selección de software.....	34
2.2.1 Compatibilidad.....	34
2.2.2 Facilidad de uso.....	35
2.2.3 Eficiencia del diseño.....	35
2.2.4 Presupuesto.....	35
2.2.5 Ayuda y soporte.....	35
2.3 Material estructural.....	36
2.3.1 El acero como material estructural.....	37
2.3.2 Relaciones esfuerzo-deformación.....	38
2.3.3 Aceros estructurales modernos.....	40
2.3.4 Tipos de aceros.....	41
2.3.5 Cargas estructurales.....	42
2.3.6 Estructuras de acero.....	43
2.3.7 Fallas en estructuras.....	45
2.3.8 Perfiles para vigas y columnas de acero.....	46
2.3.9 Conexiones soldadas.....	46
2.3.10 Protección del acero.....	49
3. Validación y evaluación.....	50
3.1 Diseño estructural soporte de barcaza.....	50
3.1.1 Características técnicas de la barcaza.....	50
3.1.2 Centro de gravedad y centroide.....	50
3.1.3 Equilibrio de cargas.....	54
3.1.4 Modelado y análisis de reacciones.....	54
3.2 Modelado y diseño estructural del soporte para barcazas.....	58
3.2.1 Elementos de soporte.....	59
3.2.2 Elementos de conexión.....	67

3.3 Simulación y Análisis de Resultados	74
3.3.1 Propiedades del Estudio	75
3.3.2 Cargas	75
3.3.3 Tensión Equivalente Von Mises.....	77
3.3.4 Factor de Seguridad	79
3.3.5 Deformación	80
3.3.6 Ensamble de Componentes.....	81
Conclusiones.....	84
Recomendaciones	85
Referencias	86
Anexos	95

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resumen Criterios de Selección de Software.....	36
Tabla 2. Características Técnicas de la Barcaza Objeto de Estudio.....	50
Tabla 3. Volumen y Ubicación de Puntos del Centroide de la Barcaza.....	53
Tabla 4. Características de los Soportes Estructurales	82

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Partes principales del casco de una embarcación.....	22
Figura 2. Barcaza pontón marca Poseidon apoyando excavadora de largo alcance LinkBelt 250-4.....	24
Figura 3. Embarcación con ánodos de sacrificio en eje de hélice, hélice y flaps.....	25
Figura 4. Imagen satelital de la ciudad de Barrancabermeja y sus afluentes	27
Figura 5. Simulación de caja de velocidades en entorno PTC Creo.....	30
Figura 6. Entorno de trabajo Simsolid analizando los elementos de una torre grúa	31
Figura 7. Entorno de trabajo Ansys en su versión 2020.....	32
Figura 8. Interfaz gráfica del entorno de trabajo en Solidworks	33
Figura 9. Entorno de trabajo SolidEdge	34
Figura 10. Probetas de material dúctil sometidas a ensayo	39
Figura 11. Diagrama esfuerzo-deformación de acero al bajo carbono.....	40
Figura 12. Estructura entramada de una edificación de cuatro plantas	45
Figura 13. Perfiles usados para vigas y columnas en estructuras de acero	46
Figura 14. Elementos del proceso de soldadura por arco metálico protegido	48
Figura 15. Tipos de uniones o juntas con aplicación de soldadura	49
Figura 16. Superficie de contacto del casco de la barcaza con la estructura diseñada.....	51
Figura 17. Ubicación en el plano cartesiano de la barcaza objeto de análisis.....	52
Figura 18. Diagrama de cuerpo libre de las reacciones sin resolver de la estructura.....	55
Figura 19. Elementos de conexión entre soportes y diagrama de cuerpo libre	56
Figura 20. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el pasador.....	57
Figura 21. Vista isométrica del modelado 3D de uno de los soportes usados en la estructura	59
Figura 22. Resistencia a la tracción y limite elástico del acero ASTM A106 Grado A, B y C60	60
Figura 23. Tabla de especificaciones sch (cedula), dimensiones de tubería petrolera en acero al carbón	61
Figura 24. Especificaciones técnicas de láminas de uso común en Colombia.....	62
Figura 25. Dimensiones y pesos de planchas HR.....	63

Figura 26. Características técnicas del electrodo revestido E6013	64
Figura 27. Plano soporte tipo 1.....	65
Figura 28. Plano soporte tipo 3.....	66
Figura 29. Plano soporte tipo 5 y 2.....	67
Figura 30. Ficha técnica perno estructural cabeza hexagonal que se debe usar en la conexión de platinas y soportes tubulares	68
Figura 31. Plano acotado de platinas usadas para conectar los soportes a lo largo de la estructura	69
Figura 32. Plano acotado de platinas usadas para conectar los soportes a lo ancho de la estructura	70
Figura 33. Características y dimensiones de platinas con sección transversal rectangular en acero.....	71
Figura 34. Plano de la estructura de soporte para barcaza.....	72
Figura 35. Vista isométrica de la estructura diseñada	73
Figura 36. Recreación de la estructura diseñada soportando una barcaza.....	74
Figura 37. Características del estudio de simulación en el solver NX Nastran.....	75
Figura 38. Cargas aplicadas a los elementos sujetos a análisis	76
Figura 39. Asignación de cargas a elemento estructural	76
Figura 40. Modelado y simulación del soporte tubular que se usara en la estructura	77
Figura 41. Resultado Von Mises del soporte estructural según informe SolidEdge	78
Figura 42. Resultado Von Mises del soporte.....	78
Figura 43. Factor de seguridad del soporte estructural según informe SolidEdge	79
Figura 44. Representación gráfica del factor de seguridad mínimo aplicado en el soporte	80
Figura 45. Traslación máxima y mínima presentada en el soporte de perfil circular.....	80
Figura 46. Simulación de la deformación que presenta el soporte.....	81

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto	96

Glosario

Arboladura: conjunto de mástiles de un barco (Diccionario Nautico, s.f.).

Arrostramiento: es el elemento estructural que sirve para arriostrar, es decir, para rigidizar o estabilizar la estructura impidiendo o limitando parcialmente los desplazamientos/deformaciones de la misma. Estos arrostramientos se usan generalmente en estructuras metálicas (Prontubeam, 2016).

Astillero: lugar donde se construyen y reparan las embarcaciones (Diccionario Nautico, s.f.).

Barcaza: lanchón para transportar carga de los buques a tierra, o viceversa (Wordreference, s.f.).

Carga nominal: es la carga más pesada para la que se ha diseñado un equipo (Spiegato, s.f.).

Casco: es el cuerpo estructural del barco sin incluir la cabina, el mástil, la jarcia o la quilla (Diccionario Nautico, s.f.).

CAD: (diseño asistido por computadora) es una tecnología para el diseño y la documentación técnica, que sustituye el dibujo manual por un proceso automatizado (Autodesk, s.f.).

CAE: (ingeniería asistida por computador) consiste en el uso de software con el objetivo de mejorar los diseños de los productos o de contribuir a la resolución de problemas de ingeniería para sectores muy diversos. Incluye la simulación, la validación y la optimización de productos, procesos y herramientas de fabricación (Siemens, s.f.).

Coefficiente de Poisson: es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo (Mecapedia, 2022).

Ductilidad: es la propiedad que tienen los metales y aleaciones que, bajo la acción de una fuerza, pueden estirarse sin romperse permitiendo obtener alambres o hilos (Federeacion de Enseñanza de CC.OO de Andalucía, 2011, p. 13).

Dureza: la resistencia que opone un cuerpo a ser rayado o penetrado por un cuerpo más duro (Federeacion de Enseñanza de CC.OO de Andalucía, 2011, p. 10).

Elongación: es una magnitud que mide el aumento de longitud que tiene un material cuando se le somete a un esfuerzo de tracción antes de producirse su rotura (Glosarios Alicante, 2018).

Eslora: longitud de una embarcación de proa a popa el yate mide doce metros de eslora (The Free Dictionary, s.f.).

Estructura: se refiere a la disposición y distribución de las partes de un todo, cuyo orden y relación entre sí permiten el funcionamiento de un determinado sistema (Significados, s.f.).

Fragilidad: es la propiedad de algunos metales de no poder experimentar deformaciones plásticas, de forma que al superar su límite elástico se rompen bruscamente (Federeacion de Enseñanza de CC.OO de Andalucía, 2011, p. 11).

Jarcia: nombre general con que se denomina al conjunto de cables y cabos que se emplean para asegurar la arboladura (Diccionario Nautico, s.f.).

Límite Elástico: es el mayor esfuerzo que se puede aplicar a un material sin causar una deformación permanente (Instron, s.f.).

Maleabilidad: es la propiedad que tienen los metales para formar láminas muy finas, sin rotura, por la acción de presiones (Federeacion de Enseñanza de CC.OO de Andalucía, 2011, p. 13).

Manga: es la mayor anchura del barco (Sailand Trip, 2014).

Módulo de Elasticidad: el módulo de elasticidad (E), también llamado módulo de Young, es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente (en la zona de comportamiento elástico de dicho material) entre los incrementos de tensión aplicados (ds) en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación longitudinal unitaria (de) producidos (Mecapedia, 2022).

NX Nastran: es un solucionador avanzado de simulación y análisis por elementos finitos adaptable a diferentes entornos de ingeniería (Iberica de Ingenieria , s.f.).

Plasticidad: es la propiedad mecánica que tienen algunos metales para poder deformarse permanentemente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su rango elástico (Federeacion de Enseñanza de CC.OO de Andalucía, 2011, p. 13).

Polígono: es una figura geométrica bidimensional formada por una serie finita de segmentos consecutivos no colineales que constituyen un espacio cerrado (Westreicher, s.f.).

Popa: parte trasera de un barco (The Free Dictionary, s.f.).

Proa: parte delantera de una embarcación con la que se corta el agua (The Free Dictionary, s.f.).

Puntal: es la altura del buque o distancia vertical en metros medido desde la cara inferior del casco, en su intersección con la quilla, y la línea de cubierta principal (On Nautic, 2020).

Solid Edge: es el programa de diseño CAD 3D que cuenta con herramientas excepcionales para el modelado 3D de piezas y conjuntos, además de la gestión de prototipos digitales de forma integrada (Prismacim, s.f.).

Tenacidad: es la resistencia que opone éste u otro material a ser roto, molido, doblado o desgarrado, siendo una medida de su cohesión (Federeacion de Enseñanza de CC.OO de Andalucía, 2011, p. 10).

Von Mises: la teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de von Mises es igual al límite de tensión. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión. Sin embargo, el software le permite utilizar el límite de tensión de tracción/ruptura o establecer su propio límite de tensión (Dassault Systemes, 2014).

Resumen

Análisis de diseño estructural para soporte de barcas mediante software tipo CAD y CAE

En la ciudad de Barrancabermeja, se encuentran almacenadas a orillas del río Magdalena barcas de pontones, propiedad de una entidad financiera, estas barcas se encuentran almacenadas a la intemperie donde agentes climáticos y el contacto directo con el suelo principalmente, provocan afectaciones por corrosión al casco de las embarcaciones. En esta investigación se muestra el diseño y el análisis de una estructura con la capacidad de soportar una barcaza de pontones, evitando el deterioro de su casco por el contacto directo con el suelo.

El software CAD/CAE permite la realización del diseño de la estructura que soportara aproximadamente 40 toneladas, peso que corresponde al de una barcaza de pontones, mediante el software Solid Edge se conoció el comportamiento de la estructura sometida a esta carga con un factor de seguridad mínimo de 1.95 unidades, posteriormente se determinó el material y el tipo de estructura que protege el casco de la embarcación de la corrosión.

Se emplea investigación aplicada, que permite fortalecer las competencias específicas de la ingeniería, empleando metodología cuantitativa enfocada en el área de resistencia de materiales y diseño asistido por computador, se logró seleccionar el software de diseño que además permitió conocer el comportamiento de la estructura sometida a una carga muerta distribuida, el tipo de material que debía ser usado para la construcción de la estructura y el tipo de estructura.

Las embarcaciones almacenadas en seco como barcas de pontones, se ven afectadas principalmente en su casco por la corrosión, al estar en contacto directo con el suelo, esta problemática condujo a brindar una solución estructural que mitigara ese deterioro; con ayuda de fuentes de información primarias y secundarias como los sitios web 4SailNautica, Aceropedia, 3DNatives, entre otros, se logró conocer información relacionada a las características y partes de una embarcación, los tipos de cascos, métodos de protección de estos y aplicaciones, los tipos de software usados en el modelado y análisis de elementos, también los proyectos que se han desarrollado usando software tipo CAD/CAE, los tipos de estructuras y aceros usados en la construcción de embarcaciones, finalmente con esa información se consiguió elegir los materiales y el software para modelar, simular y analizar la estructura.

La implementación de software CAD/CAE en este proyecto fue de gran relevancia para conocer previamente el comportamiento de los elementos diseñados, seleccionar los materiales, revisar su geometría, dimensiones y realizar mejoras, la estructura que se diseña es de fácil montaje, compuesta por elementos que se pueden unir, desarmar, fabricar y transportar sin inconvenientes.

Palabras clave: Diseño, Solid Edge, Barcaza, Simulación, CAD, CAE.

Abstract

Structural design analysis for barge support using CAD and CAE software

In the city of Barrancabermeja, pontoon barges owned by a financial institution are stored on the banks of the Magdalena river. These barges are stored outdoors where climatic agents and direct contact with the ground mainly cause corrosion damage to the hull of the vessels. This research shows the design and analysis of a structure with the capacity to support a pontoon barge, avoiding the deterioration of its hull due to direct contact with the ground.

The CAD/CAE software allows the design of the structure to support approximately 40 tons, weight that corresponds to that of a pontoon barge, the Solid Edge software showed the behavior of the structure under this load with a minimum safety factor of 1.95 units, Subsequently, the material and type of structure that protects the hull of the vessel from corrosion by direct contact with the ground was determined.

Applied research is used to strengthen specific engineering competencies, using quantitative methodology focused on the area of strength of materials and computer-aided design, it was possible to select the design software that also allowed to know the behavior of the structure subjected to a distributed dead load, the type of material to be used for the construction of the structure and the type of structure.

Vessels stored in dry storage as pontoon barges are mainly affected in their hull by corrosion, being in direct contact with the ground, this problem led to provide a structural solution to mitigate this deterioration; with the help of primary and secondary information sources such as the websites 4SailNautica, Aceropedia, 3DNatives, among others, it was possible to know information related to the characteristics and parts of a boat, the types of hulls, their protection methods and applications, the types of software used in the modeling and analysis of elements, also the projects that have been developed using CAD/CAE type software, the types of structures and steels used in the construction of boats, finally with this information it was possible to choose the materials and software to model, simulate and analyze the structure.

The implementation of CAD/CAE software in this project was of great relevance to previously know the behavior of the designed elements, select the materials, review their geometry, dimensions and make improvements, the structure that is designed is easy to assemble, composed of elements that can be joined, disassembled, manufactured and transported without inconveniences.

Keywords: Design, Solid Edge, Barge, Simulation, CAD, CAE.

Introducción

El almacenamiento en seco de embarcaciones es poco común en Colombia; los astilleros navales que se encuentran en el país como Astivik Shipyard “entidad dedicada a cubrir las necesidades de diseño, construcción, reparación y mantenimiento de embarcaciones” (Astivik, s.f.), o Cotecmar una organización Colombiana que trabaja dentro del campo de la investigación científica y tecnológica, apoyando el desarrollo de la industria marítima colombiana (Cotecmar, s.f.), usan gradas en concreto para soportar las embarcaciones que se encuentran en mantenimiento o en proceso de construcción. Por otro lado, existen en el mundo estantes para almacenar embarcaciones de recreo con eslora no superior a los 4 metros, “las embarcaciones de recreo son aquellas embarcaciones que tienen una eslora comprendida entre 2,5 y 24 metros”. (Semirrigidas Online, 2017), este tipo de estantería no es lo suficiente robusta para soportar embarcaciones de eslora, manga y peso de mayor dimensión.

El siguiente trabajo de investigación tiene como finalidad brindar el diseño y el análisis de una estructura que eleve del suelo barcazas que se encuentren almacenadas en seco, con el fin de proteger su casco de la humedad del suelo y agentes ambientales que aceleren la corrosión en estas, teniendo en cuenta las condiciones y agentes ambientales de la ciudad de Barrancabermeja – Colombia. Esto con el fin de que las entidades que son propietarias de este tipo de embarcaciones y las tienen almacenadas en seco, puedan almacenarlas de forma más segura, organizada y proteger la estructura de sus cascos de la corrosión.

En el capítulo primero se explican a detalle los antecedentes, se describe la situación problema y la justificación de este trabajo teniendo en cuenta su aplicación en contextos, globales, nacionales y locales. En el capítulo segundo se explican aspectos generales de embarcaciones, se describe la utilidad y tipos de barcazas que existen. En el tercer capítulo se emplean fuentes de información primarias, secundarias y terciarias, enfocadas en la búsqueda del software de simulación y materiales de construcción con las características mecánicas apropiadas para soportar elementos de gran peso, a su vez se buscará que sean de fácil adquisición en el mercado local. Finalmente, en el capítulo cuarto se presentan el diseño, la simulación de la estructura en el software seleccionado previamente, junto a los resultados arrojados, los planos, las recomendaciones y el presupuesto estimado para su diseño.

1. Embarcaciones como medio de transporte de carga

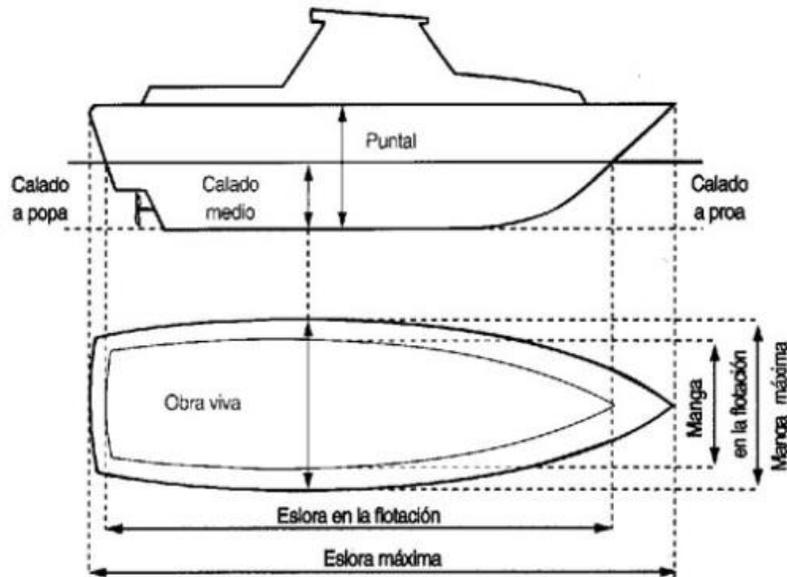
Una embarcación es un cuerpo flotante que puede ser dirigido, para ello cuenta con algún medio de propulsión. Dispone de capacidad de carga y posee como características esenciales la estabilidad y la resistencia (On Nautic, 2020). Las partes principales de una embarcación son:

- El casco es la estructura externa de un barco (Alaymar, 2019)
- La proa que es la parte delantera encargada de cortar las aguas y el oleaje para facilitar la navegación (On Nautic, 2020).
- La popa es la parte trasera donde va instalado el timón, las hélices, etc (On Nautic, 2020).
- Estribor es el nombre que recibe el costado derecho de la embarcación (On Nautic, 2020).
- Babor es el costado izquierdo de la embarcación mirando desde la popa hacia la proa.
- Amuras, en los barcos hay dos, la de babor y la de estribor. Las dos amuras forman la proa, es la parte que se estrecha desde el costado del barco hasta la proa (On Nautic, 2020).
- Las aletas son la parte posterior a la popa de la embarcación. Tenemos dos al igual que las amuras, la de estribor y la de babor (On Nautic, 2020).
- La línea de crujía es la raya que divide de forma imaginaria nuestra embarcación en dos partes. La trazamos de popa a proa, dividiendo la embarcación por la mitad, por la parte derecha tendríamos estribor y por la parte izquierda babor (On Nautic, 2020).
- La cubierta es la parte superior del casco que cierra toda la estructura. Es la parte de la embarcación por dónde andamos y nos sentamos, es el piso del barco en su parte superior (On Nautic, 2020).
- Obra viva o carena se refiere a la parte sumergida del casco, es decir, de la línea de flotación para abajo. Habitualmente está pintada con pintura antiadherente para evitar que se incrusten algas o moluscos (On Nautic, 2020).
- Obra muerta es la parte emergente del casco sobre la línea de flotación hasta la borda del buque (On Nautic, 2020).
- Línea de flotación es la línea imaginaria que separa la obra viva de la obra muerta, es decir, la línea que forma la intersección del agua con el casco. Esta raya es arbitraria, ya que cambia según el estado de carga de la embarcación (On Nautic, 2020).

- La sentina está situada por encima del casco. A ella van a parar todas las aguas sucias y aceites que se vierten por encima de la embarcación, ya sea en cubierto o zonas interiores del barco o de la misma sala de motores (On Nautic, 2020).
- Plan es el piso de la embarcación en su parte más baja, sobre la quilla y las sentinas (On Nautic, 2020).
- Eslora es la longitud de la embarcación (On Nautic, 2020).
- Eslora de flotación es la longitud del plano de flotación medida entre proa y popa, y es distinta para cada superficie de flotación (On Nautic, 2020).
- La manga es la anchura del barco (On Nautic, 2020).
- Puntal es la altura del buque o distancia vertical en metros medido desde la cara inferior del casco, en su intersección con la quilla, y la línea de cubierta principal o la cara superior del trancañil (On Nautic, 2020).
- Calado es la altura de la parte sumergida del casco. También se puede definir como la medida vertical tomada desde la quilla hasta la línea de flotación (On Nautic, 2020).
- Francobordo es la distancia entre la línea de flotación y la cubierta estanca más alta. Indica la reserva de flotabilidad. Por encima de este valor, si el agua penetra en el buque, se hunde (On Nautic, 2020).

Figura 1

Partes principales del casco de una embarcación



Fuente: Andalucía, C. d. (s.f.). *Atlas del patrimonio cultural en los puertos de interés pesquero de Andalucía*. http://grupo.us.es/puertosandaluces/p10_39varadero.html#cerrar

En la fabricación de embarcaciones de carga, el acero naval comúnmente usado en la construcción del casco es el acero AHC6, DH36 o EH36, materiales cuyas propiedades mecánicas permiten mayor duración de la estructura. “Aceros con límites de elasticidad altos y resistencias a la tracción típicas en un rango de 490 a 620 MPa, unión sencilla y control estricto de posibles defectos de soldadura, propiedades metalúrgicas superiores para superar la fractura frágil / fatiga” (Masteel, 2020). La forma del casco de embarcaciones determina en gran medida su utilidad, se pueden encontrar cuatro formas y de cada una existe infinidad de diseños, “por ejemplo el casco en forma de v es usado en barcos de recreo, el casco plano es usado para embarcaciones que navegan en lagos, ríos o pantanos, debido a que con viento y mar agitado son menos estables y difíciles de gobernar” (4Sail Nautica, s.f.), el casco en forma redonda es muy usado en remolcadores, veleros, canoas o barcos de pesca ya que, desplazan el agua equivalente a su peso y requieren menos potencia, por último está el multicasco que es usado en casas flotantes, trimaranes, pontones y catamaranes.

1.1 Barcazas como medio de transporte marítimo

Las barcazas no son algo así como buques o barcos independientes, sino que son embarcaciones flotantes generalmente remolcadas o remolcadas junto con otras embarcaciones. Las barcazas son usadas ampliamente como medios de transporte fluviales, su uso se remonta justo antes de la época de la revolución industrial, “se utilizaban como el principal método de transporte para trasladar la carga a través de lugares conectados por pequeñas masas de agua, pero después de la Revolución Industrial y la invención de la máquina de vapor y, en consecuencia, de los trenes, la demanda de barcazas como transportadores de carga comenzó a reducirse debido a las limitaciones de velocidad (Ncgo, 2020).

1.1.1 Tipos de barcazas

Los diferentes tipos de barcazas son los siguientes:

- Barcaza cuartel que también se conoce como casa flotante.
- De carga seca a granel, usadas para cargar granos o minerales secos.
- De carga líquida, muy útiles para transportar productos petroquímicos y fertilizantes.
- De tolva dividida, se utiliza para el transporte de material de dragado, ya que están equipados con herramientas de descarga adecuadas. La barcaza de tolva dividida se utiliza ampliamente en la construcción marina, ya que puede descargar el material (tierra, arena, material de dragado, etc.) en el sitio.
- De potencia, estas son además una planta de energía móvil. (Ncgo, 2020).
- Barcaza pontón, conocidas también como barcazas grúa, que además pueden flotar excavadoras de dragado y equipos de izaje de carga como grúas (Poseidon Barge, s.f.).

En la figura 2 se muestra una barcaza pontón marca Poseidon flotando una excavadora de largo alcance, usada en proyecto de dragado en San Angelo, Texas.

Figura 2

Barcaza pontón marca Poseidon apoyando excavadora de largo alcance LinkBelt 250-4



Fuente: Poseidon Barge. (s.f.). *Posseidon p1 proyectos barge*. <https://www.poseidonbarge.com/products/sectional-barges/poseidon-i/?lang=es>

1.1.2 Aspectos que deterioran el casco de una barcaza

Las embarcaciones tipo barcaza son usadas por lo general como plataformas de trabajo para una amplia cantidad de operaciones de minería y construcción, sin embargo, la corrosión es uno de los mayores inconvenientes que debe afrontar su estructura, debido a su constante contacto con el agua. “La corrosión es un proceso natural de los materiales, generalmente metales, que se mueven hacia su estado de energía más bajo posible, lo que resulta en una reacción espontánea entre el material y su entorno que da como resultado la degradación de ese material” (Akzo Nobel, s.f.). Otra de las razones por las cuales las embarcaciones sufren corrosión, depende también del clima del entorno, por ejemplo, en climas cálidos la corrosión en embarcaciones es mayor. “los barcos en climas más cálidos tienen más probabilidades de experimentar corrosión que los barcos en climas más fríos, pero todos los barcos estarán sujetos a este tipo de corrosión en algún momento” (Magica, 2018). “Los cascos de embarcaciones como barcasas de pontones están fabricados en su mayoría de acero naval, por lo que la

corrosión es el factor que los deteriora, ya sea por corrosión electroquímica, galvánica o electrolítica” (Fondear, s.f.).

1.1.3 Métodos usados en la protección del casco de embarcaciones

En la industria naval se usan métodos como la protección catódica, donde se usan ánodos de sacrificio, cuya función es proteger el casco de la embarcación, los ejes de las hélices, las hélices y flaps de la corrosión electrolítica, “en agua dulce se usan ánodos de sacrificio de magnesio, en agua salada de zinc y en agua salubre de aluminio” (Nautic Advisor, s.f.). “La protección catódica consiste en el conjunto de tecnologías empleadas para controlar la corrosión galvánica en una superficie metálica mediante la conversión de dicha superficie en el cátodo de una celda electroquímica. El metal noble que queremos proteger, como por ejemplo un casco de acero de un barco, la hélice o el timón, constituirá el cátodo de la celda electroquímica” (Llarco Fluid Technology, s.f.). Los sistemas de impresionado, revestimientos o también existen otros mecanismos como el uso de pigmentos. “El uso de zinc metálico como pigmento de sacrificio, en esencia el desarrollo de un sistema de protección catódica in situ” (Akzo Nobel, s.f.). La figura 3 indica la ubicación de ánodos de sacrificio en el casco de la embarcación y otras zonas importantes que requieren protección de la corrosión electrolítica.

Figura 3

Embarcación con ánodos de sacrificio en eje de hélice, hélice y flaps



Fuente: Nauticadvisor. (s.f.). *¿Qué son y qué función cumplen los ánodos de sacrificio en las embarcaciones?* <https://www.nauticadvisor.com/blog/2016/06/22/que-son-y-que-funcion-cumplen-los-anodos-de-sacrificio-en-las-embarcaciones/>

Un mecanismo que también suele ser usado para proteger las embarcaciones, es mediante el almacenamiento en seco, que se da para botes que se dejan de usar por ciertos periodos de tiempo, en su mayoría se usan estanterías que son usadas únicamente para botes de pequeñas dimensiones, también en el mercado se pueden encontrar cunas que son usadas únicamente para botes con casco redondo o en v.

1.2 Aplicación de software CAD/CAE en el diseño y análisis de estructuras

El software de simulación CAE permite realizar evaluaciones del diseño, sometándolo a pruebas, con ello conseguir un producto más sofisticado, “el software de simulación CAE abarca análisis de elementos finitos (FEA), dinámica de fluidos computacional (CFD), dinámica multicuerpo (MDB) y capacidades de optimización” (G2, 2021). El software CAE permite analizar la geometría del elemento diseñado en CAD, usando modelos matemáticos que ayudan a perfeccionar el diseño. “Las herramientas CAE se utilizan para analizar la geometría CAD, lo que permite a los diseñadores de productos simular y estudiar el comportamiento esperado del producto en diferentes entornos” (Npd Solutions, s.f.). “Dentro del software de CAD/CAE más comunes en el mercado encontramos Ansys, líder en la simulación CAE, Solidwork por otro lado es un software especializado en el diseño CAD, también lo complementa el análisis y simulación CAE. Por otro lado, esta Solid Edge un software que permite a los ingenieros de diseño validar digitalmente diseños de ensambles de piezas y ensambles dentro de su entorno” (Pixel Sistemas, s.f.).

1.3 Aplicación de software CAD/CAE en este proyecto

La creación de una estructura que permita proteger embarcaciones de mayores dimensiones es necesaria y para su diseño se puede dar uso de software CAD y CAE que en el diseño de proyectos de ingeniería proporcionan a los diseñadores una gran variedad de herramientas para el diseño en 3D (tres dimensiones), “permite a los diseñadores visualizar sus diseños y probarlos con variables del mundo real” (Cad Crowd, 2022). Es en un entorno CAD donde el diseñador puede crear, editar y controlar la calidad del elemento final que desea, ya que el software le permite copiar, borrar, cortar y crear trazos con mayor exactitud. “También puede cambiar las propiedades del objeto, como el tipo de línea, el grosor de línea, el color y la

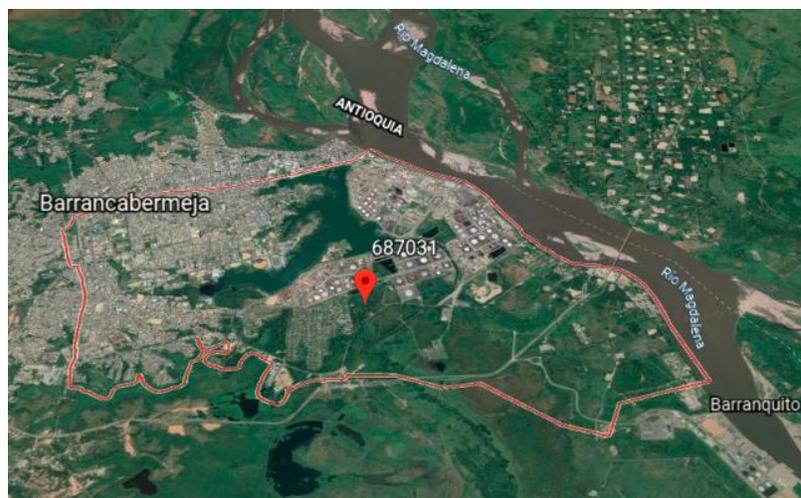
capa, en cualquier momento” (Lopol, s.f.). Dentro de las ventajas más importantes que ofrece el uso de software tipo CAD, están: la disminución del porcentaje de error, facilidad de edición y la reutilización de código. “Como toda la tarea se lleva a cabo con la ayuda de herramientas informáticas, se elimina el problema de la duplicación del trabajo, puede copiar las diferentes partes de código y diseño que se pueden reutilizar varias veces una y otra vez” (India Cad Works, 2014).

1.4 Ubicación geográfica de la problemática

La problemática se evidencia en la ciudad de Barrancabermeja, esta ciudad se encuentra ubicada en la orilla oriental del río Magdalena, su economía gira en torno a la explotación, refinamiento del petróleo y una diversificada industria petroquímica, debido a que la ciudad se encuentra geográficamente a orillas del río Magdalena, el flujo náutico atraviesa el país de norte a sur. “Entre otras labores económicas de la región aparte de las industrias petroquímicas, se destacan: la operación portuaria y los servicios logísticos para el transporte, la ganadería, la pesca, la agricultura y el comercio” (Alcaldía de Barrancabermeja, s.f.).

Figura 4

Imagen satelital de la ciudad de Barrancabermeja y sus afluentes



Fuente: Google. (s.f.). *Ubicación de la ciudad de Barrancabermeja.* <https://earth.google.com/web/@7.07757124,-73.88241328,75.30002194a,13127.57867262d,35y,-164.47670932h,45.01011509t,-0r>

En la ciudad de Barrancabermeja en áreas circundantes al río Magdalena, se pueden observar embarcaciones en operaciones de atraque o estacionadas en tierra, cierta cantidad de las embarcaciones allí almacenadas son barcazas, algunas de ellas son propiedad de una entidad financiera, se desconoce el motivo por el cual la entidad decidió almacenar estos equipos en seco, sin embargo, las condiciones de acaparamiento de estos equipos, técnicamente no favorecen su estado de conservación.

2. Tecnología e ingeniería de diseño

2.1 Software de diseño y simulación

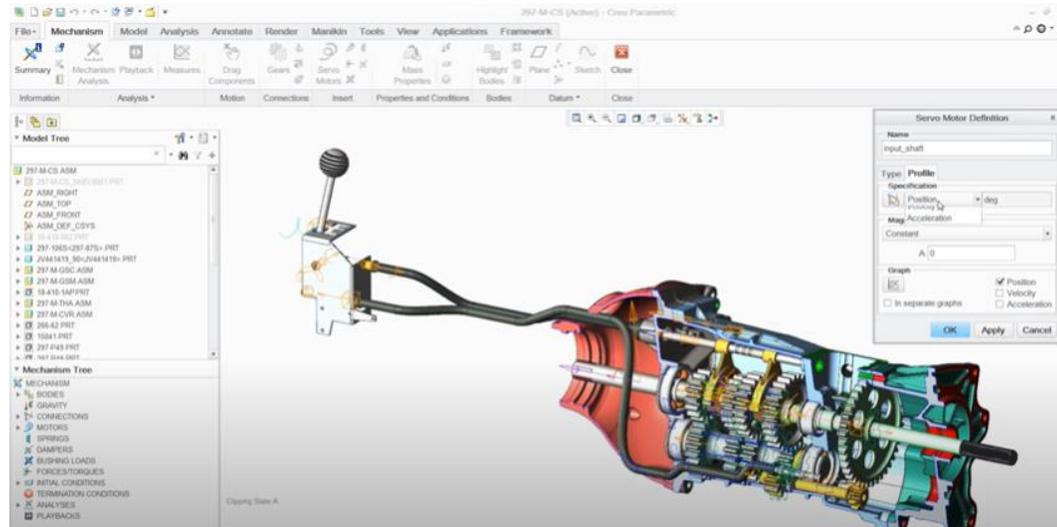
El software CAD es una de las herramientas computacionales más usadas por arquitectos, ingenieros estructurales, ingenieros civiles, ingenieros eléctricos, por ingenieros de diseño y fabricación de elementos mecánicos entre otros, esto se debe a que facilita el proceso de diseño, análisis y fabricación de productos de forma precisa y perfecta. Por lo tanto, su uso acarrea beneficios en cuanto a calidad del diseño, “por ejemplo, si los diseñadores quieren dibujar un círculo, no tienen que hacerlo manualmente. Pueden simplemente seleccionar la opción de círculo en el banco de trabajo y pasar al siguiente paso. Les ahorra tiempo y esfuerzo y elimina imprecisiones” (Prasad, 2022), también permite que el proceso de diseño se realice en periodos de tiempo cortos, documenta las operaciones que se realizan, medidas, geometrías, dimensiones, especificaciones de material y cálculos. Las herramientas CAE por su lado, ofrecen la evaluación de los productos que se diseñan, detectando fallas y permitiendo realizar adecuaciones y mejoras en el diseño. A continuación, se mencionan los más usados y recomendados por profesionales en el área.

2.1.1 PTC Creo

Es un tipo de software desarrollado por Parametric Technology Corporation, que cuenta con herramientas de análisis térmico, movimiento, estructural y otras funcionalidades como generación de superficies paramétricas. “Dentro de las herramientas que ofrece este software están, creación de prototipos digitales, diseño mecánico, creación de productos y su documentación, modelado estilizado complejo, diseño basado en tecnologías modernas incluyendo impresión 3D, simulación y análisis para validar que sus productos sean más duraderos” (3Dcad Portal, s.f.).

Figura 5

Simulación de caja de velocidades en entorno PTC Creo



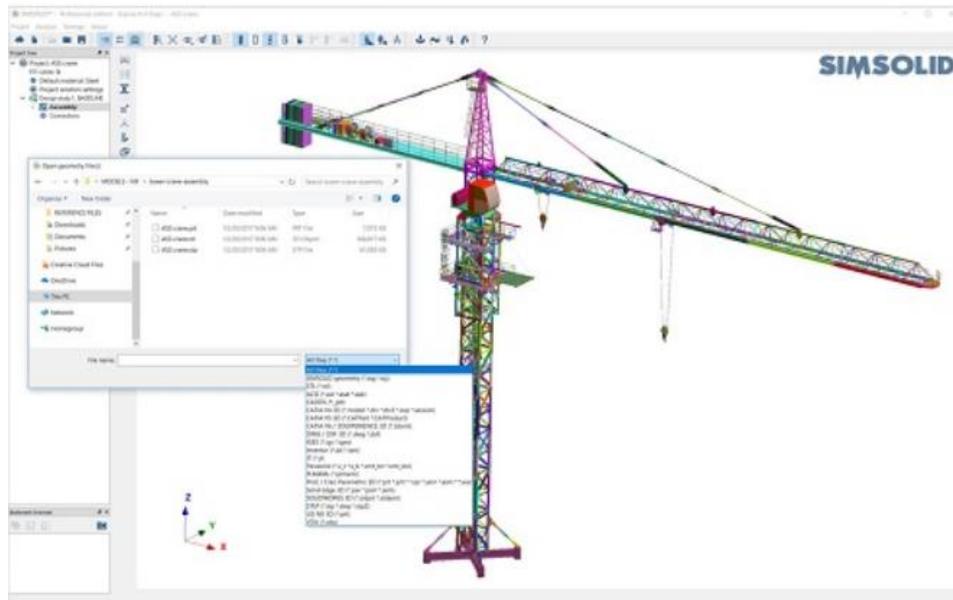
Fuente: PTC (Productor). (2014, 6 de octubre). *Mechanisms with PTC Creo - PTC Creo Showcase* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=MPEIT04xXaM&ab_channel=PTC

2.1.2 Altair Simsolid

Este software ofrece herramientas de análisis estructural con rápidas iteraciones, “es el primer software de simulación estructural creado específicamente para el ingeniero de diseño. Contiene tecnología que elimina la simplificación y mallado de la geometría, las dos tareas que más tiempo consumen en procesos de análisis por elementos finitos FEA” (3Dcad Portal, s.f.). La figura 6 ilustra una torre grúa cuyos elementos sometidos a análisis son mallados en el entorno Simsolid.

Figura 6

Entorno de trabajo Simsolid analizando los elementos de una torre grúa



Fuente: 3Dcadportal. (s.f.). *Ptc Creo es el nuevo nombre para ProEngineer*. <https://www.3dcadportal.com/creo-elements-pro.html>

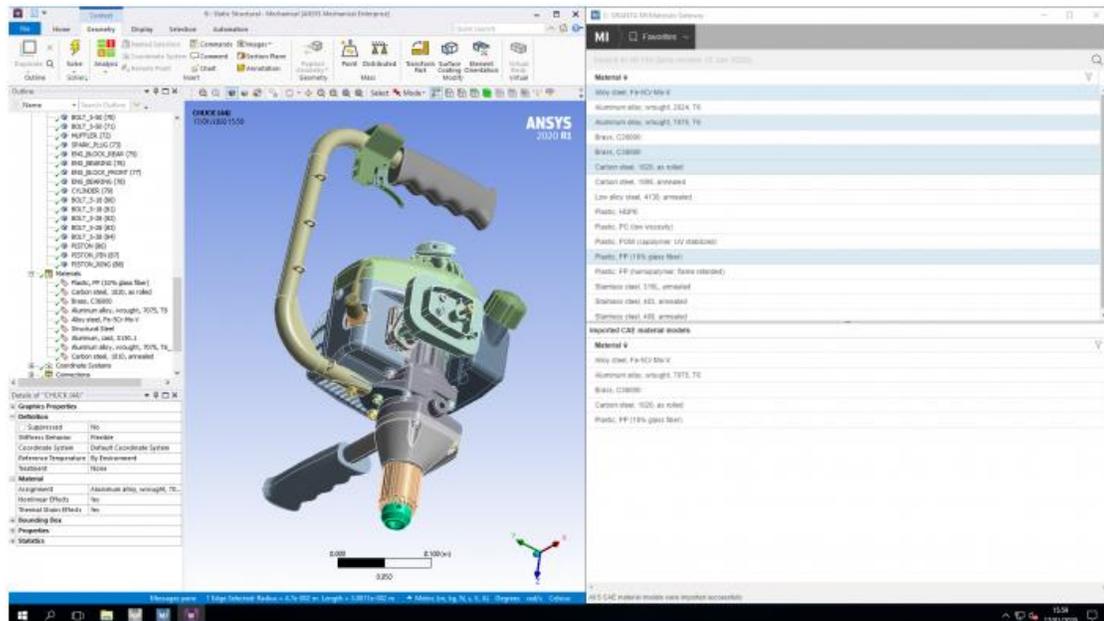
2.1.3 Ansys

Es una de las líneas de softwares CAE más conocidas y renombradas a nivel global por centros de investigación, empresas y universidades, por sus características, no solo de reducir los tiempos de desarrollo de productos sino que permite optimizar procesos, “Ansys es líder global en simulación de ingeniería, abarcando análisis estructural, fluido dinámica, electromagnética, física y auxilia a las empresas más innovadoras del mundo a suministrar productos radicalmente mejores a sus clientes” (Engineering Simulation and Scientific Software, s.f.).

Ansys ofrece varios paquetes donde incluye solución de problemas complejos de ingeniería estructural, fluidos, incluso de ingeniería electrónica, análisis gráfico de las propiedades de los materiales. “El uso del software de simulación en ingeniería de Ansys para diseñar sus productos le garantiza mantener su promesa con cada producto y cada pedido” (Navarro y Soler, s.f.). La figura 7 enseña gráficamente la calidad de los diseños que se pueden conseguir en software CAE Ansys, este software suele ser más robusto que los ya mencionados antes.

Figura 7

Entorno de trabajo Ansys en su versión 2020

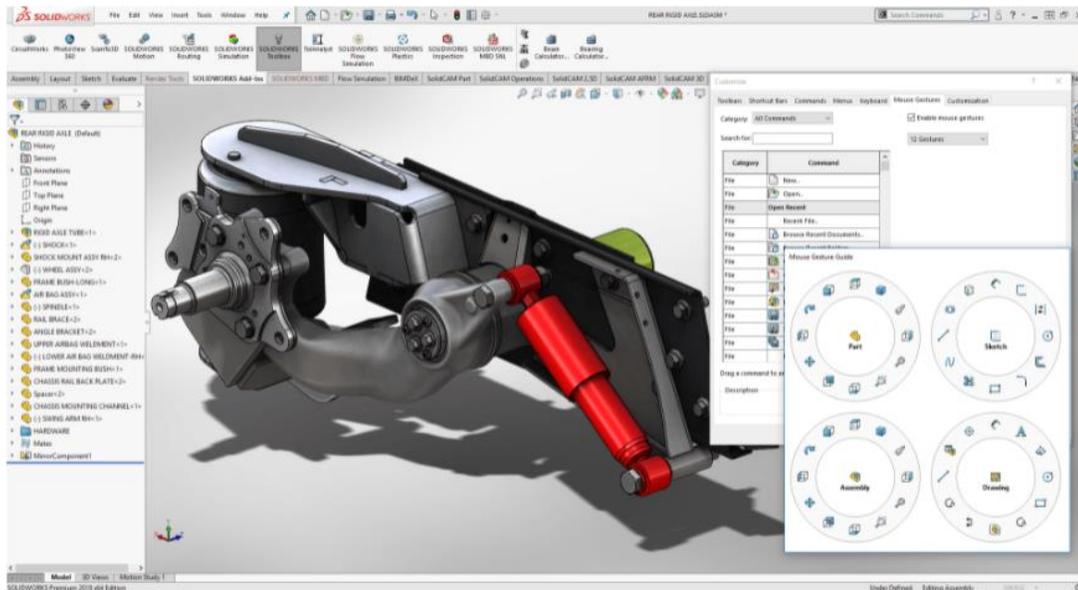


Fuente: Alvarez, A. (2020, 10 de marzo). *Ansys 2020 R1 favorece la combinación de simulaciones multifísicas*. <https://www.esss.co/es/blog/el-ansys-2020-r1-favorece-la-combinacion-de-simulaciones-multifisicas/>

2.1.4 Solidworks

Este software de diseño CAD 3D, ofrece una gran variedad de herramientas que brindan la posibilidad de diseñar creando modelos y ensambles, simular para que se pueda evaluar el diseño y garantizar que su desarrollo sea el mejor posible, también ofrece herramientas que permiten evaluar el impacto ambiental del diseño durante su ciclo de vida.

Dentro de las ventajas de usar este software también está presente el hecho de que su interfaz es intuitiva y por ende fácil de usar, además, “permite reducir considerablemente el tiempo de los ciclos de diseño, produce un ahorro de tiempo y costes, incrementa la calidad de los productos diseñados” (Solidbi, s.f.). La figura 8 permite apreciar las características de diseño y modelado que ofrece el software Solidworks, imagen tomada del taller de personalización de interfaz de usuario Solidworks del Ingeniero Rubén González Reyes.

Figura 8*Interfaz gráfica del entorno de trabajo en Solidworks*

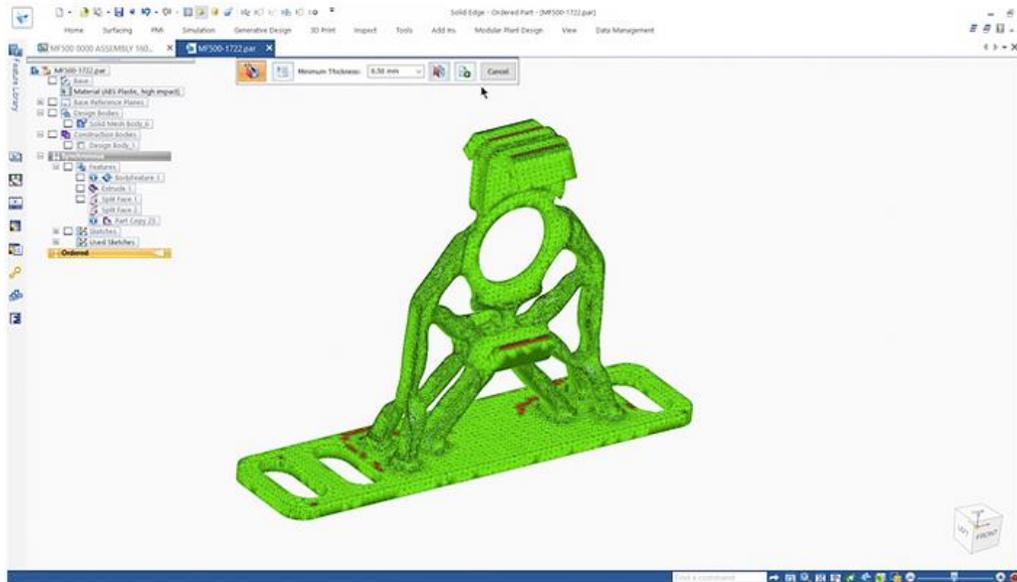
Fuente: González Reyes , R. (2018, 13 de julio). *Taller de Solidworks personalización de la interfaz de usuario*. <https://solidservicios.com/cal/taller-de-solidworks-personalizacion-de-la-interfaz-de-usuario/>

2.1.5 Solid Edge

Este software de modelado 3D pertenece a Siemens y se caracteriza por ser uno de los softwares CAD de ingeniería más potentes, además es el único que permite diseñar de dos formas distintas, “la primera consiste en el modelado tradicional, y la segunda consiste en la tecnología Síncrona (Synchronous Technology en inglés). En esta última se diseña y modifica sin árbol de operaciones, siendo el mismo sistema quien decide los parámetros a modificar” (Marchante, 2020). En SolidEdge, el diseño generativo es uno de sus puntos interesantes, debido a que permite evaluar miles de posibles soluciones en plazos relativamente cortos, permitiendo optimizar piezas. Por otro lado, combina la optimización topológica evitando que las piezas sean pesadas y requieran mayor cantidad de material.

Figura 9

Entorno de trabajo SolidEdge



Fuente: Marchante, A. (2020, 2 de noviembre). *Solid Edge, ¿qué características tiene esta solución de modelado 3D?* <https://www.3dnatives.com/es/solid-edge-solucion-modelado-02112020/#!>

2.2 Criterios de selección de software

Teniendo en cuenta que en la actualidad existe gran disponibilidad de software CAD en el mercado, la búsqueda del más adecuado para nuestro proyecto puede ser una tarea complicada, sobre todo con las herramientas que se requieren y el resultado que se requiere. Dentro de los parámetros que se establecieron para la selección del software están los siguientes: Compatibilidad, facilidad de uso, eficiencia del diseño, presupuesto, ayuda y soporte.

2.2.1 Compatibilidad

Antes de adquirir cierto tipo de software es importante verificar el tipo de computador del que se dispone para trabajar y si cumple con las especificaciones que solicita el software para funcionar correctamente, por ende, el uso de software que haga uso de poco espacio de memoria permite que se puedan ejecutar varios programas a la vez y no disminuya su eficiencia. Teniendo en cuenta este aspecto, se realizó una comparación con los softwares anteriormente mencionados y en cuanto a licencias, Siemens ofrece el paquete de licencia para estudiantes Solid Edge de forma gratuita.

2.2.2 *Facilidad de uso*

Elegir un software con un entorno de trabajo y una interfaz de usuario intuitiva, es determinante para ahorrar tiempo en el diseño. Un programa con comandos similares a los de software que se haya trabajado con anterioridad también permitirán ahorrar dinero. En este punto, Solidworks y SolidEdge ofrecen comandos de uso sencillo, sin embargo, con SolidEdge los procesos de modelado son más rápidos ya que los comandos son más sencillos de memorizar. De acuerdo a las requisiciones del proyecto es importante, según Lucas Leao “encontrar un software CAD que le provea una interfaz amigable y que posea todos los requerimientos que usted necesita para diseñar” (Leao, 2016).

2.2.3 *Eficiencia del diseño*

Se debe tener en consideración que la mayoría de software CAD ofrecen herramientas similares de diseño y simulación, sin embargo, contar con un computador decente mejorara el rendimiento y la calidad del proyecto, “si el propósito de su modelo es meramente representativo, entonces los requerimientos básicos serán suficientes para usted” (Leao, 2016).

2.2.4 *Presupuesto*

Siempre se desea encontrar el software que se ajuste a la necesidad del proyecto y esto implica su costo de adquisición, “el precio puede equivaler a la calidad, pero también depende de su necesidad de CAD, algunas veces, no necesita lo mejor. De acuerdo con la investigación, sólo el 80% de las características se utilizan con frecuencia, así que lo más importante es elegir un programa que satisfaga su necesidad. Algunos programas de CAD son excelentes, pero demasiado inasequibles, sólo pagar por lo que necesita es una manera para ahorrar el presupuesto” (Comunicae, 2015).

2.2.5 *Ayuda y soporte*

Lo que recomiendan los expertos es que el software que se seleccione para los proyectos brinde y garantice ayuda y soporte técnico para que, en caso de algún error, falla o uso de alguna herramienta que se tenga duda, se pueda consultar y solventar cualquier percance, “cuando hay

algunos problemas, debe considerar el soporte técnico, especialmente el soporte local. Considere un CAD que tenga un buen servicio postventa y un distribuidor poderoso que puede proporcionar un mejor soporte técnico local” (The Standard Cio, 2015).

Tabla 1
Resumen Criterios de Selección de Software

SELECCIÓN DE SOFTWARE						
SOFTWARE	UTILIZACION	ADQUISICIÓN	ASISTENCIA	PROCESAMIENTO	SIMULACIÓN	SELECCIÓN
PTC CREO	✗	✗	✗	✗	○	✗
ALTAIR SIMSOLID	✗	✗	✗	✗	○	✗
ANSYS	✗	○	○	✗	○	✗
SOLIDWORKS	✗	○	○	✗	○	✗
SOLID EDGE	○	○	○	○	○	○

Fuente: Autor.

En la tabla anterior se indican los ítems que se tuvieron en cuenta para seleccionar el software que se usó en este proyecto, a continuación, se explica cada ítem.

Utilización, sencillez del uso de las herramientas en el entorno de diseño y simulación del software. *Adquisición*, la licencia del software se puede adquirir legalmente o en versión libre completa. *Asistencia*, se encuentra ayuda y soporte técnico en sitios web, incluso tutoriales para el uso de herramientas del entorno gráfico. *Procesamiento*, velocidad del software en el procesamiento y mallado de los elementos modelados. *Simulación*, el entorno de simulación permite asignar magnitudes escalares y vectoriales como temperatura, presión y fuerza al elemento diseñado.

En la tabla comparativa presentada anteriormente, el software Solid Edge cumple con todos los criterios mencionados, siendo, por lo tanto, el que se usa en este proyecto. El entorno de simulación de este software permite que la estructura se pueda analizar a la temperatura ambiente promedio en la que estará expuesta, por lo que el análisis es mucho más cercano a la realidad y por ende la factibilidad del diseño.

2.3 Material estructural

La selección de materiales es de los principales aspectos que se tienen en consideración en un proyecto, ya que de estos depende en parte la calidad y el desarrollo del mismo, en

consecuencia, el control de calidad en la elección del material evitara fallos, riesgos o pérdidas en la construcción del proyecto, por ello es crucial que antes de hacer la selección de algún material se revisen sus características técnicas.

En el diseño y la construcción de estructuras rígidas portantes de cargas, las estructuras de acero poseen ventajas abismales respecto a otros materiales y formas de construcción. “La eficiencia del acero se basa en la fabricación de las piezas o secciones con la forma adecuada para resistir la compresión, la tensión o alguna otra solitud, además que el acero se fabrica bajo normas y estándares controlados que no permiten que exista una variedad entre cada pieza” (Gerdau Corsa, 2020).

2.3.1 El acero como material estructural

El acero es un material cuyas propiedades brindan la construcción de estructuras resistentes y de poco volumen, permitiendo que las estructuras sean mucho más ligeras que otras formas de construcción, posibilita la creación de casi todas las formas arquitectónicas posibles, la facilidad de su fabricación y otros aspectos hacen que se un material versátil. “El acero es una aleación, es decir una mezcla de hierro (Fe) y carbono (C) cuyo porcentaje de carbono debe ser inferior al 2%, el acero se puede alear con otros elementos como el cromo (Cr), manganeso (Mn), y el Níquel (Ni) con el fin de alcanzar otras propiedades, pero a estos aceros se les conoce como aceros aleados” (Gerdau Corsa, 2020).

Dentro de las ventajas del acero podemos encontrar las siguiente:

- La resistencia del acero por unidad de peso indica que las estructuras que se pueden construir son de menor peso.
- Soporta esfuerzos bastante altos, indicando su elevado grado de elasticidad.
- Si la estructura se construye con el acero adecuado esta puede durar una infinidad de tiempo, “investigaciones realizadas en los aceros modernos, indican que bajo ciertas condiciones no se requiere de ningún mantenimiento a base de pintura” (MCCormac y Csernak, 2012, p. 2).
- Puede ser sometido a grandes tensiones y no fallar, convirtiéndolo en un material con alta ductilidad, por ejemplo, cuando se sobre cargue una estructura, las deflexiones serán mayores y se puede observar la falla para corregirla.

- Se puede moldear y figurar de las formas que se requiera.
- Fácil desmonte de elementos y estructuras.
- Permite la unión de varios elementos por medio de soldadura y pernos.
- Es reciclable.

Por otro lado, el acero presenta las siguientes desventajas:

- Es un excelente conductor de calor, por lo que en situaciones donde se presenten incendios, debe protegerse, de lo contrario la estructura colapsara.
- Los aceros sufren corrosión al estar expuestos al aire y agua.
- En condiciones donde las cargas generen bajas temperaturas y fatiga, el acero es propenso a sufrir fatiga frágil.
- Su resistencia se puede reducir si se somete a un gran número de inversiones del sentido del esfuerzo, o bien, a un gran número de cambios en la magnitud del esfuerzo de tensión conocido como fatiga (MCCormac y Csernak, 2012, p. 4).

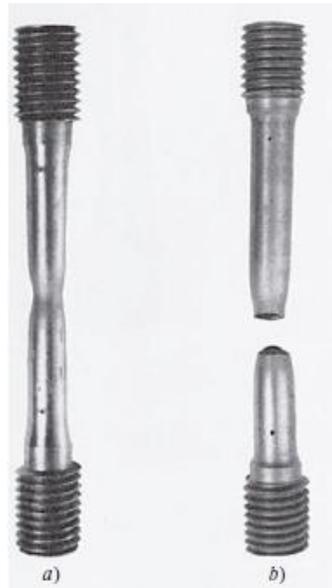
2.3.2 Relaciones esfuerzo-deformación

El diagrama esfuerzo-deformación representa gráficamente el comportamiento de un material que está sometido a alguna fuerza de deformación, este diagrama representa información preciada necesaria para comprender el comportamiento en este caso del acero. Estos diagramas presentan características comunes para dividir los materiales en dúctiles y frágiles. “Los materiales dúctiles, como el acero estructural, así como muchas aleaciones de otros metales, se caracterizan por su capacidad de fluir a temperaturas normales” (Beer, Johnston, DeWolf y Mazurek. 2017, p. 53).

En la imagen 10 se tienen dos probetas que fueron sometidas a pruebas, a) muestra la probeta con reducción de su sección transversal (zona de estricción), b) la figura muestra la probeta fracturada.

Figura 10

Probetas de material dúctil sometidas a ensayo

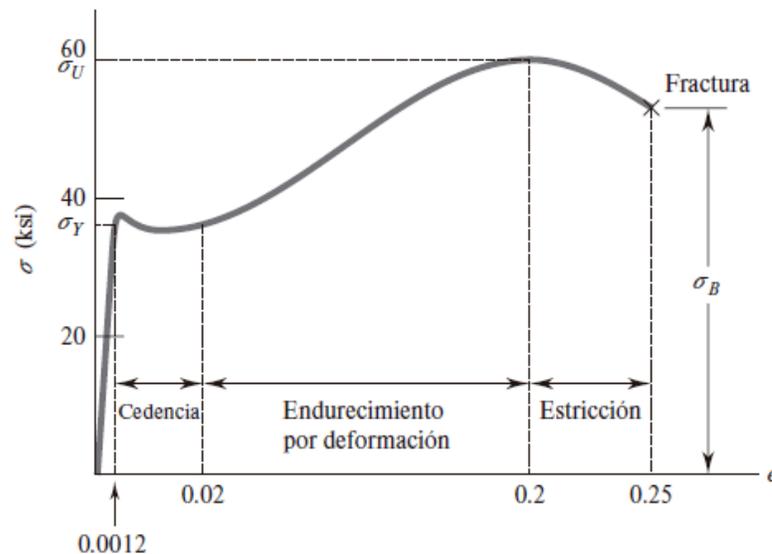


Fuente: Beer, J. D. (2017). *Mecánica de Materiales*. McGraw-Hill Global Education.

Para explicar el diagrama esfuerzo-deformación de forma clara, en el libro *Mecánica de Materiales* (Beer, Johnston, DeWolf y Mazurek. 2017, p. 53), se somete una probeta de material dúctil a tensión en donde al incrementar la carga, su longitud va en aumento ver figura 10, lo que se explica en el diagrama esfuerzo-deformación como la línea recta, luego cuando alcanza el punto de esfuerzo crítico σ_y ver figura 111, la probeta experimenta una deformación elevada, “se explica que esta deformación es causada por el deslizamiento del material lo largo de superficies oblicuas y se debe sobre todo a esfuerzos cortantes” (Beer, Johnston, DeWolf y Mazurek. 2017, p. 53).

Figura 11

Diagrama esfuerzo-deformación de acero al bajo carbono



Fuente: Beer, J. D. (2017). *Mecánica de Materiales*. McGraw-Hill Global Education.

Después de alcanzar un punto máximo la probeta empieza a disminuir su diámetro llegando a la zona de estricción y luego a la fractura. En la figura 10 se puede observar como la fractura que sufre la probeta tiene una forma de cono con un ángulo de al menos unos 45° , indicando que “bajo una carga axial, los esfuerzos cortantes son máximos en las superficies que forman un ángulo de 45° con la carga” (Beer, Johnston, DeWolf y Mazurek. 2017, p. 53). En el punto σ_Y es el esfuerzo en el que comienza la fluencia que se conoce como cedencia del material. El esfuerzo σ_U se conoce como resistencia última y el esfuerzo σ_B se conoce como la fractura del material y se denomina resistencia a la fractura.

2.3.3 Aceros estructurales modernos

Los aceros estructurales modernos se consiguen al variar las cantidades de carbono y añadiendo elementos como manganeso, níquel, cobre o silicio, denominados aceros aleados y su composición química determina propiedades como resistencia a la corrosión, resistencia a la fractura frágil, soldabilidad entre otras. La ASTM “International (Sociedad Americana Para Pruebas y Materiales) es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas más grandes del mundo. En ASTM se reúnen productores, usuarios y consumidores, entre otros, de

todo el mundo, para crear normas de consenso voluntarias” (Asociación Española para la Calidad, s.f.). Estas normas son usadas y aprobadas mundialmente, abarcan áreas como metales, pinturas, productos electrónicos, plásticos, dispositivos, servicios médicos.

La ASTM determinan específicamente los porcentajes máximos de carbono, silicio, manganeso y otros elementos que se permiten en los aceros estructurales. La “ASTM E8/E8M es un estándar que describe específicamente las propiedades del metal, como el límite elástico, el alargamiento del punto límite, la resistencia a la tracción, el alargamiento y la reducción de área” (Organos de Palencia, 2021). Dentro de la ASTM están clasificados varios aceros que están incluidos en la AISC (Instituto Americano de la Construcción en Acero).

2.3.4 Tipos de aceros

2.3.4.1 Aceros de alta resistencia y baja aleación. Estos aceros presentan mayor resistencia a la corrosión atmosférica que otros aceros al carbono, su resistencia se debe a que en su fabricación se agregan otros elementos adicionales al carbono y manganeso como el cromo, vanadio, níquel y cobre. “Se incluyen aceros con esfuerzos de fluencia comprendidos entre 40 klb/plg² y 70 klb/plg²” (McCormac y Csernak, 2012, p. 21). Recordemos que el esfuerzo de fluencia se refiere al esfuerzo máximo que un material puede soportar sin causar deformación plástica. “Este elemento se utiliza ampliamente en la producción de tubos, carrocerías para automotores y naves aeroespaciales, líneas ferroviarias y placas de ingeniería estructural terrestre y marítima” (Aceropedia, s.f.).

2.3.4.2 Aceros estructurales de alta resistencia, baja aleación y resistentes a la corrosión atmosférica. Para conseguir aceros resistentes a la corrosión, se alean con pequeños porcentajes de cobre, cuando el acero se expone a la atmósfera se les forma una película protectora conocida como “capa de óxido” que evita que el acero sea pintado y lo protege de que se siga oxidando. “Después de que ocurre este fenómeno (en un periodo de 18 meses a 3 años, depende del tipo de exposición, por ejemplo, rural, industrial, luz solar directa o indirecta, etc.), el acero adquiere un color que va del rojo oscuro al café y al negro” (McCormac y Csernak, 2012, p. 21). Se dice que en 1933 se desarrolló por primera vez este tipo de acero, creado por la Corporación de Acero Estadounidense para darle mayor resistencia a los carros

de ferrocarril que cargaban carbón donde debían soportar elevada corrosión. Se usa en la fabricación de torres eléctricas, puentes y estructuras difíciles de pintar. “No son apropiados para usarse en lugares donde queden expuestos a brisas marinas, nieblas o que estén continuamente sumergidos en agua (dulce o salada) o el suelo, o donde existan humos industriales muy corrosivos. Tampoco son adecuados en áreas muy secas” (MCCormac y Csernak, 2012, p. 21).

2.3.4.3 Aceros al carbono. Este tipo de acero es mucho más duro y resistente, sin embargo, su ductilidad, elongación, flexibilidad y soldabilidad disminuyen. Por sus características es de gran uso en construcciones, “por ejemplo, la barra de acero al carbono está laminado en caliente y es fácil de fabricar, con esta forma se realizan actividades como soldar, cortar, formar y mecanizar con el equipo de manera sencilla” (Aceromafe, s.f.). Los aceros al carbono contienen los siguientes porcentajes máximos: 1,7% carbono, 1,65% manganeso, 0,60% silicio y 0,60% de cobre, dependiendo del porcentaje de carbono se dividen en cuatro, “los que contienen porcentajes menores al 0,15%, Acero dulce 0,15% al 0,29% incluidos los aceros estructurales al carbono, acero medio al carbono 0,30 % a 0,59% y el acero con alto contenido de carbono del 0,60% al 1,70%” (MCCormac y Csernak, 2012, p. 21).

2.3.5 Cargas estructurales

Uno de los retos más importantes que tiene un diseñador, es conocer con exactitud las cargas a las que estará sometida la estructura que diseña durante su vida útil. Las cargas se clasifican de acuerdo con, la duración de su aplicación y a su naturaleza.

2.3.5.1 Cargas muertas. Son cargas cuya magnitud es constante y se mantienen fijas, como por ejemplo el mismo peso de la estructura o también cargas adheridas a ella. “Para diseñar una estructura es necesario estimar los pesos o cargas muertas de las diversas partes que van a usarse en el análisis. Las dimensiones y pesos exactos de las partes no se conocen hasta que se hace el análisis estructural y se seleccionan los miembros de la estructura” (MCCormac y Csernak, 2012, p. 41). La estructura que en este proyecto se desea diseñar debe soportar una carga muerta de aproximadamente 40 toneladas, que corresponde al peso de una barcaza.

2.3.5.2 Cargas vivas. También denominadas cargas móviles, hacen referencia a vehículos de carga como tracto camiones, grúas entre otros, dentro de estas cargas se dice que el ingeniero diseñador debe considerar las cargas de piso, cargas de tránsito en puentes, cargas de impacto y cargas longitudinales. “Las cargas vivas son todas las cargas gravitacionales probables u ocasionales que son resultado del uso de la estructura, cuya manifestación es temporal, variable en intensidad y cambiante por su ubicación” (E-construir, s.f.).

2.3.5.3 Cargas ambientales. Causadas como su nombre lo indica, por factores ambientales, como la lluvia, cambios de temperatura, el viento y los sismos, pueden considerarse cargas vivas, sin embargo, no todas son causadas por la gravedad o condiciones de operación, como si ocurre con otras cargas vivas. Las cargas de viento, por ejemplo, a ciencia cierta son difíciles de analizar o predecir, debido a que cambian dependiendo la ubicación geográfica, los tipos de terreno o las alturas sobre el nivel del terreno, sin embargo.

2.3.6 Estructuras de acero

Las estructuras de acero son sistemas estables cuyo propósito es el de soportar cargas y fuerzas. En el diseño de estructuras de acero se deben considerar varios factores, no solo se deben tener presente los cálculos, las cargas que soportara la estructura, las propiedades de los materiales, selección de los materiales, también se debe tener presente los costos de fabricación, el costo de mano de obra, por ejemplo, “en montajes y fabricación se dice que ronda el 60% de los costos totales de las estructuras de acero, mientras que el costo de los materiales solo el 25%” (MCCormac y Csernak, 2012, p. 32).

En ingeniería se pueden considerar tres categorías amplias de estructuras: Armaduras, armazones y maquinas. Como armaduras se consideran a las estructuras que soportan cargas estacionarias y se encuentran restringidas, es decir ningún elemento está sujeto a varias fuerzas; las armazones y maquinas tienen en común que alguno de sus elementos está sujeto a varias fuerzas; las maquinas por ejemplo están diseñadas para cambiar y modificar fuerzas. En la actualidad se pueden encontrar cinco tipos de armazones usadas en la construcción de edificaciones, puentes y grúas, estas son las estructuras trianguladas, entramadas, laminares, colgantes, geodésicas y abovedadas, los dos primeros tipos de estructuras mencionadas, son por

lo general usadas en puentes y grúas por su configuración para soportar cargas muertas, vivas y ambientales, a continuación, se mencionan con más detalle.

2.3.6.1 Estructuras trianguladas. Son estructuras que usan formas triangulares repetidas para conseguir una estructura indeformable, “estructuras formadas por elementos lineales de poca sección denominadas barras que crean superficies estructurales planas o tridimensionales mediante la repetición de formas triangulares” (Búa, s.f.). Su uso se da en la construcción de puentes y naves industriales, “hay dos formas que son las más utilizadas, la cercha y la celosía” (Unacaracterística, s.f.). La rigidez de este tipo de estructura se logra gracias a que el triángulo es el único polígono que al someterse a una fuerza no se deforma, “Las estructuras de armazón trianguladas (puentes, grúas o cubiertas de edificios cerchas), basan su rigidez ante las cargas gracias a la triangulación de sus elementos” (Búa, s.f.).

2.3.6.2 Estructuras entramadas. Se caracterizan por usar elementos verticales y horizontales para equilibrar el peso de la estructura, empleando vigas, columnas y cimientos, su uso más frecuente se da en edificaciones, “estas estructuras son más ligeras porque emplean menos elementos que las abovedadas por ejemplo y así pueden conseguirse edificios de gran altura” (Unacaracterística, s.f.). Las estructuras abovedadas se usan principalmente en la construcción de techos parabólicos, arcos y bóvedas. En la figura 12 se muestra la configuración de una estructura de acero entramada, vigas, columnas y cimentación, elementos característicos de este tipo de estructura.

Figura 12

Estructura entramada de una edificación de cuatro plantas



Fuente: Unacaracteristica. (s.f.). *Estructuras metálicas: ¿Qué son?, características, importancia y otros.* <https://unacaracteristica.com/estructuras-metalicas>

2.3.7 Fallas en estructuras

En la actualidad se usan computadores para el diseño y el análisis de estructuras, y es que los cálculos de estructuras, conllevan mucho tiempo de trabajo, por lo que, al ingeniero o diseñador, los softwares de diseño le permiten incluso realizar los cálculos en menos tiempo y con mayor precisión, en el desarrollo de este proyecto se usara el software Solid Edge.

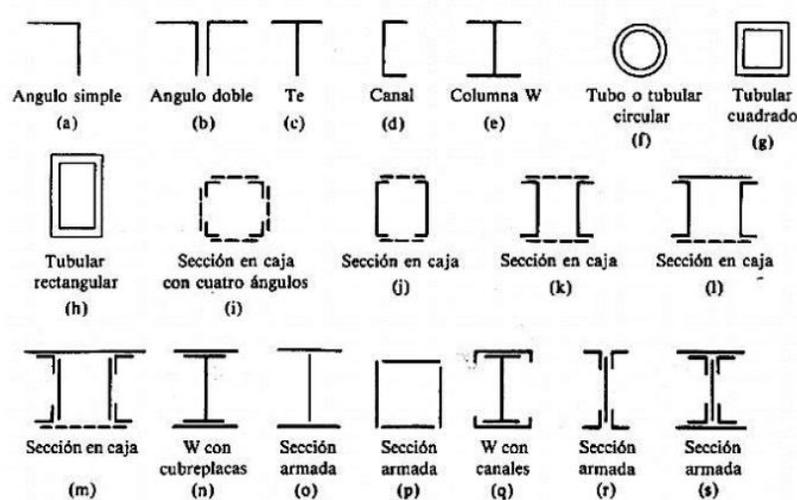
Las fallas estructurales se dan por lo general porque el ingeniero o diseñador no presta atención adecuada a las deflexiones, posibilidad de pandeo de miembros en compresión o de los patines de compresión de vigas, también es cierto que muchas veces los cálculos pueden fallar, ya que los métodos de análisis se basan en hipótesis, por otro lado, las cargas son aproximadas y la resistencia de los materiales pueden variar. En su libro, *Diseño de Estructuras de Acero*, Jack McCormac menciona que, “el colapso de las estructuras se debe generalmente a una falta de atención a los detalles de las conexiones, deflexiones y problemas de montaje” (McCormac y Csernak, 2012, p. 36).

2.3.8 Perfiles para vigas y columnas de acero

Las columnas como las vigas, son elementos estructurales comunes en cualquier estructura de soporte de cargas, las columnas de acero pueden ser sencillas, fabricadas directamente con perfiles estructurales, empleadas como elementos únicos, o de perfiles compuestos, para los cuales se usan diversas combinaciones, como las viguetas. “La columna redonda de tubo de acero generalmente lleva la parte donde la fuerza axial o la fuerza excéntrica es pequeña, y la columna de tubo de acero en forma de caja puede tener una sección transversal más grande en una dirección, lo que determina que se puede utilizar en un lugar donde la fuerza excéntrica es grande” (Baoding Heb Construction Engineering, s.f.).

Figura 13

Perfiles usados para vigas y columnas en estructuras de acero



Fuente: Amador, J. L. (s.f.). *Columnas*. http://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/22_columnas.pdf

2.3.9 Conexiones soldadas

La soldadura es un proceso en el que se unen dos o más piezas en su mayoría de metal, existen distintos tipos de soldadura dependiendo el material y su aplicación. “La soldadura es un proceso en el que se unen partes metálicas mediante el calentamiento de sus superficies a un estado plástico o fluido, permitiendo que las partes fluyan y se unan (con o sin la adición de otro metal fundido)” (McCormac y Csernak, 2012, p. 468). Las especificaciones y

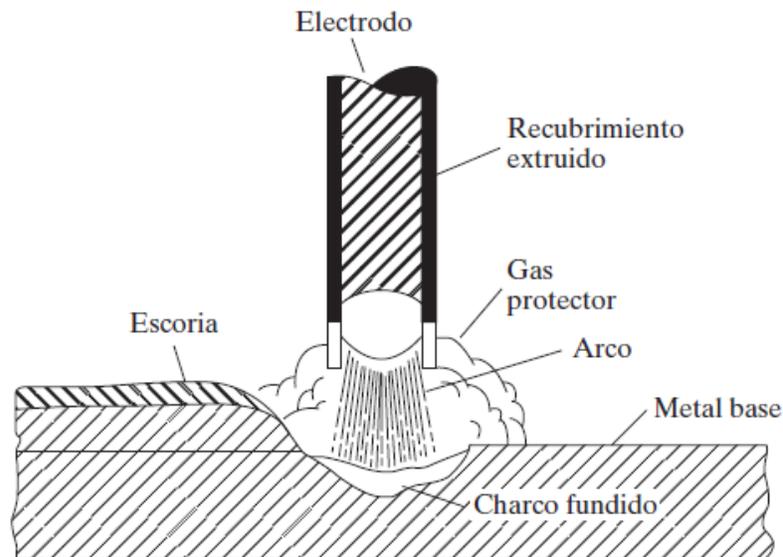
requerimientos para aplicación de soldadura están reguladas por la AWS (American Welding Society) Sociedad Americana de Soldadores, facilitando y mejorando la calidad de los procesos de soldadura.

Actualmente dentro de las ventajas de aplicación de soldadura están las siguientes:

- Permite que las uniones se realicen con menos elementos y las estructuras sean más ligeras.
- Las estructuras soldadas son más rígidas, por lo que los elementos están unidos el uno con el otro directamente.
- Es mucho más fácil conectar varios elementos con soldadura que usando tornillos y remaches.
- Fusionar los elementos al soldarlos hace que las estructuras se mantengan continuas, en una sola pieza.
- Los montajes en obra y fabricación requieren menos tiempo de ensamble.

La soldadura por arco eléctrico se aplica mediante una barra de metal conocida como electrodo que se funde uniendo los elementos que se desean juntar, es un proceso mucho más ágil que los demás, cuando se usa soldadura por gas como la soldadura oxiacetilénica, se quema una mezcla de oxígeno con acetileno mediante una boquilla, esta se usa más en soldadura estructural. “La flama producida puede utilizarse tanto para corte de metales como para soldar” (McCormac y Csernak, 2012, p. 472).

Este tipo de soldadura se usa con más frecuencia en reparaciones y mantenimientos no tanto para fabricación o montajes de estructuras de acero. En la soldadura por arco con electrodo revestido se forma un arco eléctrico entre las piezas que se van a soldar, el electrodo se sostiene con una especie de pinza o maneral generando la fusión. En el proceso de soldadura la selección de electrodos es vital para garantizar la resistencia, ductilidad y la resistencia a la corrosión de la soldadura, la selección del electrodo depende del metal y la cantidad de material que se necesita depositar y la posición. “Los electrodos se dividen en dos clases generales: los electrodos con recubrimiento ligero y los electrodos con recubrimiento pesado” (McCormac y Csernak, 2012, p. 473).

Figura 14*Elementos del proceso de soldadura por arco metálico protegido*

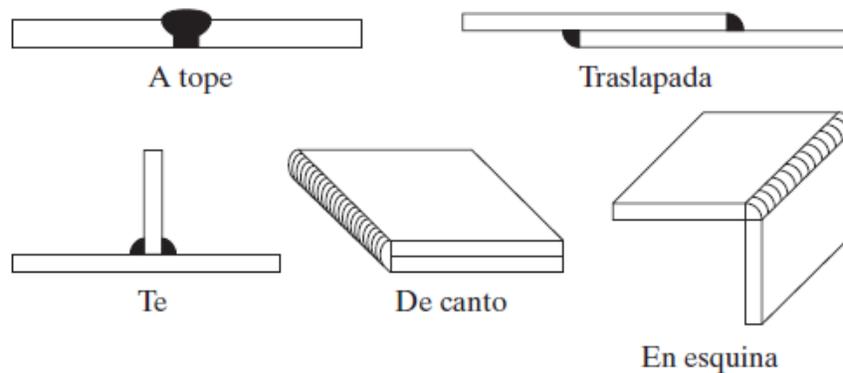
Fuente: McCormac, J., y Csernak, S. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero*. Alfaomega Grupo Editor S.A.

Los electrodos usados en soldadura estructural son los electrodos con recubrimiento pesado, proporcionan una unión más resistente a la corrosión y más dúctil, usar este tipo de electrodo genera escoria sobre el cordón de soldadura, por el contrario, los electrodos de recubrimiento ligero no protegen de la corrosión. En la soldadura por arco sumergido (SAW), se usa material granular sobre el arco el cual se funde uniendo las estructuras, “las soldaduras hechas con el proceso SAW (automático o semiautomático) son consistentemente de alta calidad y son muy adecuadas para cordones largos de soldadura. Una desventaja es que el trabajo debe posicionarse para un soldado casi plano u horizontal” (McCormac y Csernak, 2012, p. 474). La soldadura de arco por núcleo fundente, por sus siglas (FCAW), es otro tipo de soldadura que se usa y consiste en cargar un tubo de acero con fundente alimentado desde un carrete. “Los procesos aceptados por la Especificación 1.3.1 del AWS son: 1) soldadura por arco metálico protegido (SMAW), 2) soldadura por arco sumergido (SAW), 3) soldadura de arco metálico con gas (GMAW), y 4) soldadura de arco con núcleo fundente (FCAW). El proceso SMAW es el proceso usual que se aplica para soldadura manual, mientras que los otros tres son generalmente automáticos o semiautomáticos” (McCormac y Csernak, 2012, p. 475).

2.3.9.1 Posición y tipos de juntas. Según el tipo de junta que se desee en la estructura, Los tipos de juntas también se pueden clasificar, ver figura 15; encontramos la soldadura traslapada, a tope, en te, de canto y en equina. Según la posición en que se aplique la soldadura, encontramos soldaduras planas que son las más usadas y económicas o las soldaduras sobre cabeza, esta última es más costosa y requiere de los mejores soldadores para su aplicación.

Figura 15

Tipos de uniones o juntas con aplicación de soldadura



Fuente: McCormac, J., y Csernak, S. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero*. Alfaomega Grupo Editor S.A.

2.3.10 Protección del acero

Uno de los principales problemas que afrontan las estructuras de acero es la corrosión, que se da por las condiciones ambientales a las que se someten las estructuras y al paso del tiempo, para ello es indispensable protegerlas con recubrimientos o pinturas adecuadas. La selección del recubrimiento adecuado para el tipo de acero se puede hacer siguiendo la norma ISO12944:2018, “instrumento que sirve como guía en la elección de los recubrimientos” (Pintuco, 2022). Esta norma contiene los lineamientos para la protección de metales como el acero al carbono y acero galvanizado, con pinturas y recubrimientos disponibles en el mercado.

3. Validación y evaluación

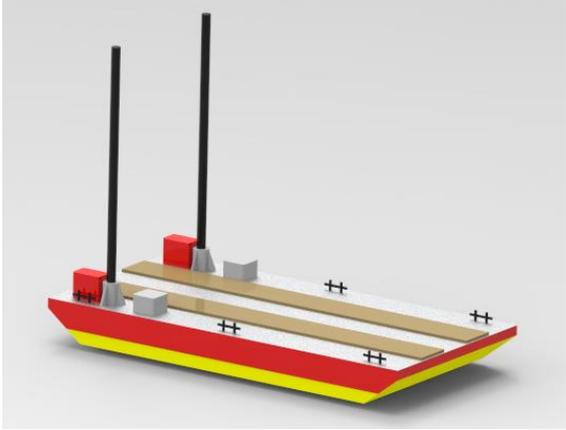
3.1 Diseño estructural soporte de barcaza

3.1.1 Características técnicas de la barcaza

La estructura que se desea diseñar, debe soportar cargas ambientales y una carga muerta que corresponde al cuerpo de una barcaza con las siguientes características técnicas:

Tabla 2

Características Técnicas de la Barcaza Objeto de Estudio

BARCAZA CON SISTEMA HIDRÁULICO DE IZAJE PARA PUNTALES DE APOYO		
 <p>Representación gráfica del Equipo</p>	FABRICANTE	ANFEG
	ESLORA	16m
	MANGA	8m
	PUNTAL	1,55m
	CALADO	0,3m
	CASCO	ACERO NAVAL
	CAPACIDAD	120T
	COLOR	GRIS - ROJO
	ORIGEN	CHINO

Fuente: Autor.

En la tabla anterior se muestran las características técnicas de la barcaza que se tuvo en cuenta para el diseño y la simulación de la estructura que se desarrolla en este trabajo, una barcaza de este tipo tiene un peso muerto aproximado de 40 toneladas, estas barcasas cuentan con un sistema hidráulico de izaje para los puntales de apoyo.

3.1.2 Centro de gravedad y centroide

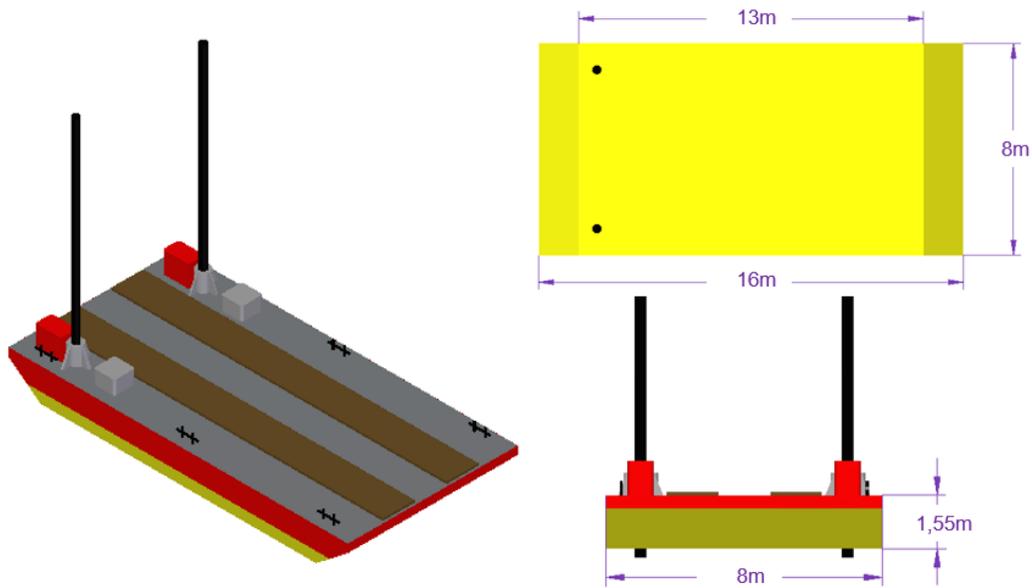
La atracción ejercida por la tierra sobre un cuerpo rígido se representa por una sola fuerza W , llamada peso del cuerpo y se aplica en el centro de gravedad del cuerpo. En un cuerpo

que sea simétrico y homogéneo, la resultante de sus fuerzas gravitatorias se encuentra en el centro geométrico de este; el centroide por otro lado es un concepto geométrico dependiendo la geometría del cuerpo. Conocer el centro de gravedad de una barcaza es importante para conocer su efecto sobre la estabilidad de la embarcación.

La superficie con la que la estructura que se diseñó está en contacto con el casco de la barcaza es de 104 m^2 , la figura 16 muestra la vista inferior y posterior de la barcaza, las cotas están dadas en metros y corresponden a las dimensiones del casco de la embarcación que debe soportar la estructura diseñada ver.

Figura 16

Superficie de contacto del casco de la barcaza con la estructura diseñada



Fuente: Autor.

El centro de gravedad para un cuerpo con un peso W está dado por la siguiente expresión:

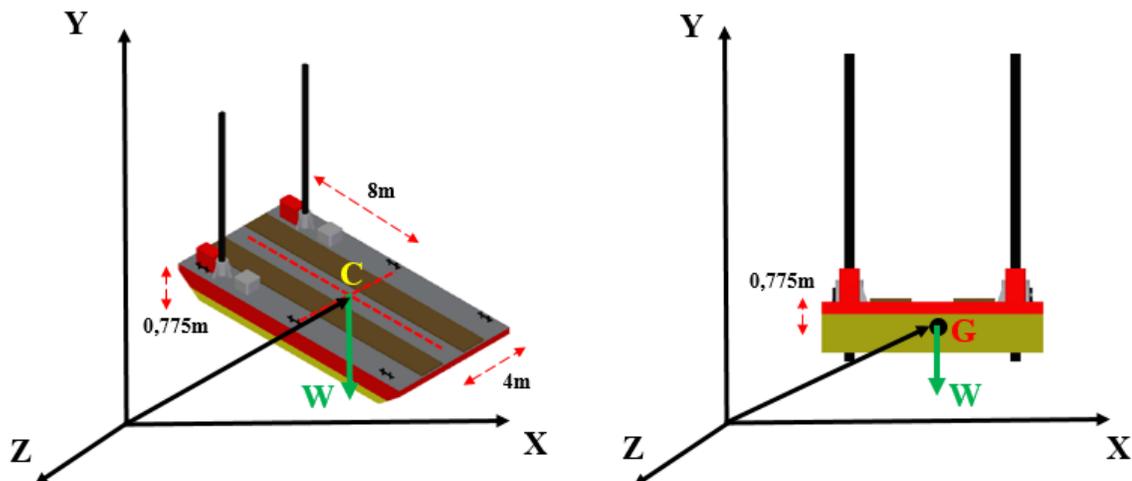
$$\begin{aligned}\bar{X} \sum W &= \sum \bar{x}W \\ \bar{Y} \sum W &= \sum \bar{y}W \\ \bar{Z} \sum W &= \sum \bar{z}W\end{aligned}\quad (\text{Ec. 1})$$

$$\bar{X} = \frac{\sum \bar{x}W}{\sum W}, \bar{Y} = \frac{\sum \bar{y}W}{\sum W}, \bar{Z} = \frac{\sum \bar{z}W}{\sum W}$$

Sin embargo, el centro de gravedad se sitúa en el mismo vértice del centroide para dar estabilidad a la embarcación, “para que se dé la condición de equilibrio se debe cumplir que C y G se encuentren en la misma vertical con el buque en la condición de adrizado” (Escolaport, s.f.), en este caso W equivale al producto entre la masa de la carga muerta (barcaza) 40.000 kg y el valor de la fuerza de gravedad $9,81m/s^2$ equivalente a 392.400 N.

Figura 17

Ubicación en el plano cartesiano de la barcaza objeto de análisis



Fuente: Autor.

En este caso se calcula el volumen de un paralelepípedo para una mayor precisión en la determinación del centroide del cuerpo. El centroide de un volumen está dado por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\bar{X} \Sigma V &= \Sigma \bar{x}V \\ \bar{Y} \Sigma V &= \Sigma \bar{y}V \\ \bar{Z} \Sigma V &= \Sigma \bar{z}V\end{aligned}\quad (\text{Ec. 2})$$

$$\bar{X} = \frac{\Sigma \bar{x}V}{\Sigma V}, \bar{Y} = \frac{\Sigma \bar{y}V}{\Sigma V}, \bar{Z} = \frac{\Sigma \bar{z}V}{\Sigma V}$$

Teniendo en cuenta las dimensiones del cuerpo de la barcaza, a continuación, se indican las coordenadas para ubicar el centroide del cuerpo:

Tabla 3

Volumen y Ubicación de Puntos del Centroides de la Barcaza

V, m^3	\bar{x}, m	\bar{y}, m	\bar{z}, m	$\bar{x}V, m^4$	$\bar{y}V, m^4$	$\bar{z}V, m^4$
198,4	8	0.775	4	1587.2	153.76	793.6

Fuente: Manosalva, A. (2022).

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{\Sigma \bar{x}V}{\Sigma V} = \frac{1587.2}{198.4} = 8m \\ \bar{Y} &= \frac{\Sigma \bar{y}V}{\Sigma V} = \frac{153.76}{198.4} = 0.775m \\ \bar{Z} &= \frac{\Sigma \bar{z}V}{\Sigma V} = \frac{793.6}{198.4} = 4m\end{aligned}$$

En la figura 17 se ubica gráficamente el centroide de la barcaza, con los puntos hallados en las expresiones anteriores.

3.1.3 Equilibrio de cargas

Para diseñar los elementos de la estructura, primero se deben conocer la carga o cargas a las que será sometida en diferentes puntos de su longitud, sin embargo en este caso el peso muerto de la barcaza está distribuido a lo largo de la superficie del casco que está en contacto con el suelo.

El balance de fuerzas y momentos en un cuerpo es indispensable para que este no se mueva a lo largo de una trayectoria, pero tampoco gire. Matemáticamente estas condiciones se describen con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\sum F &= 0 \\ \sum M_o &= 0\end{aligned}\tag{Ec. 3}$$

Dónde: $\sum F$ = Suma de todas las fuerzas que afectan al cuerpo.
 $\sum M_o$ = Suma de los momentos de todas las fuerzas.

El equilibrio del cuerpo puede especificarse mediante solo tres ecuaciones escalares de equilibrio que son:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= U \\ \sum M_o &= 0\end{aligned}\tag{Ec. 4}$$

Dónde: $\sum F_x$ = Suma de todas las fuerzas que afectan al cuerpo en el eje X.
 $\sum F_y$ = Suma de todas las fuerzas que afectan al cuerpo en el eje Y.
 $\sum M_o$ = Suma de los momentos de todas las fuerzas.

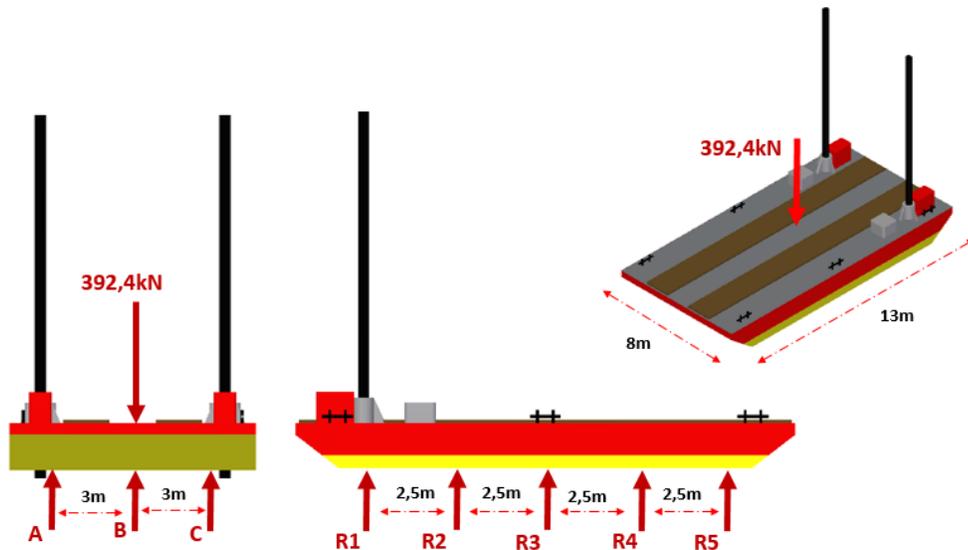
3.1.4 Modelado y análisis de reacciones

Se determinan las reacciones considerando la carga distribuida del cuerpo a lo largo del área de contacto. El área de contacto entre la estructura y la barcaza corresponde a 104 m^2 , resultado del producto de la base 13m por la altura 8m. El peso de la barcaza 392.400N corresponde al producto de su masa 40.000kg por la fuerza de gravedad $9,81\text{ m/s}^2$. De este modo como el peso está distribuido por el área mencionada, la estructura debe soportar por m^2 un peso de 3773.1N. En la figura 18 se muestran los puntos de apoyo para soportar la barcaza

y así comprender mejor el análisis de la estructura que se diseña, las reacciones sin resolver corresponden a los apoyos que debe suministrar la estructura de soporte de la barcaza.

Figura 18

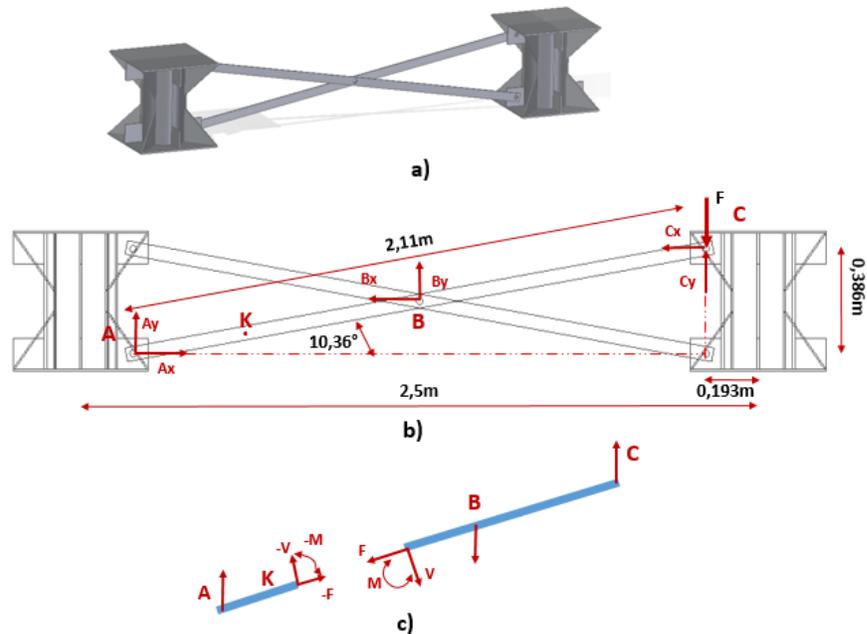
Diagrama de cuerpo libre de las reacciones sin resolver de la estructura



Fuente: Autor.

La estructura está conformada por 15 soportes tubulares, cada uno de ellos distribuido como se muestra en la figura 18, conectados entre sí mediante platinas y pernos para dar estabilidad y armonía a la estructura. Como se menciona anteriormente, por cada metro cuadrado se debe soportar un peso de 3773,1N, ahora bien, el área de contacto es de $104m^2$ por lo que cada soporte estará a cargo de $7m^2$ (se usan 15 soportes en total), lo que significa una carga de 26,5kPa aproximadamente.

3.1.4.1 Elementos de conexión estructurales. La estructura además de los soportes tubulares mencionados anteriormente, se componen de elementos que conectan cada soporte mediante platinas de acero y pasadores, garantizando la estabilidad y rigidez de la estructura, en la figura 19 se muestra una de las secciones. En el análisis de una de las platinas de conexión, tomamos las reacciones en cada uno de los puntos para determinar la fuerza cortante interna resultante en la sección determinada a partir de las ecuaciones de equilibrio.

Figura 19*Elementos de conexión entre soportes y diagrama de cuerpo libre*

Fuente: Autor.

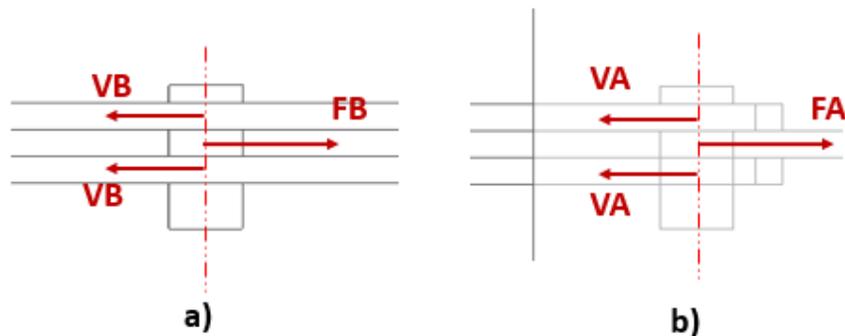
Se toma el elemento ABC en el punto K y se obtienen las dos partes que se observan en la figura 19 numeral c), las fuerzas internas en K se representan por un sistema fuerza-par equivalente, determinado al calcular el equilibrio de cualquiera de las partes.

$$\begin{aligned} \sum_{+} M_A &= 0; \\ -26,412kN(2,11m) + M &= 0 \\ M &= 55,7kN \cdot m \\ \sum F_x &= F - 26,412kN \cdot \cos(10,36^\circ) = 0 \\ F &= 26kN \\ \sum F_y &= -V + 26,412kN \cdot \sin(10,36^\circ) = 0 \\ V &= 4.75kN \end{aligned}$$

Las fuerzas internas en k son equivalentes a un par M, una fuerza F y una fuerza cortante V, el sistema fuerza-par actúa sobre la parte KBA es igual y opuesto; los pernos de la estructura están sometidos a cortante doble, en a) el perno está sometido a un efecto tijera ver figura 20.

Figura 20

Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el pasador



Fuente: Autor.

La selección del diámetro de los pasadores se determinó usando la siguiente expresión:

$$\tau_{prom} = \frac{V}{A} \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde: τ_{prom} = Esfuerzo cortante promedio en la sección que se supone igual en cada punto situado en la sección.

V= Fuerza cortante interna resultante en la sección determinada a partir de las ecuaciones de equilibrio.

A= Área en la sección.

$$\begin{aligned} \tau_{prom} &= \frac{V}{2 \cdot A} \\ 2 \cdot A &= \frac{V}{2 \cdot \tau_{prom}} \\ 2 \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) &= \frac{4,75kN}{723MPa} \\ d &= \sqrt{\frac{4,75kN}{\left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot 723MPa}} = 0,0025m \end{aligned}$$

Los tornillos ASTM A-325 ofrecen la resistencia expresada en el cálculo anterior, en el mercado se consiguen de 1/2" por sus propiedades mecánicas, además este tipo de tornillos no requiere de recubrimientos ya que el material en que se fabrica es resistente a la oxidación ambiental.

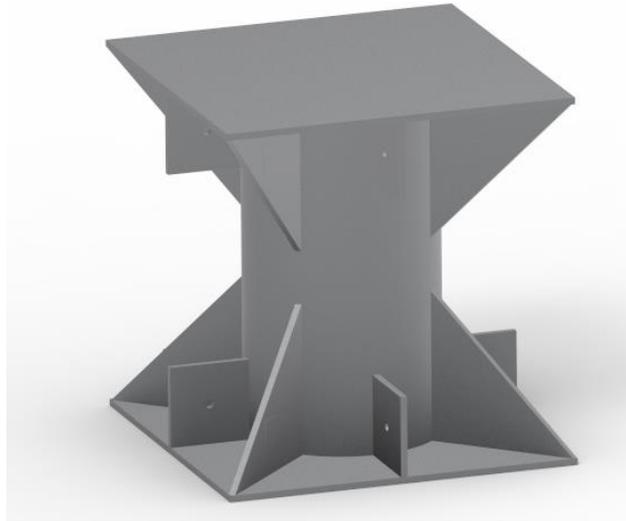
3.2 Modelado y diseño estructural del soporte para barcazas

En el diseño estructural se establece que la estructura debe estar conformada por elementos de soporte y elementos que conecten los soportes entre sí para garantizar la estabilidad del cuerpo de la estructura. Con el fin de proporcionar una estructura ligera en cuanto al peso de cada elemento que para los soportes no superan los 100 kg cada unidad, se pensó también en su facilidad de transporte, fabricación, acceso a materiales y mano de obra.

Por otro lado, de acuerdo con, información consultada en varias fuentes de información, se propone usar perfiles tubulares circulares teniendo en cuenta su resistencia a la compresión y tracción, resistencia a la corrosión, estabilidad y estética. Este tipo de perfil es más resistente en comparación otros tipos como por ejemplo el rectangular o los perfiles abiertos, “Las secciones cerradas huecas, especialmente las circulares, tienen la sección transversal más eficaz para resistir los momentos torsores, porque el material está uniformemente distribuido alrededor del eje polar, el módulo de torsión de los perfiles de sección tubular es de 200 a 300 veces mayor que el de los perfiles de sección abierta” (Instituto Tecnico de la Estructura en Acero, s.f., p. 8). En la figura 21 se muestra el modelado 3D de un soporte tipo 3 (definido así por el autor), el render del elemento diseñado se realiza en el entorno KeyShot, las dimensiones del elemento se pueden ver en la figura 28.

Figura 21

Vista isométrica del modelado 3D de uno de los soportes usados en la estructura



Fuente: Autor.

Se dice que los perfiles tubulares son más resistentes a la corrosión debido a que sus esquinas son redondeadas, en comparación con perfiles con esquinas cuadradas o perfiles abiertos, “las estructuras basadas en perfiles tubulares tienen entre el 20 al 50% menos superficie a proteger que las estructuras comparables hechas mediante el uso de secciones abiertas” (Instituto Técnico de la Estructura en Acero, s.f., p. 12). Las estructuras construidas con perfiles tubulares se consideran más espaciales y limpias, por lo que estéticamente se ven bien y cumplen su propósito. Por otro lado, el proceso de soldadura en este tipo de perfiles se puede realizar sin problemas. Al unir el perfil tubular con placas de acero en los extremos y reforzarlas en sus esquinas se garantiza mayor rigidez del elemento.

3.2.1 Elementos de soporte

Los elementos principales de la estructura que soportan barcazas, son los soportes, que consisten en una configuración de un perfil tubular circular de acero al carbón ASTM A106/ASME SA106, reforzado con planchas y platinas de acero ASTM A-36 en la parte superior, inferior y laterales, con un espesor de 3/8 de pulgada; en la figura 22 se indican las propiedades mecánicas, como resistencia a la tracción y límite elástico del acero ASTM A106,

la tubería fabricada con acero grado B es asequible en el mercado y es muy usada en la fabricación de estructuras de alta resistencia.

Figura 22

Resistencia a la tracción y límite elástico del acero ASTM A106 Grado A, B y C

Mechanical Properties			
Grade	Grade A	Grade B	Grade C
Tensile strength, min, psi	48000 [330]	60 000 [415]	70 000 [485]
Yield strength, min, psi [MPa]	30 000 [205]	35 000 [240]	40 000 [275]

Fuente: Steel, Octal. (s.f.). *Especificación de tubería ASTM A106 grado b.* <https://www.octalsteel.com/astm-a106-grade-b-pipe>

La tubería de acero al carbón, es usada con frecuencia en la industria de la construcción y petrolera para transmisión de petróleo y gas. “La tubería ASTM A106 Grado B es equivalente a ASTM A53 Grado B y API 5L B en cuanto a composición química y propiedades mecánicas, en general, uso de acero al carbono y resistencia a la rotura mínima de 240 MPa, resistencia a la tracción de 415 Mpa” (Octal Steel, s.f.). En este proyecto se escogió este tipo de tubería, teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas y además que en la zona donde se presenta la problemática a solucionar en este proyecto, se encuentra con facilidad esta tubería en el mercado; el diámetro de tubería usado en el diseño de los soportes es de 10 pulgadas, cedula sch de 40, cuyo peso en kg por metro, equivale a 60.241kg/m y un espesor 9,27 milímetros.

Figura 23

Tabla de especificaciones sch (cedula), dimensiones de tubería petrolera en acero al carbón

Diámetro Nominal	Cedula	Diámetro Exterior		Diámetro Interior		Espesor		Peso Kg x Metro
		Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	
8"	20	8,625"	219.08	8,125"	206.38	0,250"	6.35	33.275
	30	8,625"	219.08	8,071"	205	0,277"	7.04	36.758
	40	8,625"	219.08	7,981"	202.72	0,322"	8.18	42.65
	60	8,625"	219.08	7,813"	198.45	0,406"	10.31	53.038
	80	8,625"	219.08	7,625"	193.68	0,500"	12.7	64.571
	100	8,625"	219.08	7,439"	188.95	0,593"	15.06	75.703
	120	8,625"	219.08	7,189"	182.6	0,718"	18.24	90.277
	140	8,625"	219.08	7,001"	177.83	0,812"	20.62	100.838
	160	8,625"	219.08	6,813"	173.05	0,906"	23.01	111.151
	XXS	8,625"	219.08	6,875"	174.63	0,875"	22.23	107.761
10"	20	10,750"	273.05	10,250"	260.35	0,250"	6.35	41.728
	30	10,750"	273.05	10,136"	257.45	0,307"	7.8	50.955
	40	10,750"	273.05	10,020"	254.51	0,365"	9.27	60.241
	60	10,750"	273.05	9,750"	247.65	0,500"	12.7	81.462
	80	10,750"	273.05	9,564"	242.93	0,593"	15.06	95.733
	100	10,750"	273.05	9,314"	236.58	0,718"	18.24	114.484
	120	10,750"	273.05	9,064"	230.23	0,843"	21.41	132.744
	140	10,750"	273.05	8,750"	222.25	1,000"	25.4	154.962
	160	10,750"	273.05	8,500"	215.9	0,125"	28.58	172.106
12"	20	12,750"	323.85	12,250"	311.15	0,250"	6.35	49.675
	30	12,750"	323.85	12,090"	307.09	0,330"	8.38	65.137
	40	12,750"	323.85	11,938"	303.23	0,406"	10.31	79.661
	60	12,750"	323.85	11,626"	295.3	0,562"	14.27	108.874
	80	12,750"	323.85	11,376"	288.95	0,687"	17.45	131.717
	100	12,750"	323.85	11,064"	281.03	0,843"	21.41	159.531
	120	12,750"	323.85	10,750"	273.05	1,000"	25.4	186.749
	140	12,750"	323.85	10,500"	266.7	1,125"	28.58	207.666
	160	12,750"	323.85	10,126"	257.2	1,312"	33.32	238.507
14"	10	14,0"	355.6	13,500"	342.9	0,250"	6.35	54.63
	20	14,0"	355.6	13,376"	339.75	0,312"	7.92	67.979
	30	14,0"	355.6	13,250"	336.56	0,375"	9.53	81.209
	40	14,0"	355.6	13,126"	333.36	0,437"	11.1	94.305
	60	14,0"	355.6	12,814"	325.48	0,593"	15.06	126.36
	80	14,0"	355.6	12,250"	317.5	0,750"	19.05	157.938

Fuente: Montacargas, A. (s.f.). *Tabla de especificaciones de tubería en acero al carbón.*
<http://www.ajmontacargas.com.co/tuberia-petrolera/>

En la figura 24 se indican las características técnicas de láminas H.R laminadas en caliente, sus propiedades mecánicas y aplicaciones más frecuentes en Colombia.

Figura 24*Especificaciones técnicas de láminas de uso común en Colombia*

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS																			
		LAMINAS H.R LAMINADAS EN CALIENTE										PROPIEDADES MECANICAS						APLICACIONES MAS FRECUENTES	
	CALIDADES MAS COMUNES	L	C	MN	P	S	SI	CU	Ni	Cr	V	Límite Elástico		Resistencia a Tracción					% ALARGA
NTC	ASTM											KSI	MPA	KSI		MPA			
														Min	Max	Min	Max		
1920	A-36	MIN		80			15					36	250	58	80	400	550	20	Estructuras Metálicas en General
		MAX	25	120	4	5	40	20											
2635	A-283 GR C	MIN		50			15					30	205	55	75	380	515	22	tanques de Almacenamiento
		MAX	24	90	3,5	4	40	20											
N/A	A-131 GR A	MIN		53								34	235	58	75	400	520	21	Construcción Naval en General
		MAX	21		3,5	3,5	50												
N/A	A-516 GR 70	MIN	27	85			15					38	260	70	90	485	620	17	Recipientes a presión temperaturas Media-alta
		MAX	31	120	3,5	3,5	40												
1985	A-572 GR 50	MIN					15					50	345	65		450	20	Estructuras metalicas	
		MAX	23	135	4	5	40												
2012	A-588 GR A	MIN		80			30	25		40	2	50	345	70		485	18	Puentes y Estructuras a intemperie	
		MAX	19	125	4	5	65	40	40	65	10								
Pend.	A-588 GR B	MIN		75			15	20		40	1	50	345	70		485	18	Puentes y Estructuras a intemperie	
		MAX	20	135	4	5	50	40	50	70	10								

Fuente: Agofer. (s.f.). *Laminas y planchas de acero*. <https://www.agofer.com.co/productos-laminas-y-plancha-de-acero>

En la figura 24 se muestran las dimensiones de la lámina que se usa en el diseño de los soportes, cuyo espesor es de 3/8 de pulgada, 9,53 milímetros y un peso de 74,81kg/m², el espesor y peso de la lámina son importantes para garantizar que la estructura no falle y que no sea pesada.

Figura 25*Dimensiones y pesos de planchas HR*

ESPESOR		m 2	1,0 x 2,0 mts	1,2 x 2,4 m (4x8)	1 x 6 m	1.2 x 6 m
PULGADA	MILÍMETRO	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
	1,50	11,78	23,55	33,91	70,7	84,8
	2,00	15,70	31,40	45,22	94,2	113,0
	2,50	19,63	39,25	56,52	117,8	141,3
	2,66	20,88	41,76	60,14	125,3	150,3
	3,00	23,55	47,10	67,82	141,3	169,6
1/8"	3,17	24,88	49,77	71,67	149,3	179,2
	4,00	31,40	62,80	90,43	188,4	226,1
	4,50	35,33	70,65	101,74	212,0	254,3
3/16"	4,76	37,37	74,73	107,61	224,2	269,0
	5,00	39,25	78,50	113,04	235,5	282,6
	6,00	47,10	94,20	135,65	282,6	339,1
1/4"	6,35	49,85	99,70	143,56	299,1	358,9
5/16"	7,94	62,33	124,66	179,51	374,0	448,8
	8,00	62,80	125,60	180,86	376,8	452,2
	9,00	70,65	141,30	203,47	423,9	508,7
3/8"	9,53	74,81	149,62	215,45	448,9	538,6
	10,00	78,50	157,00	226,08	471,0	565,2
	12,00	94,20	188,40	271,30	565,2	678,2
1/2"	12,70	99,70	199,39	287,12	598,2	717,8

Fuente: Agofer. (s.f.). *Laminas y planchas de acero*. <https://www.agofer.com.co/productos-laminas-y-plancha-de-acero>

Las láminas usadas en la construcción de cada soporte son planchas de acero HR (hot rolled laminas en caliente), calidad ASTM A-36, cuya resistencia a la tracción es de 400 a 550 MPa, comercialmente se encuentran con un espesor de 1/8", sin embargo, en este proyecto los soportes se diseñan usando lamina de 3/8 de pulgada, usar lamina de menor ocasionara que los soportes se flexionen con facilidad.

En la unión de elementos de acero se debe usar soldadura por arco con electrodos revestidos, "los tipos de electrodos más utilizados son aquellos destinados al acero al carbono como el E6010, E6011, E6013 y para aquellos soldadores avanzados que trabajen con estructuras que requieran resistencia; el electrodo E7018 es otro de los comúnmente utilizados en el mundo de la soldadura" (Desoldadores, s.f.). Con soldadura se unen las placas de acero de

50X50 cm con el cilindro, las placas que llevan perforaciones de ½” igualmente van soldadas al cilindro de cada soporte, así como los refuerzos en lámina que van en cada esquina. En la figura 26 se muestran las aplicaciones típicas del electrodo revestido E6013, uno de los mencionados anteriormente, dentro de sus aplicaciones se indica su uso en planchas de acero y tuberías ASTM A106 grado A y B usada en este proyecto.

Figura 26

Características técnicas del electrodo revestido E6013

E 6013



AWS: AWS A5.1: E6013, ASME SFA 5.1: E6013

Seleccionar Tipo de Producto

Seleccione Un Tipo de Producto ▼

Características Superiores

- Electrodo de revestimiento rutílico que presenta arco estable de muy fácil encendido y reencendido.
- Penetración mediana con cordones convexos de muy buena apariencia.
- baja salpicadura y escoria autodesprendible.

Aplicaciones Típicas

- Adecuado para los cordones de raíz en estructuras, tanques, soldaduras de planchas pesadas y láminas gruesas.
- Tipos de tuberías tales como API 5LX Gr. X42, X46, X52, X56, y ASTM: A53 Gr. A, B; A105; A106 Gr. A, B; A134; A 135 Gr. A, ; A 139 Gr. A, B, C y D.
- Combinando pase de raíz con GRICON 29 más relleno con GRICON 15.

Posiciones de Soldadura

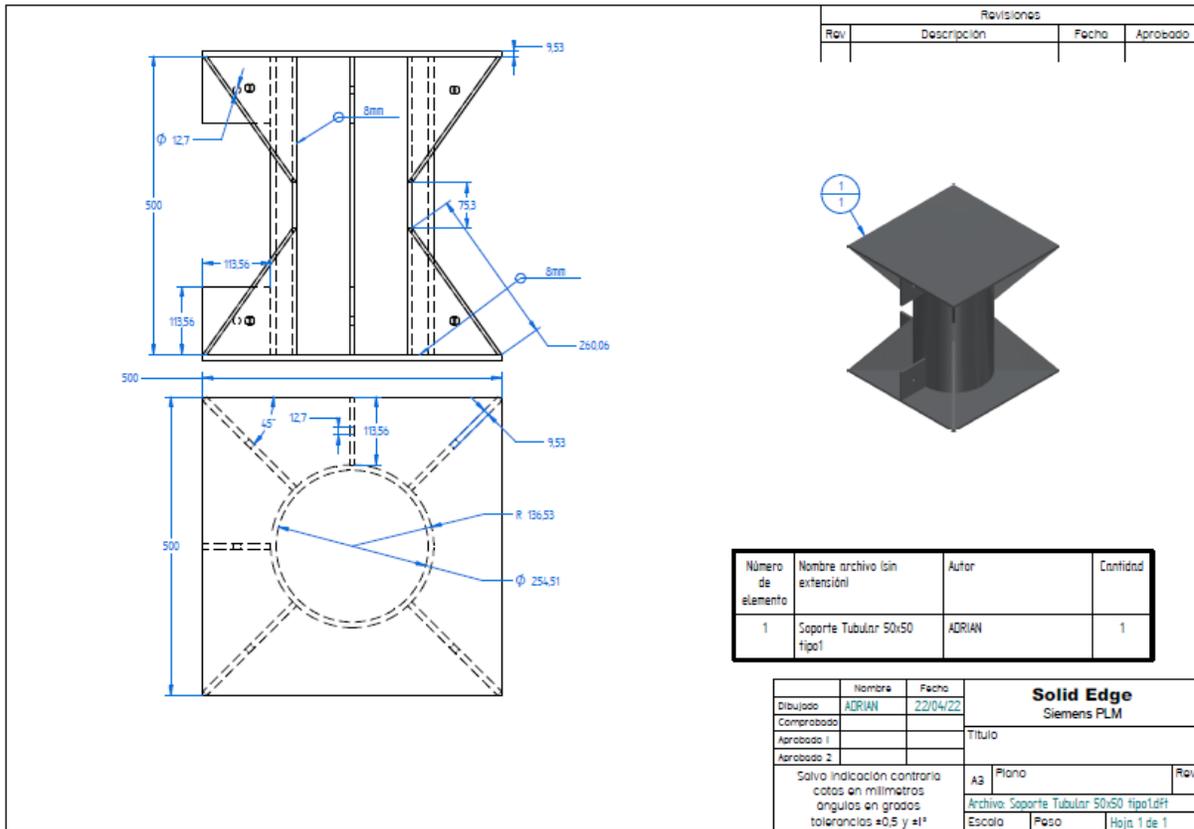
Todas

Fuente: Lincoln Electric Colombia. (s.f.). *Electrodos Revestidos*. <https://www.lincolnelectric.com/es-CO/Products/Filler-Metals/Stick-Electrodes>

En la figura 27 se muestra el soporte Tipo 1, usado en los extremos de la estructura, este soporte se construye con dos elementos de sujeción en el primer cuadrante del soporte. En la estructura se usan 4 soportes de este tipo, las láminas usadas pesan 197kg y la tubería 120kg aproximadamente, pesando un total de 317kg los 4 soportes de este tipo.

Figura 27

Plano soporte tipo 1

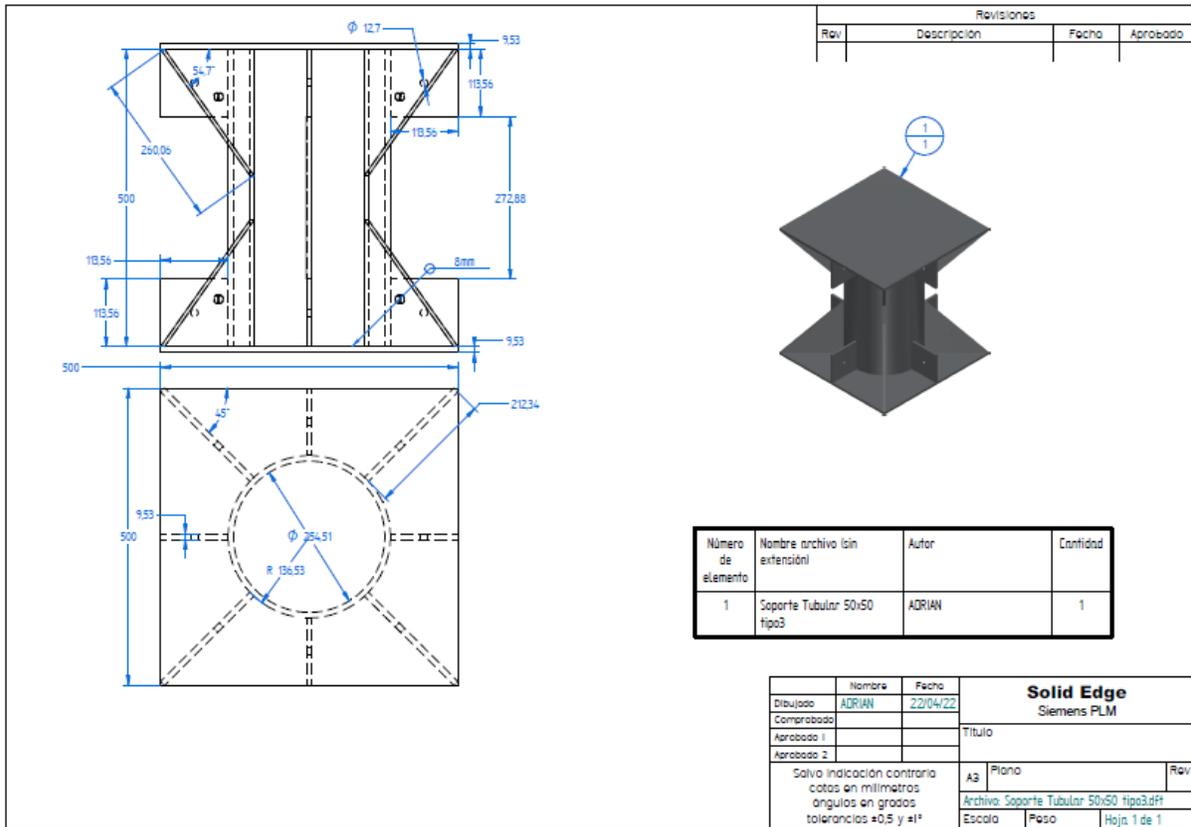


Fuente: Autor.

En la figura 28 se muestra el soporte Tipo 3, usado en la mitad de la estructura para conectar más elementos, se puede observar que contiene elementos de sujeción en los 4 cuadrantes del soporte. En la estructura se usan 3 soportes de este tipo, las láminas usadas pesan 169kg y la tubería 90kg aproximadamente, pesando un total de 259kg los 3 soportes de este tipo.

Figura 28

Plano soporte tipo 3

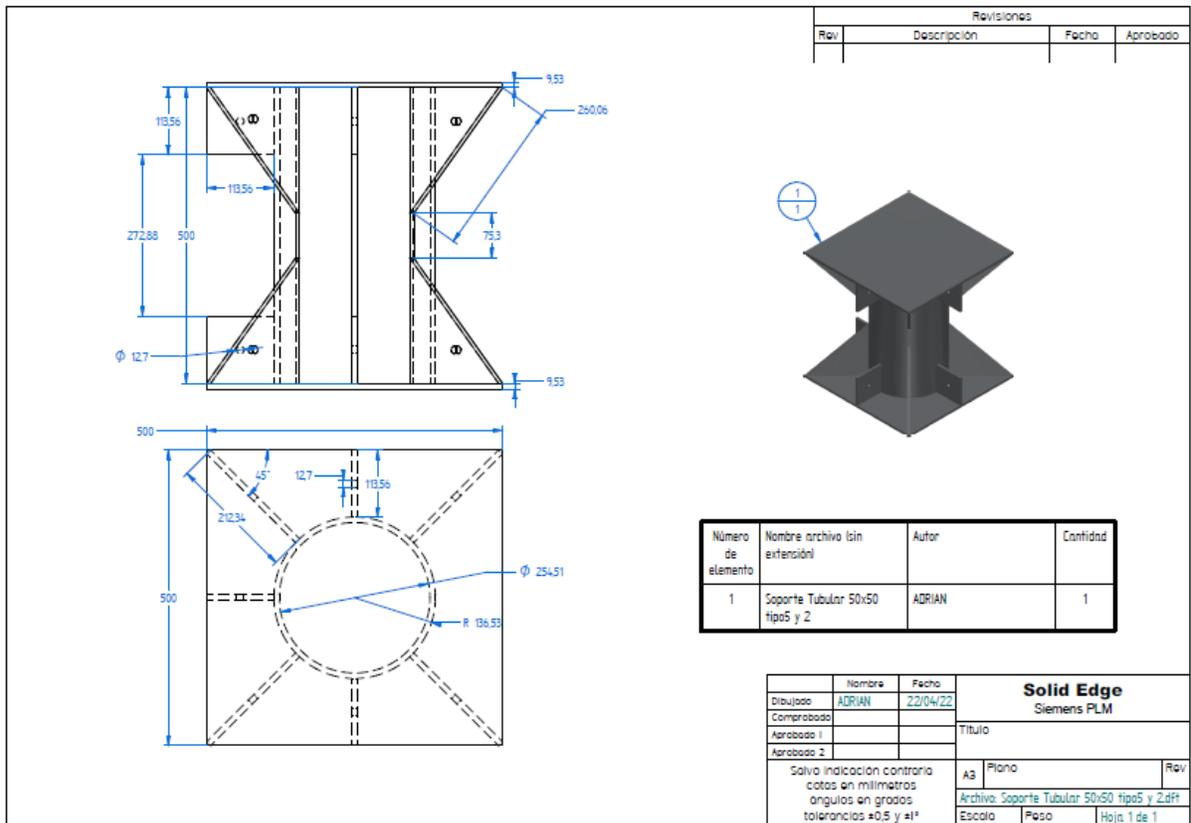


Fuente: Autor.

En la figura 27 se puede observar que el soporte contiene elementos de sujeción en 2 cuadrantes. En la estructura se usan 8 de estos soportes, las láminas usadas pesan 450kg y la tubería 240kg aproximadamente, pesando un total de 690kg los 8 soportes de este tipo.

Figura 29

Plano soporte tipo 5 y 2



Fuente: Autor.

3.2.2 Elementos de conexión

Como elementos de conexión estructurales se usaron platinas de acero estructural cuyas características dimensionales, masa y formas están reguladas por la NTC 4537, las barras o platinas ofrecen una resistencia a la tracción de 400 a 550 MPa, su límite de fluencia mínimo es de 250MPa. Sus dimensiones son de 2”X3/8in, en milímetros 50,8X9,53mm, área de sección transversal 483.9mm² y una masa por m² de 3,460kg, se usaron dos tipos de platinas, unas para los soportes que van más juntos a lo largo del casco de la embarcación y otras de longitud un poco mayor para el ancho, en las figuras 31 y 32 se pueden observar los planos.

Figura 30

Ficha técnica perno estructural cabeza hexagonal que se debe usar en la conexión de platinas y soportes tubulares

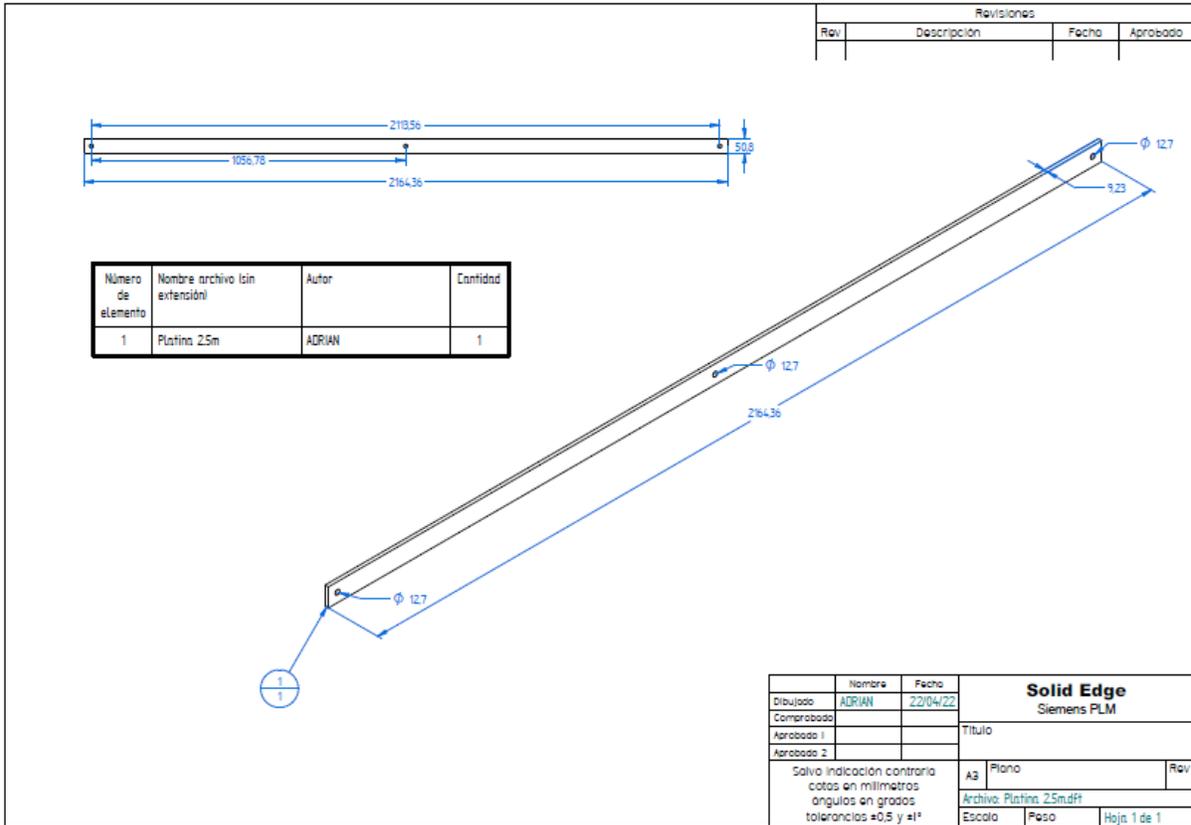


Fuente: Scribd. (2021, 17 de marzo). *Ficha Técnica Perno Estructural Astm A 325 Tipo 1*. <https://es.scribd.com/document/499195605/178308919-Ficha-Tecnica-Perno-Estructural-Astm-a-325-Tipo-1>

Se deben usar pernos de 12,7mm de diámetro o 1/2” en la conexión entre platinas y soportes, la estructura se diseñó para que se usen tornillos ASTM A-325 por sus propiedades mecánicas, además el material en que se fabrica este tipo de tornillos es resistente a la oxidación y no requiere de recubrimientos.

Figura 31

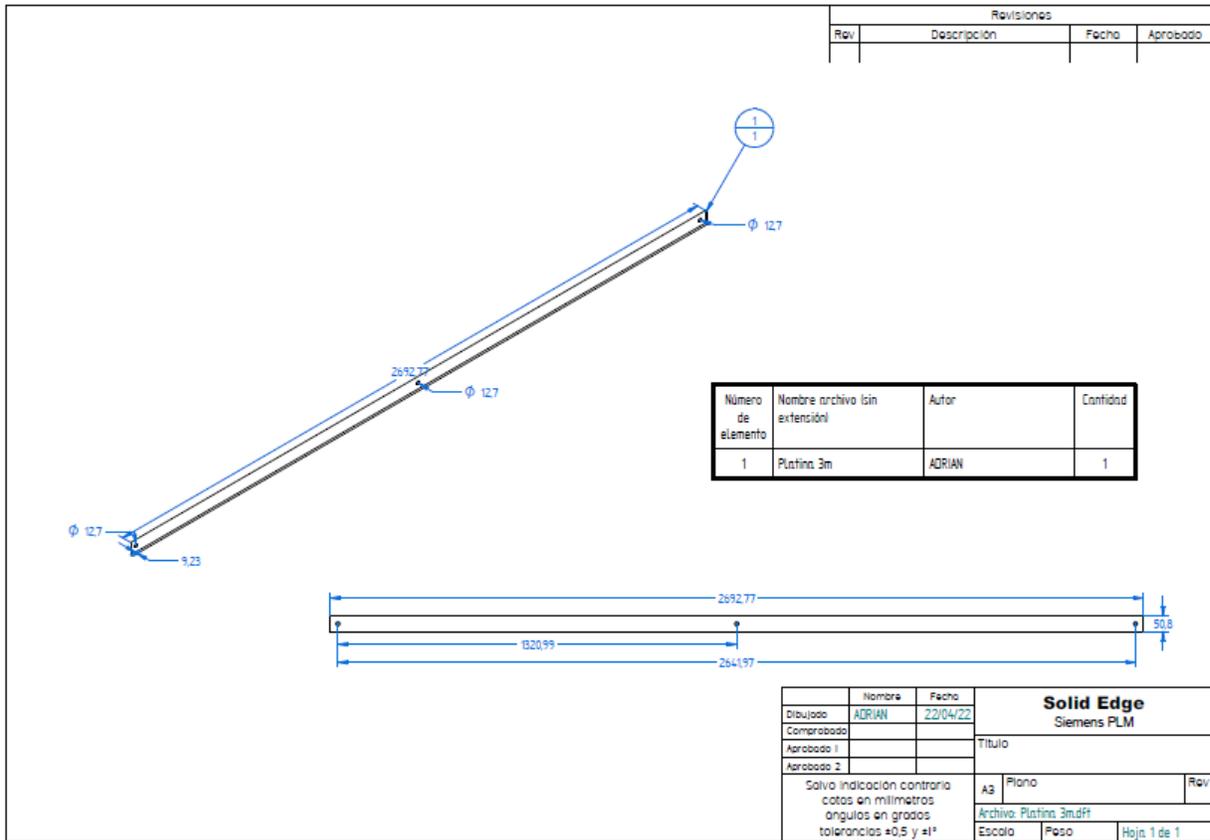
Plano acotado de platinas usadas para conectar los soportes a lo largo de la estructura



Fuente: Autor.

Figura 32

Plano acotado de platinas usadas para conectar los soportes a lo ancho de la estructura



Fuente: Autor.

En la estructura se usan 24 platinas de 2,16m, llamadas “platinas 2,5m” por el autor, con un peso de 180 kg y 20 platinas de 2,7m, llamadas “platinas 3m” que suman un peso en total de 187kg aproximadamente.

Figura 33*Características y dimensiones de platinas con sección transversal rectangular en acero*

Designación Pulgadas	Designación (mm)	Indicador	Anchor			Espesor E		Área secc transv (mm ²)	Masa (Kg/m)
			Nominal (mm)	Tol (min)	Tol (máx)	Nominal (mm)	Tol		Nominal
1" x 1/8"	25.4 x 3.18	Minimo	25.00	0.40	0.40	3.00	0.18	80.6	0.562
		Nominal	25.40			3.18			0.633
		Máximo	25.80			3.36			0.652
1" x 3/16"	25.4 x 4.76	Minimo	25.00	0.40	0.40	4.58	0.18	121.0	0.859
		Nominal	25.40			4.76			0.949
		Máximo	25.80			4.94			0.978
1" x 1/4"	25.4 x 6.35	Minimo	25.00	0.40	0.40	6.15	0.20	161.3	1.153
		Nominal	25.40			6.35			1.266
		Máximo	25.80			6.55			1.304
1" x 3/8"	25.4 x 6.35	Minimo	25.00	0.40	0.40	9.33	0.20	241.9	1.748
		Nominal	25.40			9.53			1.899
		Máximo	25.80			9.73			1.956
1" x 1/2"	25.4 x 12.7	Minimo	25.00	0.40	0.40	12.50	0.20	322.6	2.344
		Nominal	25.40			12.70			2.532
		Máximo	25.80			12.90			2.608
1 1/2" x 1/8"	31.75 x 3.18	Minimo	30.96	0.79	0.79	3.00	0.18	100.8	0.695
		Nominal	31.75			3.18			0.791
		Máximo	32.54			3.36			0.815
1 1/2" x 3/16"	31.75 x 4.76	Minimo	30.96	0.79	0.79	4.58	0.18	151.2	1.064
		Nominal	31.75			4.76			1.187
		Máximo	32.54			4.94			1.222
1 1/2" x 1/4"	31.75 x 6.35	Minimo	30.96	0.79	0.79	6.05	0.30	201.6	1.405
		Nominal	31.75			6.35			1.583
		Máximo	32.54			6.65			1.630
1 1/2" x 1/8"	38.1 x 3.18	Minimo	37.31	0.79	0.79	3.00	0.18	121.0	0.838
		Nominal	38.10			3.18			0.950
		Máximo	38.89			3.36			0.978
1 1/2" x 3/16"	38.1 x 4.76	Minimo	37.31	0.79	0.79	4.58	0.18	181.4	1.282
		Nominal	38.10			4.76			1.424
		Máximo	38.89			4.94			1.467
1 1/2" x 1/4"	38.1 x 9.53	Minimo	37.31	0.79	0.79	6.05	0.30	241.9	1.693
		Nominal	38.10			6.35			1.899
		Máximo	38.89			6.65			1.956
1 1/2" x 3/8"	38.1 x 6.35	Minimo	37.31	0.79	0.79	9.23	0.30	362.9	2.581
		Nominal	38.10			9.53			2.849
		Máximo	38.89			9.83			2.934
1 1/2" x 1/2"	38.1 x 12.7	Minimo	37.31	0.79	0.79	12.40	0.30	483.9	3.470
		Nominal	38.10			12.70			3.798
		Máximo	38.89			13.00			3.912
2" x 1/8"	50.8 x 3.18	Minimo	50.01	0.79	0.79	3.00	0.18	161.3	1.123
		Nominal	50.80			3.18			1.266
		Máximo	51.59			3.36			1.304
2" x 3/16"	50.8 x 4.76	Minimo	50.01	0.79	0.79	4.58	0.18	241.9	1.719
		Nominal	50.80			4.76			1.899
		Máximo	51.59			4.94			1.956
2" x 1/4"	50.8 x 6.35	Minimo	50.01	0.79	0.79	6.05	0.30	322.6	2.269
		Nominal	50.80			6.35			2.532
		Máximo	51.59			6.65			2.608
2" x 3/8"	50.8 x 9.53	Minimo	50.01	0.79	0.79	9.23	0.30	483.9	3.460
		Nominal	50.80			9.53			3.798
		Máximo	51.59			9.83			3.912

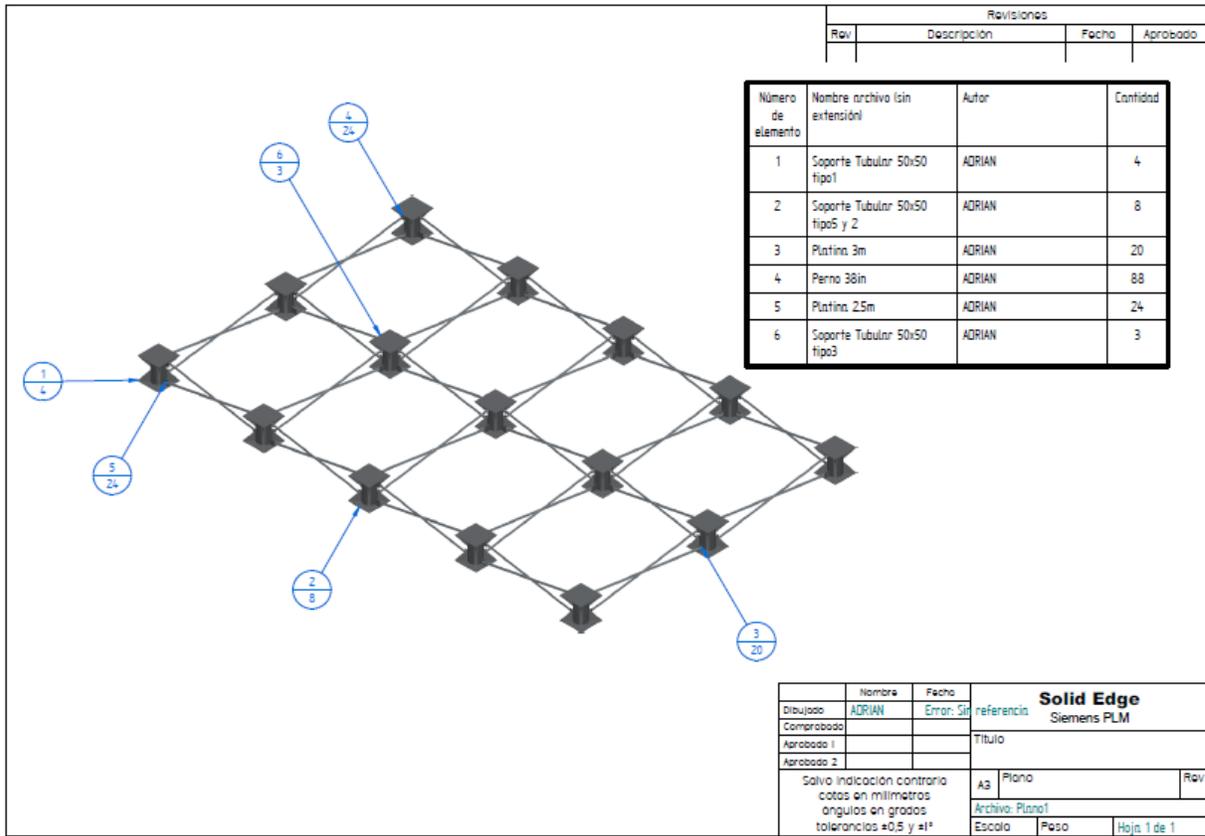
Fuente: Autor.

Las platinas de perfil de las que se basaron los diseños, corresponden a platinas con sección transversal rectangular de superficie lisa y laminadas en caliente, bajo norma de fabricación NTC 1920 – ASTM A36 – SAE 1015, este tipo de platinas son usadas con frecuencia en la construcción de torres de suministro eléctrico, de comunicación, estructuras y carrocerías. Ofrecen una resistencia a la tracción de 400 a 500MPa y un límite de fluencia

mínimo de 250MPa. Su aplicación en la estructura que se diseñó, simplemente es la de mantener conectados los soportes, por lo que las cargas que recibirá no superaran los 5Mpa.

Figura 34

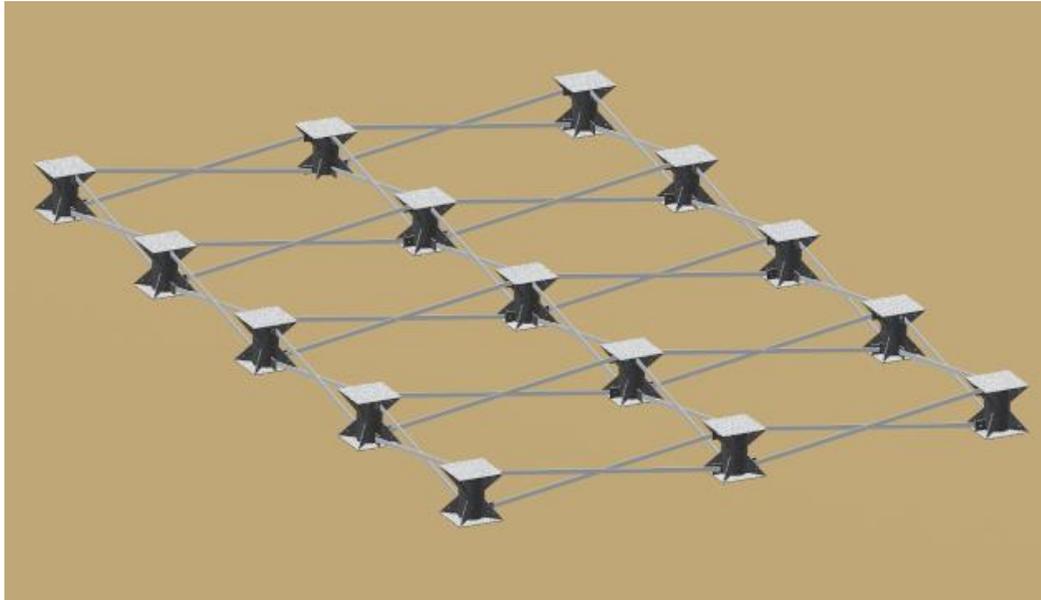
Plano de la estructura de soporte para barcaza



Fuente: Autor.

Figura 35

Vista isométrica de la estructura diseñada

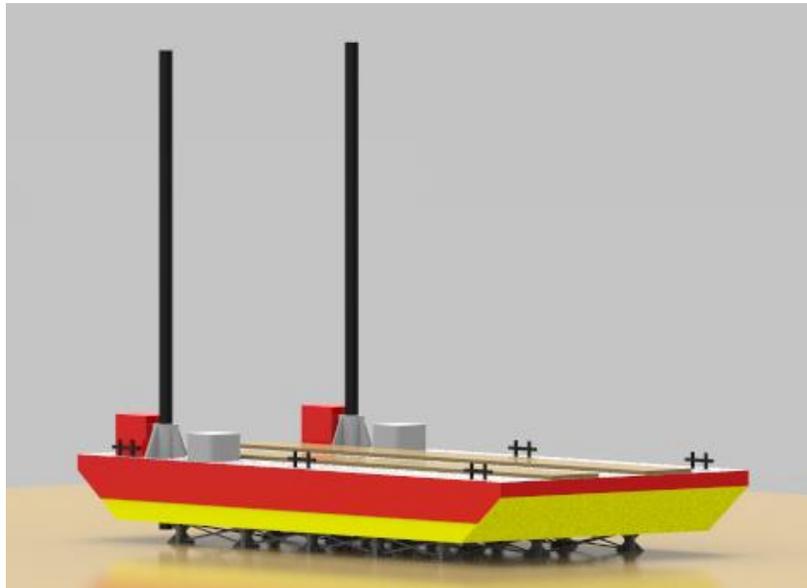


Fuente: Autor.

Una vez construida y ensamblada la estructura en el lugar de almacenamiento, la operación de izaje de la barcaza sobre la estructura se puede realizar con una grúa de celosía o grúa articulada, anclando la barcaza de cuatro puntos de apoyo e izándola sobre la estructura sin inconvenientes y de forma segura.

Figura 36

Recreación de la estructura diseñada soportando una barcaza



Fuente: Autor.

En el mercado se pueden encontrar soluciones para recubrimientos de acero estructural como el Top Quality Plus que funciona como anticorrosivo, garantizando la durabilidad y protección de estructuras o el Epoxi70RS que inhibe la corrosión en superficies de acero, de acuerdo a su fabricante cumplen con la norma ISO12944 que define, evalúa y limita los ambientes corrosivos. “Tienen una alta resistencia a la abrasión y puede ser usado como anticorrosivo en sistemas de protección en ambientes de alta agresividad gracias a sus pigmentos de protección fosfato de zinc” (Pintuco, 2022).

3.3 Simulación y Análisis de Resultados

El diseño de la estructura de soporte para barcazas se logró realizar en el software SolidEdge junto con los planos de cada elemento, en la simulación se analiza uno de los quince soportes que hacen parte de la configuración de la estructura, considerando que estos elementos poseen la misma cantidad de refuerzos y la carga que soportaran es la misma, lo que los diferencia son los puntos de conexión entre ellos.

3.3.1 *Propiedades del Estudio*

En el numeral 3 del informe Solid Edge, se presentan las propiedades del estudio donde se realiza el análisis de la estructura simulada, se establece el tipo de estudio estático lineal, este tipo de estudio calcula los desplazamientos, tensiones y las fuerzas de reacción bajo cargas aplicadas al elemento sujeto a estudio. Se emplea mallado tetraédrico en el elemento, este tipo de mallado es de uso común en mallado 3D porque según (Cardoso, 2016), las mallas formadas por triángulos se pueden utilizar como base para construir elementos más sofisticados, “las mallas tienen dos componentes principales, los nodos y los elementos. Los nodos son vértices distribuidos estratégicamente y forman polígonos que cubren toda la geometría sin traslaparse entre ellos, a estos polígonos se les conoce como elementos finitos y son la base del cálculo” (Cardoso, 2016).

Figura 37

Características del estudio de simulación en el solver NX Nastran

Propiedad del estudio	Valor
Nombre del estudio	Estudio estático 1
Tipo de estudio	Estático lineal
Tipo de mallado	Tetraédrico
Solucionador iterativo	Activado
Verificación de geometría de NX Nastran	Activado
Línea de comandos de NX Nastran	
Opciones de estudio de NX Nastran	
Opciones generadas de NX Nastran	
Opciones predeterminadas de NX Nastran	
Opción Solamente los resultados de superficie	Activado

Fuente: Autor.

La figura 37, muestra la asignación de cargas, una presión de 26.5kPa y condiciones de temperatura de 33°C, temperatura promedio a lo largo del año en la ciudad de Barrancabermeja.

3.3.2 *Cargas*

En el análisis y estudio del comportamiento de la estructura se toman como elemento de estudio los soportes estructurales, a los cuales se les asigna una presión de 26,5KPa que, (como

se menciona en el numeral 3.1.4 *modelado y análisis de reacciones*), por cada metro cuadrado se debe soportar un peso de 3773,1N, ahora bien, el área de contacto es de $104m^2$ por lo que cada soporte estará a cargo de $7m^2$ (*se usan 15 soportes en total*), lo que significa una carga de 26,5kPa aproximadamente y una temperatura de $33^{\circ}C$ que, corresponde a la temperatura ambiente promedio en la ciudad de Barrancabermeja.

Figura 38

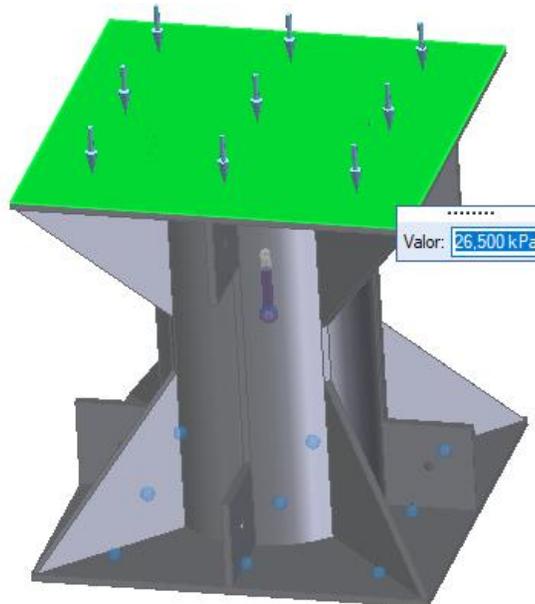
Cargas aplicadas a los elementos sujetos a análisis

Nombre de carga	Tipo de carga	Valor de carga	Distribución de carga	Dirección de carga	Opción de dirección de carga
Temperatura de cuerpo 1	Temperatura de cuerpo	33 C			
Presión 1	Presión	26,5 kPa		Compresiva	Perpendicular a cara

Fuente: Autor.

Figura 39

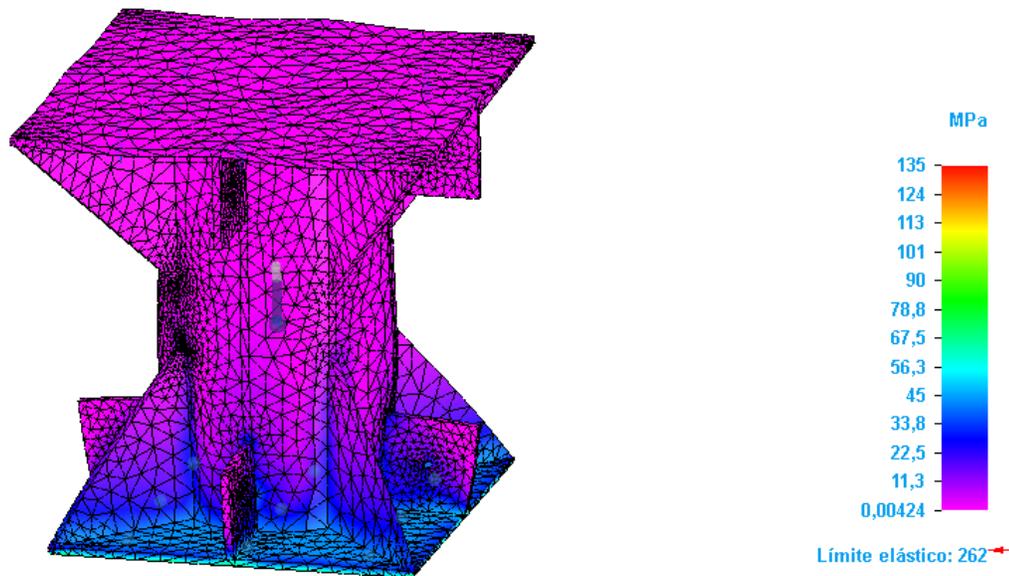
Asignación de cargas a elemento estructural



Fuente: Autor.

Figura 40

Modelado y simulación del soporte tubular que se usara en la estructura



Fuente: Autor.

La figura 39, muestra el comportamiento del soporte sometido en la simulación a condiciones de temperatura y presión mencionadas inicialmente, la escala indica que cada soporte experimente un límite elástico que no supera los 135MPa, evidenciando que soportan las cargas asignadas, ya que el limite elástico del acero estructural de los perfiles es de 220 MPa y 250 MPa para las platinas.

3.3.3 Tensión Equivalente Von Mises

Como las deformaciones tridimensionales se desarrollan en diferentes direcciones, con la aplicación del concepto tensión equivalente de Von Mises, se resumen en una sola tensión equivalente estas tensiones multidireccionales. “El resultado de un solucionador matemático es, por lo general, una cantidad considerable de datos no procesados. Normalmente, sería difícil y tedioso interpretar esta cantidad de datos no procesados sin la ordenación y representación gráfica de los datos tradicionalmente denominada por procesamiento” (Autodesk, 2014).

Figura 41

Resultado Von Mises del soporte estructural según informe SolidEdge

Componente resultante: Von Mises				
Extensión	Valor	X	Y	Z
Mínima	0,00424 MPa	4,765 mm	250,000 mm	395,970 mm
Máxima	135 MPa	250,000 mm	-250,000 mm	0,000 mm

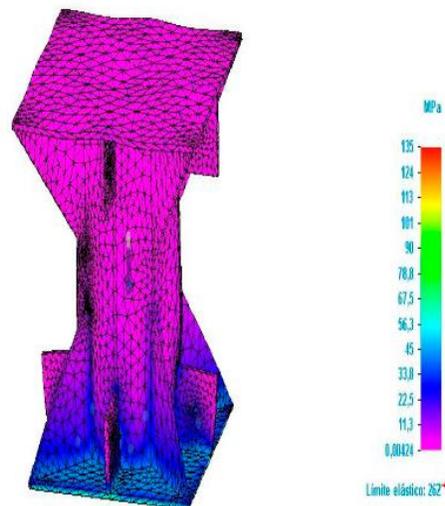
Fuente: Autor.

En la figura 39, se indican las tensiones equivalentes Von Mises arrojadas por el software, teniendo en cuenta la componente resultante Von Mises, la tensión máxima que experimentaría cada soporte alcanza los 135MPa, lo que indica que la estructura puede soportar la carga sin fallar, ya que el limite elástico del acero de los perfiles tubulares es de 220MPa y de las placas de 250MPa. En la figura 42, se muestra con color azul la zona donde se experimenta la componente Von Mises máxima.

Figura 42

Resultado Von Mises del soporte

Soporte Tubular 50x50 8po2.par, Estudio estático 1, Acero, estructural
 Tensión: Elemental
 Contorno: Tensión de Von Mises
 Deformación: Traslación total
 Fecha: miércoles, 11 de mayo de 2022 2:10 a. m.



Fuente: Autor.

Con la aplicación de Von Mises, el solver de SolidEdge muestra la distribución de tensiones, deformaciones y demás aspectos del modelo simulado, también indica las áreas de

debilidad del modelo, áreas donde se desperdicia material, las áreas del modelo que no soportan poca carga.

3.3.4 Factor de Seguridad

En resistencia de materiales el factor de seguridad es como su nombre lo indica un índice de seguridad, este indica la capacidad de exceso que una estructura tiene sobre sus requerimientos, dicho esto y teniendo en cuenta el análisis suministrado por el software, cada soporte cuenta con un factor de seguridad mínimo de 1,94 unidades, lo que garantiza que la construcción de la estructura sea segura y confiable. Este factor de seguridad es arrojado por el software cuando se le asignan cargas a una estructura específica y se selecciona el material con el cual será construida. En la figura 43 se indica el factor de seguridad máximo y mínimo del soporte, en color rojo se puede observar la escala del valor mínimo aplicado al soporte.

Figura 43

Factor de seguridad del soporte estructural según informe SolidEdge

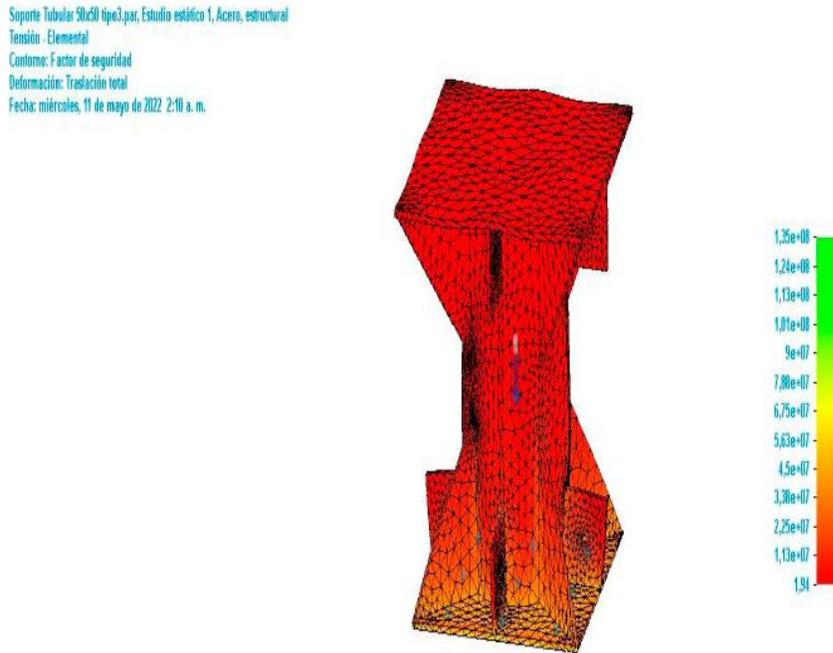
Componente resultante: Factor de seguridad					
Extensión	Valor	X	Y	Z	
Mínima	1,94	250,000 mm	-250,000 mm	0,000 mm	
Máxima	1,35e+08	250,000 mm	-250,000 mm	0,000 mm	

Fuente: Autor.

En la figura se indica que la construcción del soporte con los materiales establecidos garantiza que la estructura sea segura, teniendo en cuenta que un factor de seguridad mínimo se debe encontrar entre (1,5) y (3) unidades garantizando que la estructura sea segura y un valor igual o inferior a (1) unidad indica que el material puede fallar.

Figura 44

Representación gráfica del factor de seguridad mínimo aplicado en el soporte



Fuente: Autor.

3.3.5 Deformación

El elemento estructural sometido a presión alcanza un desplazamiento máximo que no supera los 0,0091 milímetros. De acuerdo con, la simulación se observa que el mayor desplazamiento se presenta en la placa superior del perfil tubular donde se aplica la carga, en la parte media se presenta desplazamiento que ronda los $2,28 \times 10^{-4}$ mm, de la mitad hacia abajo no se presenta desplazamiento.

Figura 45

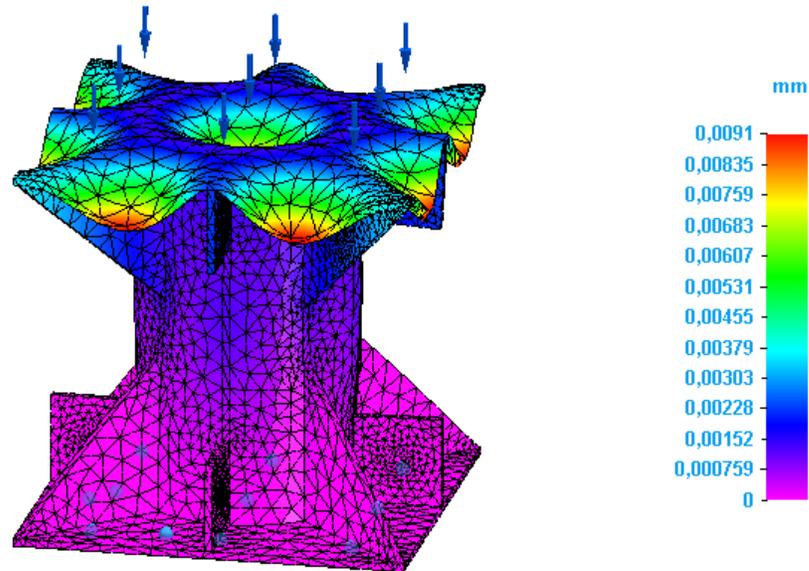
Traslación máxima y mínima presentada en el soporte de perfil circular

Componente resultante: traslación total				
Extensión	Valor	X	Y	Z
Mínima	0 mm	226,933 mm	177,249 mm	9,530 mm
Máxima	0,0091 mm	250,000 mm	-111,986 mm	519,060 mm

Fuente: Autor.

Figura 46

Simulación de la deformación que presenta el soporte



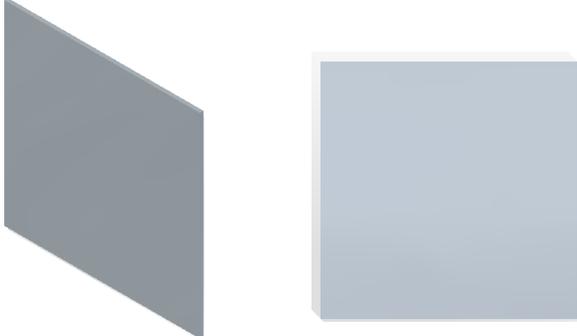
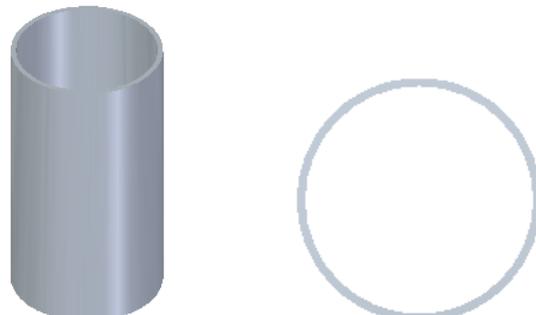
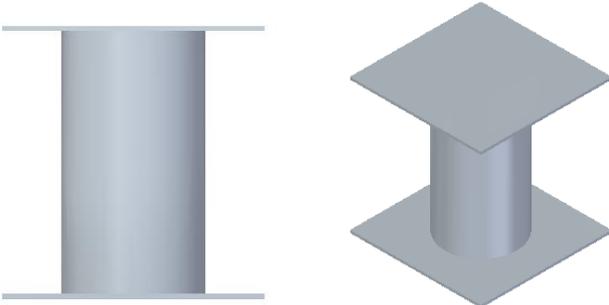
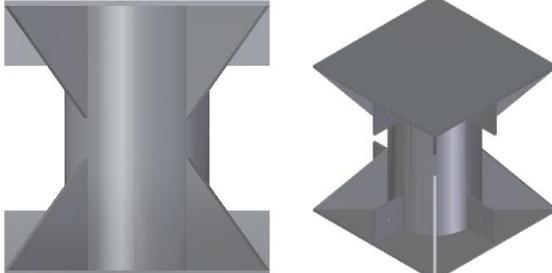
Fuente: Autor.

En la figura 46, se indica la escala en milímetros de la deformación que experimenta el soporte, se puede observar que en los puntos sin refuerzo de la placa de superior la deformación es mayor, sin embargo, esta deformación presentada se puede considerar como insignificante.

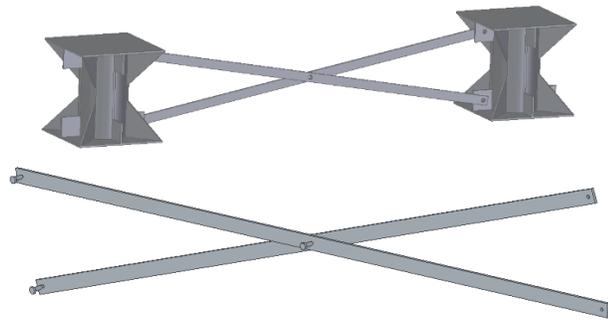
3.3.6 *Ensamble de Componentes*

Los materiales empleados en la construcción de esta estructura, son materiales comúnmente usados en industrias como la construcción, petroquímicas y metalmecánicas, por lo que su uso en este proyecto garantiza una estructura segura y con la capacidad de soportar barcazas de eslora de 16 metros, puntal de 1,55 metros, manga de 8 metros y una masa de 40 toneladas aproximadamente. En la fabricación de cada soporte se tienen en cuenta los parámetros de la tabla 4.

Tabla 4
Características de los Soportes Estructurales

CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA	
PLACAS	
<p>1. Se realiza la medición y corte de la placa de cada extremo del perfil circular, estas laminas son de acero ASTM A-36, espesor de 3/8 de pulgada. Unidas con soldadura por arco revestido.</p>	
Dimensiones	500X500mm y espesor de 9,53mm
PERFILES TUBULARES	
<p>2. Los perfiles circulares son tubería ASTM A106 Grado B, sch 40, se encuentra en el mercado normalmente en longitudes de 6m. Se cortan tramos de 0,5m de longitud.</p>	
Dimensiones	Diámetro 254mm y espesor 9,24mm SCH 40
<p>3. Se centran y se unen en cada uno de los extremos del perfil tubular las planchas de acero usando soldadura de arco revestido, se pueden usar electrodos E6013, E6011 o E6010.</p>	
<p>4. Se agregan refuerzos en las esquinas de cada plancha, así mismo se agregan los puntos de conexión del soporte, el número de platinas perforadas va de acuerdo al tipo de soporte, ver planos de figuras 27, 28 y 29 (anexos).</p>	

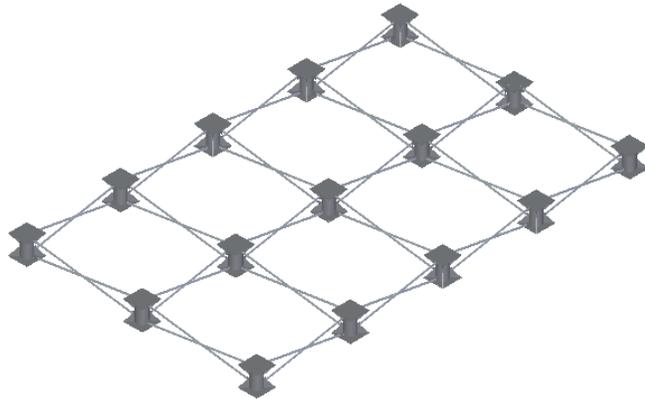
5. Los elementos que conectan los soportes son platinas con una perforación de 25,4mm en sus extremos y en la mitad, al ancho de la platina es de 50,8mm y espesor de 9,23mm.



Dimensiones

Platina 2,5m: Longitud 2,16m, Platina 3m: longitud 2,7m

6. Se construyen en total 15 soportes, dentro de los cuales 3 unidades son de configuración Tipo 3, 4 unidades de Tipo 1 y 8 unidades de Tipo 5 y 2, *el tipo de soporte está ligado a la ubicación de este dentro de la estructura.* Adicional se requieren 20 unidades de platinas 3m, 24 unidades de platinas 2,5m y un total de 88 unidades de pernos.



Fuente: Autor.

Conclusiones

La afectación por corrosión en el casco de embarcaciones tipo barcaza por contacto directo con el suelo, condujeron a brindar una solución estructural que evitara ese deterioro, con ayuda de fuentes de información primarias y secundarias como los sitios web 4SailNautica, Aceropedia, 3DNatives, entre otros, con esa información se logró seleccionar el software Solid Edge con el que se realizó el modelado y análisis del proyecto, adicionalmente se establecieron los componentes y materiales de la estructura.

El análisis de cargas y la simulación de la estructura con el software Solid Edge, permitió evaluar el comportamiento de cada soporte estructural, por lo que la estructura que se diseña es de fácil montaje, compuesta por elementos que se pueden unir, desarmar, fabricar y transportar sin inconvenientes, en total su masa es inferior a los 1650 kg.

Con base en el modelado y la simulación de la estructura se presentan los planos de cada elemento que la componen, los materiales empleados en el diseño se pueden encontrar en el mercado de forma que basado en el diseño presentado se garantiza que la estructura se puede construir en su totalidad.

La implementación de software CAD/CAE en este proyecto fue crucial, para conocer previamente el comportamiento de los elementos diseñados, seleccionar los materiales, revisar su geometría, dimensiones y realizar mejoras, el software nos indicó que el factor de seguridad mínimo presente en cada soporte, correspondió a (1,95) unidades, alcanzando tensiones máximas de 135MPa, teniendo en cuenta que el límite elástico de los materiales es de 220 MPa para los perfiles y 250MPa para las placas de acero, la estructura que se diseño es segura y puede ser construida.

Recomendaciones

Conocidas las capacidades del software Solid Edge, se debe tener en cuenta que, al modelar una pieza, la herramienta *extruir* no permite líneas desconectadas y al simular fuerzas o magnitudes físicas sobre un conjunto de piezas, estas deben estar unidas para que el solver *NX Nastran* resuelva las operaciones del mallado sin generar códigos de error.

En la simulación de la estructura diseñada, la calidad de simulación está ligada a la escala de mallado que se aplique sobre esta, sin embargo, se debe tener en cuenta que la estructura de las piezas no sea compleja ya que esto acarrea tiempo adicional para que el solver realice el análisis y procesamiento.

Al ser construida la estructura se debe tener en cuenta a la hora de realizar el montaje, que cada uno de los soportes tiene un derecho en la conexión de las platinas, además, que una vez se monta la barcaza sobre la estructura se construya una capota en plástico o en lona para evitar que la embarcación siga siendo afectada por la lluvia.

La operación de izaje de la barcaza sobre la estructura, se puede realizar con grúas de celosía o grúas articuladas, anclando la barcaza de cuatro puntos de apoyo y montándola sobre la estructura, usar otro tipo de elementos en el montaje de la embarcación, puede ocasionar incidentes, daños en esta o en la estructura diseñada.

Referencias

- 3Dcad Portal. (s.f.). *Ptc Creo es el nuevo nombre para ProEngineer*.
<https://www.3dcadportal.com/creo-elements-pro.html>
- 4Sail Nautica. (s.f.). *Tipos y formas de casco de barcos*. <https://4sailnautica.com/tipos-y-formas-de-casco-de-barcos/>
- Academia Hooke. (s.f.). *Diagrama Esfuerzo – Deformación Unitaria*.
<https://academiahooke.com/diagrama-esfuerzo-deformacion-unitaria/>
- Aceromafe. (s.f.). *Acero al carbono: Descripción, tipos y propiedades*.
<https://www.aceromafe.com/acero-al-carbono-descripcion/>
- Aceropedia. (s.f.). *Acero de baja aleación*. <http://aceropedia.com/tipos-de-acero/acero-de-baja-aleacion/#:~:text=E1%20acero%20de%20baja%20aleaci%C3%B3n%20y%20alta%20resistencia%20se%20utiliza,%C3%BAtiles%20en%20la%20industria%20automotriz.>
- Agofer. (s.f.). *Laminas y planchas de acero*. <https://www.agofer.com.co/productos-laminas-y-plancha-de-acero>
- Akzo Nobel. (s.f.). *¿Qué es la corrosión y cómo prevenirla?* <https://www.international-marine.com/what-corrosion-how-prevent-it>
- Alaymar. (2019, 27 de junio). *¿Cuáles son las partes de un barco?* <https://alaymar.com/partes-de-un-barco/>
- Alcaldía de Barrancabermeja. (s.f.). *Economía*.
<https://www.barrancabermeja.gov.co/publicaciones/14/economia/#:~:text=Gran%20parte%20de%20la%20econom%C3%ADa,petroqu%C3%ADmicos%20que%20demanda%20el%20pa%C3%ADs.>
- Alvarez, A. (2020, 10 de marzo). *Ansys 2020 R1 favorece la combinación de simulaciones multifísicas*. <https://www.esss.co/es/blog/el-ansys-2020-r1-favorece-la-combinacion-de-simulaciones-multifisicas/>
- Amador, J. L. (s.f.). *Columnas*.
http://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/22_columns.pdf

- Asipona Veracruz. (2022, 16 de octubre). *Definición de Atraque*.
<https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/acerca-del-puerto/requisitos-para-tramites-y-servicios-portuarios/atraque/>
- Asociación Española para la Calidad. (s.f.). *Normas ASTM*.
<https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/normas-astm>
- Astivik. (s.f.). *Astivik es el astillero más importante de Colombia*.
<https://astivik.com/about/#quienes-somos>
- Auto Technology. (s.f.). *Prueba de corrosión innovadora*.
<https://autotechnology.com/news/2020/01/rust-is-a-major-problem-for-the-navy-and-cruise-ships/>
- Autodesk. (s.f.). *¿Qué es el software CAD?* <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/cad-software>
- Autodesk. (2014, 13 de febrero). *Interpretación de los resultados del análisis de tensión*.
<https://knowledge.autodesk.com/es/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ESP/Inventor/files/GUID-68384EEE-E554-4376-8674-F555F60CF7D6-htm.html>
- Baoding Heb Construction Engineering. (s.f.). *Columnas de acero estructural*.
<http://m.hebosteel.com/steel-parts/steel-column/structural-steel-columns.html>
- Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J., y Mazurek, D. (2017). *Mecánica de Materiales* (7a ed.). McGraw-Hill Global Education.
- Beer, F., Mazurek, D., y Johnston, R. (2017). *Mecánica Vectorial para Ingenieros*. (11a ed.). Mc Graw Hill Education.
- Brunet, J. G. (2015, septiembre). *Calculo y analisis mediante heramientas CAD/CAE de una maquina hidraulica de gimnasio*. <https://zaguan.unizar.es/record/47549/files/TAZ-TFG-2015-2604.pdf>
- Búa, M. T. (s.f.). *Estructuras trianguladas*.
https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/65_estructuras_triangularadas.html#:~:text=Son%20estructuras%20formadas%20por%20elementos,la%20repetici%C3%B3n%20de%20formas%20triangulares.
- Cad Crowd. (2022, 2 de febrero). *Las ventajas del software de diseño 3D y CAD (diseño asistido por computadora)*. <https://www.cadcrowd.com/blog/the-advantages-of-cad/>

- Cadworks, I. (2014, 7 de abril). *Ventajas del diseño asistido por computadora*.
<https://www.indiacadworks.com/blog/advantages-of-computer-aided-design/>
- Caisaguno, E. (2015, 15 de julio). *Diseño de un molde para fabricación de suelas FABYA tamaño 37 de poliuretano, utilizando ingeniería CAD CAM CAE*.
<https://core.ac.uk/reader/234581179>
- Calvo, E. (2002, diciembre). Aplicacion del CAE en ingenieria estructural. *Revista Ingenieria*, 12(2), 9. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/6433/6138>
- Cardoso, V. (2016, 17 de mayo). *La mejor malla para elemento finito*.
<https://finit3element.wordpress.com/2016/05/17/la-mejor-malla-para-elemento-finito/>
- Chimborazo, E. S. (2015, 19 de julio). *Diseño de un molde para fabricación de suelas FABYA tamaño 37 de poliuretano, utilizando ingeniería CAD CAM CAE*.
<https://core.ac.uk/outputs/234581179>
- Cipriano, T. (2015, 26 de noviembre). *Tensión de rotura*.
http://recursos.tomascipriano.edu.co:8983/wikipedia_es_all_novid_2018-04/A/Tensi%C3%B3n_de_rotura.html
- Comunicae. (2015, 16 de enero). *Cómo seleccionar un software CAD correcto*.
<https://www.comunicae.com.mx/nota/como-seleccionar-un-software-cad-correcto-22245/>
- Cotecmar. (s.f.). *Quiénes somos*. <https://www.cotecmar.com/quienes-somos>
- Dassault Systemes. (2014). *Criterio de máxima tensión de von Mises*.
http://help.solidworks.com/2014/spanish/solidworks/cworks/r_Maximum_von_Mises_Stress_Criterion.htm
- Desoldadores. (s.f.). *Clasificación y Nomenclatura de los Electrodo para Soldadura*.
<https://www.desoldadores.net/soldadura-smaw/nomenclatura-electrodos/>
- Diccionario Nautico. (s.f.). *Arboladura*. <http://www.nautical-dictionary.com/arbolutura>
- Diccionario Nautico. (s.f.). *Astillero*. <http://www.nautical-dictionary.com/diccionario-nautico.asp?cadena=Astillero&quebus=1&Submit=buscar>
- Diccionario Nautico. (s.f.). *Casco*. <http://www.nautical-dictionary.com/casco>
- Diccionario Nautico. (s.f.). *Jarcia*. <http://www.nautical-dictionary.com/jarcia>
- E-construir. (s.f.). *Las cargas vivas de las estructuras*. <http://e-construir.com/estructuras/cargas-vivas.html>

- Engineering Simulation and Scientific Software. (s.f.). *Simulación Ansys: ingeniería para lo que está por venir*. https://www.esss.co/es/ansys-simulacion-computacional/?gclid=Cj0KCQjw29CRBhCUARIsAOboZbLORARB4RnhVDblW1xp7xoFuCGGI_XhQbvHM4HA6ZRAIYE0iAgCx5saAhX5EALw_wcB
- Escobar, M. (2013, 7 de julio). *Diseño y Construcción de un Molde para Inyección de un Casco Decorativo de Plástico, Utilizando Ingeniería CAD/ CAM*. https://core.ac.uk/display/234591411?source=1&algorithmId=15&similarToDoc=229169258&similarToDocKey=CORE&recSetID=4cf06594-2d0a-4a7e-9316-661a7dac6f42&position=4&recommendation_type=same_repo&otherRecs=234581179,234589615,275618928,234591411,55524553
- Escolaport. (s.f.). *Seguridad en la mar*. <https://aulanautica.org/unit/seguridad-en-la-mar-py/>
- Escudero, J. (2009, 16 de octubre). *Herramientas CAD/CAM/CAE y prototipado virtual y rápido para la obra pública*. <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/34772-Herramientas-CAD-CAM-CAE-y-prototipado-virtual-y-rapido-para-la-obra-publica.html>
- Esteban, M. (2012). *Análisis modal de un eje ferroviario y comparativa con un eje equivalente unidimensional*. <https://core.ac.uk/download/pdf/30046788.pdf>
- Federeacion de Enseñanza de CC.OO de Andalucía. (2011). *Propiedades de los Metales. Temas para la Educacion*, 15. <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8631.pdf>
- Fondear. (s.f.). *La maldita corrosion*. http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Diseno_Construccion/Corrosion_Maldita/Corrosion_maldita.htm#:~:text=La%20maldita%20corrosi%C3%B3n&text=En%20el%20mar%20estos%20procesos,hierro%20para%20crear%20%C3%B3xido%20f%C3%A9rrico.
- G2. (s.f.). *El mejor software de simulación y CAE*. <https://www.g2.com/categories/simulation-cae>
- Galavís, Y. (2016, 24 de febrero). *Proceso CAD/CAM/CAE para la fabricacion de la tija inferior en un ciclomotor*. <https://core.ac.uk/display/275610762?source=2>
- Gerdau Corsa. (2020, 1 de octubre). *¿Qué son las estructuras de acero?* <https://www.gerdaucorsa.com.mx/blog/que-son-las-estructuras-de-acero>
- Gerdau Diaco. (s.f.). *Platinas*. <https://www.gerdaudiaco.com/perfil-t/>

- Giuseppe, M. (2016, 22 de enero). *Metodo de los elementos finitos: ¿Qué es?*
<https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- Glosarios Alicante. (2018, 30 de agosto). *Elongación*. <https://glosarios.servidor-alicante.com/resistencia-de-materiales/elongacion>
- González, R. (2018, 13 de julio). *Taller de Solidworks personalización de la interfaz de usuario*.
<https://solidservicios.com/cal/taller-de-solidworks-personalizacion-de-la-interfaz-de-usuario/>
- Google. (s.f.). *Ubicación de la ciudad de Barrancabermeja*.
<https://earth.google.com/web/@7.07757124,-73.88241328,75.30002194a,13127.57867262d,35y,-164.47670932h,45.01011509t,-0r>
- Guardia, J., y Canalís, P. (2015). *Calculo y analisis mediante herramientas CAD/CAE de una maquina hidraulica de gimnasion*. <https://zaguan.unizar.es/record/47549/files/TAZ-TFG-2015-2604.pdf>
- Hibbeler, R. C. (2017). *Mecanica de Materiales* (9a ed.). Pearson Hispanoamérica.
- Hobbs, J. (2022, 2 de febrero). *Las ventajas del software de diseño 3D y CAD (diseño asistido por computadora)*. <https://www.cadcrowd.com/blog/the-advantages-of-cad/>
- Huerta, N., y Velarmino, E. (2019, 17 de octubre). *Diseño y construcción de un atenuador de impacto a escala utilizando fibra de carbono mediante software CAD/CAE e impresión 3D*.
https://core.ac.uk/display/287191191?source=1&algorithmId=15&similarToDoc=234590822&similarToDocKey=CORE&recSetID=7772e048-8eb4-4626-b14d-dc048841162d&position=5&recommendation_type=same_repo&otherRecs=230220652,234575482,163094090,234581179,287191191
- Iberica de Ingenieria . (s.f.). *Nx nastran desktop/enterprise*.
<http://www.iberisa.com/productos/nxnastran.htm>
- India Cad Works. (2014, 7 de abril). *Ventajas del diseño asistido por computadora*.
<https://www.indiacadworks.com/blog/advantages-of-computer-aided-design/>
- Instituto Tecnico de la Estructura en Acero. (s.f.). *Estructuras tubulares*.
http://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia_documentacion/itea/TOMO15.pdf

- Instron. (s.f.). *Límite elástico*. <https://www.instron.com/es-es/our-company/library/glossary/e/elastic-limit>
- Leao, L. (2016, 15 de julio). *Las 10 ineficiencias más comunes en softwares CAD y qué hacer con ellas*. <https://www.e3seriescenters.com/es/blog-de-ingenieria-electrica-moderna/10-ineficiencias-softwares-cad-y-que-hacer>
- Lexico. (s.f.). *Atraque*. <https://www.lexico.com/es/definicion/atraque>
- Lincoln Electric Colombia. (s.f.). *Electrodos Revestidos*. <https://www.lincolnelectric.com/es-CO/Products/Filler-Metals/Stick-Electrodes>
- Llarco Fluid Technology. (s.f.). *Protección Catódica – Corriente impresa y por ánodos de sacrificio*. <https://www.llarco.com/proteccion-catodica/>
- Lopez, S., y Sailema, O. (2017). *Diseño y contrucción de un molde de inyeccion para obtener el lateral de un asiento para autobus a escala*. <https://core.ac.uk/download/234589615.pdf>
- Lopol. (s.f.). *Ventajas y desventajas del diseño asistido por computadora CAD sobre el dibujo manual*. <https://www.lopol.org/article/advantages-and-disadvantages-of-computer-aided-design-cad-over-manual-drafting>
- Magica. (2018, 6 de marzo). *Una descripción general de la corrosión marina en los barcos y cómo puede manejarla: Información sobre el tratamiento del óxido para barcos*. <https://magicarustremover.com/rust-treatment-for-boats/rust-treatment-for-boats/>
- Marchante, A. (2020, 2 de noviembre). *Solid Edge, ¿qué características tiene esta solución de modelado 3D?* <https://www.3dnatives.com/es/solid-edge-solucion-modelado-021120202/#!>
- Masteel. (2020, 19 de mayo). *Perfilado de acero para la construcción naval*. <https://masteel.co.uk/news/outlining-steel-for-shipbuilding/>
- MCCormac, J., y Csernak, S. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero* (5a ed.). Alfaomega Grupo Editor S.A.
- Mecapedia. (2022, 28 de julio). *Coficiente de Poisson*. http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm
- Mecapedia. (2022, 30 de agosto). *Módulo de elasticidad*. http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm

- Mirlisenna, G. (2016, 22 de enero). *Método de los elementos finitos: ¿qué es?*
<https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- Molina, J., y Tapuy, D. (2018, 19 de agosto). *Análisis de materiales alternativos para la fabricación del bloque de un motor PyP 10 mediante los métodos CAD, CAM Y CAE.*
<https://core.ac.uk/display/234590822?source=2>
- Montacargas AyJ. (s.f.). *Tabla de especificaciones de tubería en acero al carbon.*
<http://www.ajmontacargas.com.co/tuberia-petrolera/>
- Morales, R., y Candal, M. (2006). *Diseño y fabricación de un molde de termoformado utilizando herramientas CAD/CAE.* http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652006000100009&lang=es
- Nautic Advisor. (s.f.). *¿Qué son y qué función cumplen los ánodos de sacrificio en las embarcaciones?* <https://www.nauticadvisor.com/blog/2016/06/22/que-son-y-que-funcion-cumplen-los-anodos-de-sacrificio-en-las-embarcaciones/>
- Navarro y Soler. (s.f.). *Ansys.* <https://www.nysplm.com/ansys/>
- Ncgo. (2020, 26 de diciembre). *Diferentes tipos de barcazas – Usos y diferencias.*
<https://ncgovote.org/es/diferentes-tipos-de-barcazas-usos-y-diferencias/>
- Npd Solutions. (s.f.). *Descripción general del análisis CAE.* <https://www.npd-solutions.com/cae-analysis-overview.html>
- Octal Steel. (s.f.). *Especificación de tubería ASTM A106 grado b.*
<https://www.octalsteel.com/astm-a106-grade-b-pipe>
- On Nautic. (2020, 17 de julio). *¿Cuáles son las partes de un barco?*
<https://onnautic.com/blog/cuales-son-las-partes-de-un-barco/>
- Organos de Palencia . (2021, 23 de diciembre). *¿Qué es ASTM en metales?*
<https://organosdepalencia.com/biblioteca/articulo/read/59941-que-es-astm-en-metales>
- Palacios, E. Á. (2017). *Diseño CAD y analisis CAE de una estructura de exoesqueleto para persona adulta con paraplejia.*
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3137/IME_226.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Perez, R., y Muñoz, J. (2018). *La gestión de la industria 4.0 a través de las herramientas CAD/CAM/CAE.* <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6506777>

- Pintuco. (2022, 7 de abril). *Corrotec primer epóxico 70RS*. <https://pintuco.com.co/wp-content/uploads/2020/02/corrotec-primer-epoxico-70RS.pdf>
- Pintuco. (2022, 1 de febrero). *La norma iso 12944 y su importancia para la protección del acero*. <https://pintuco.com.co/blog-pintuco/norma-iso-12944-proteccion-acero/>
- Pixel Sistemas. (s.f.). *Solid Edge Simulation*. <https://www.pixelsistemas.com/solid-edge/simulacion/solid-edge-simulation>
- Poseidon Barge. (s.f.). *Posseidon p1 proyectos barge*. <https://www.poseidonbarge.com/products/sectional-barges/poseidon-i/?lang=es>
- Prasad, D. (2022, 3 de noviembre). *14 mejores software Cad para estudiantes y profesionales*. <https://geekflare.com/es/best-cad-software/>
- Prismacim. (s.f.). *Qué es Solid Edge*. <https://prismacim.com/soluciones/solid-edge/>
- Prontubeam. (2016, 18 de diciembre). *Arriostramientos, tipología y comparativa con FEM*. https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=58
- PTC, (Productor). (2014, 6 de octubre). *Mechanisms with PTC Creo - PTC Creo Showcase* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=MPEIT04xXaM&ab_channel=PTC
- Real Academia Española. (2021, 7 de abril). *Barcaza*. <https://dle.rae.es/barcaza>
- Sailand Trip. (2014, 14 de enero). *Dimensiones de un barco, eslora, manga y calado*. <https://sailandtrip.com/partes-del-barco-dimensiones/>
- Scribd. (2021, 17 de marzo). *Ficha Tecnica Perno Estructural Astm A 325 Tipo 1*. <https://es.scribd.com/document/499195605/178308919-Ficha-Tecnica-Perno-Estructural-Astm-a-325-Tipo-1>
- Semirrigidas Online. (2017, 18 de septiembre). *Tipos de embarcaciones de recreo y permisos que necesitas*. <https://semirrigidasonline.es/tipos-embarcaciones-recreo-permisos-necesitas/>
- Siemens. (2022). *Integración con SolidWorks PLM, con SolidWorks PLM mejorará su productividad*. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/collaboration/solidworks-plm.html>

- Siemens. (s.f.). *Ingeniería asistida por ordenador (CAE)*.
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>
- Significados. (s.f.). *Estructura*. <https://www.significados.com/estructura/>
- Significados. (s.f.). *Significado de Estructura*. <https://www.significados.com/estructura/>
- Solidbi. (s.f.). *Solidworks, qué es y para qué sirve*. <https://solid-bi.es/solidworks/>
- Spiegato. (s.f.). *¿Qué es una carga nominal?* <https://spiegato.com/es/que-es-una-carga-nominal>
- The Free Dictionary. (s.f.). *Eslora*. <https://es.thefreedictionary.com/eslora>
- The Free Dictionary. (s.f.). *Proa*. <https://es.thefreedictionary.com/proa>
- The Standard Cio. (2015, 13 de febrero). *Cómo seleccionar un Software CAD correcto*.
<https://thestandardcio.com/2015/02/13/como-seleccionar-un-software-cad-correcto/>
- Touristlink. (2020). *Touristlink*. <https://es.touristlink.com/Estados-Unidos/puente-de-elevacion-aereo/overview.html>
- Unacaracteristica. (s.f.). *Estructuras metálicas: ¿Qué son?, características, importancia y otros*. <https://unacaracteristica.com/estructuras-metalicas>
- Vinicio, F., Mejía, C., y Erazo, A. (2017, 30 de junio). *Desarrollo de una prótesis de rodilla para amputaciones transfemorales utilizando herramientas computacionales*.
https://core.ac.uk/display/230220652?source=1&algorithmId=15&similarToDoc=234590822&similarToDocKey=CORE&recSetID=7772e048-8eb4-4626-b14d-dc048841162d&position=1&recommendation_type=same_repo&otherRecs=230220652,234575482,163094090,234581179,287191191
- Westreicher, G. (s.f.). *Polígono*. <https://economipedia.com/definiciones/poligono.html>
- Wordreference. (s.f.). *Barcaza*. <https://www.wordreference.com/definicion/barcaza>