ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA COMPUERTA HIDRAULICA TIPO GUILLOTINA DE POLIPROPILENO RECICLADO

Autores

José Manuel Zubieta Mancera – 20231375082

William Andrés Castiblanco Ramírez – 20231375013

Docente director

Oswaldo Pastrán Beltrán

Universidad Distrital Francisco José De Caldas

Ingeniería Mecánica

Bogotá, Colombia

2024

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. Enero del 2025

DEDICATORIAS

Este trabajo lo dedico a mis padres que han sido el motor que me impulsa a seguir adelante y hermanos que me apoyaron a lo largo de este camino y también a mis amigos por su invaluable amistad a lo largo de estos años de estudio.

J. Zubieta

A cada persona que contribuyo a este gran logro, familia, amigos y docentes.

W. Castiblanco

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis compañeros de carrera que me apoyaron en cada semestre y a cada persona que aporto en mi carrera.

J. Zubieta

Dios, familia y amigos, muchas gracias.

W. Castiblanco

CONTENIDO

CONTENIDO 1

LISTADO DE ECUACIONES 7

LISTADO DE FIGURAS 9

RESUMEN 14

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 15

2 OBJETIVOS 16

2.1 OBJETIVO GENERAL 16

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

3 JUSTIFICACION 17

4 MARCO TEORICO 19

4.1 COMPUERTAS HIDRÁULICAS 19

4.2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE DISEÑOS DE COMPUERTAS 24

4.3 EQUIPO DE ACCIONAMIENTO 25

4.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN 26

4.5 PLÁSTICOS RECICLABLES 26

4.6 SOFTWARE INVENTOR 29

4.7 NORMATIVIDAD 29

4.7.1 Norma NBR-8883 31
4.7.2 AWWA C561 31
4.7.3 DIN 19704 32
5 ANTECEDENTES 34
6 DELIMITACIÓN DEL MARCO CONCEPTUAL 38
6.1 ESTADO DEL ARTE 38
6.1.1 Momento Heurístico 38
6.1.2 Momento hermeneútico 39
6.2 MARCO REFERENCIAL 42
6.2.1 Requisitos normativos 42
6.2.2 Requisitos Técnicos 44
6.2.3 Requisitos Conceptuales 46
7 PARAMETROS DE DISEÑO 49
7.1 DOCUMENTOS 49
7.2 MATERIALES 49
7.3 CONSTANTES FÍSICAS 51
7.4 VALORES DE REFERENCIA 52
7.5 ACCIONES PARA CONSIDERAR 52

7.6 FUERZAS DE ACCIONAMIENTO 56

7.7 DIMENSIONES DE LAS COMPUERTAS Y COMPONENTES 57

7.7.1 Vida Útil 57

7.7.2 Memorias de cálculo 57

7.8 MÉTODO DE CÁLCULO 61

8 CÁLCULOS 63

8.1 CARGA HIDROSTÁTICA Y PUNTO DE APLICACIÓN 63

8.1.1 Carga hidrostática 64

8.1.2 Punto de aplicación de la fuerza 64

8.2 POSICIÓN DE REFUERZOS HORIZONTALES 65

8.3 CANTIDAD DE REFUERZOS HORIZONTALES 67

8.4 ESFUERZO ADMISIBLE 70

8.5 DEFLEXIÓN MÁXIMA 74

8.6 CÁLCULO DE REFUERZOS 75

8.7 FUERZA DE ACCIONAMIENTO 77

9 VALIDACIÓN POR ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS 83

10 TABLA DE COSTOS DE FABRICACIÓN Y MATERIALES 131

11 CONCLUSIONES 132

12 REFERENCIAS 135

ANEXOS 138

LISTADO DE TABLAS

TABLA 1. MOMENTO HEURÍSTICO. 39

TABLA 2. CONSTANTES DEL POLIPROPILENO RECICLADO. 50

TABLA 3. CENTROIDES Y POSICIÓN DE LOS REFUERZOS HORIZONTALES…... 66

TABLA 4. CÁLCULOS DE ESFUERZOS EN ÁREAS. 69

TABLA 5. CÁLCULOS DE ESFUERZOS CORTANTES VERTICALES Y HORIZONTALES. 71

TABLA 6. CÁLCULOS DE ESFUERZOS EN ÁREAS CON UN ESPESOR DE 20 MM.. 73

TABLA 7. CÁLCULOS DE ESFUERZOS CORTANTES VERTICALES Y HORIZONTALES CON UN ESPESOR DE 20 MM. 73

TABLA 8. CÁLCULOS DE ESFUERZO ADMISIBLE CON UN ESPESOR DE 20 MM.. 74

TABLA 9. CÁLCULO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA. 75

TABLA 10. CÁLCULO NÚMERO DE REFUERZOS. 76

TABLA 11. CÁLCULO ESPESOR DE REFUERZOS. 76

TABLA 12. CÁLCULOS DEL TORNILLO. 80

TABLA 13. INERCIA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL. 97

TABLA 14. INERCIA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL. 105

TABLA 15. RESUMEN DE RESULTADOS. 130

TABLA 16. TABLA DE COSTOS DE FABRICACIÓN Y MATERIALES. 131

LISTADO DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 55

ECUACIÓN 2 61

ECUACIÓN 3 64

ECUACIÓN 4 64

ECUACIÓN 5 65

ECUACIÓN 6 66

ECUACIÓN 7 66

ECUACIÓN 8 67

ECUACIÓN 9 70

ECUACIÓN 10 71

ECUACIÓN 11 74

ECUACIÓN 12 75

ECUACIÓN 13 76

ECUACIÓN 14 78

ECUACIÓN 15 79

ECUACIÓN 16 81

ECUACIÓN 17 81

ECUACIÓN 18 82

ECUACIÓN 19 96

ECUACIÓN 20 96

ECUACIÓN 21 98

ECUACIÓN 22 99

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1. COMPUERTA DESLIZANTE 20

FIGURA 2. COMPUERTA DE SEGMENTO. 21

FIGURA 3. COMPUERTA TIPO ORUGA. 22

FIGURA 4. COMPUERTA STONEY. 23

FIGURA 5. COMPUERTA BASCULANTE. 23

FIGURA 6. LÍMITES DE ÁREA VS PRESIÓN HIDROSTÁTICA 25

FIGURA 7. CÓDIGOS DE IDENTIFICACIÓN DE PLÁSTICOS. 28

FIGURA 8. CANTIDAD DE TRABAJOS SEGÚN AÑO DE PUBLICACIÓN. 40

FIGURA 9. CANTIDAD DE TRABAJOS SEGÚN EL NIVEL DE ESTUDIO. 40

FIGURA 10. CANTIDAD DE TRABAJOS SEGÚN EL PAÍS. 41

FIGURA 11. COEFICIENTES DE ROZAMIENTO. 51

FIGURA 12. COTA DEL AGUA, ESTACIÓN RIO BOGOTÁ - CHICÚ. 53

FIGURA 13. CAUDAL, ESTACIÓN RIO BOGOTÁ - CHICÚ. 54

FIGURA 14. COMPONENTES DE UNA COMPUERTA DESLIZANTE. 55

FIGURA 15. DIMENSIONES GENERALES. 58

FIGURA 16. CARGAS GENERALES. 59

FIGURA 17. DIAGRAMA DE PRESIÓN Y PUNTO DE APLICACIÓN DE LA CARGA, EN UNA COMPUERTA SUMERGIDA. 63

FIGURA 18. COMPUERTAS SUMERGIDAS. 65

FIGURA 19. ESQUEMA DE CENTROIDES Y REFUERZOS HORIZONTALES. .. 67

FIGURA 20. COEFICIENTE K 68

FIGURA 21. ESQUEMA DE COMPUERTA COMO VIGA SIMPLEMENTE APOYADA 70

FIGURA 22. COEFICIENTES DE TENSIONES ADMISIBLES PARA ELEMENTOS ESTRUCTURALES. 72

FIGURA 23. COEFICIENTE DE TIMOSHENKO 74

FIGURA 24. FUERZAS EN EL SISTEMA. 77

FIGURA 25. COEFICIENTES DE FRICCIÓN DEL POLIETILENO. 78

FIGURA 26. ANGULO ENTRE EL PASO Y PERÍMETRO DE LA ROSCA. 80

FIGURA 27. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL 84

FIGURA 28. ESFUERZOS DE VON MISES POR ÁREAS. 84

FIGURA 29. ESFUERZO MÁXIMO DE VON MISES. 85

FIGURA 30. DESPLAZAMIENTO DEL OBTURADOR. 86

FIGURA 31. FACTOR DE SEGURIDAD. 86

FIGURA 32. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL UHMW. 87

FIGURA 33. RESTRICCIONES ENTRE EL MONTAJE OBTURADOR-CUÑAS. ..88

FIGURA 34. ESFUERZO VON MISES, MONTAJE OBTURADOR-CUÑAS. 89

FIGURA 35. DEFLEXIÓN MÁXIMA, MONTAJE OBTURADOR-CUÑAS. 89

FIGURA 36. FACTOR DE SEGURIDAD, MONTAJE OBTURADOR-CUÑAS. 90

FIGURA 37. REACCIONES GENERADAS EN LAS RESTRICCIONES. 90

FIGURA 38. DIAGRAMA DE FUERZA LIBRE, MARCO. 91

FIGURA 39. DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE, MARCO. 93

FIGURA 40. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR, MARCO. 95

FIGURA 41. RELACIONES ENTRE LAS CARGAS DISTRIBUIDAS, FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR 95

FIGURA 42. SECCIÓN TRANSVERSAL, MARCO. 98

FIGURA 43. COEFICIENTES PARA SECCIONES RECTANGULARES. 99

FIGURA 44. ESQUEMA DE VIGA INFERIOR, MARCO. 101

FIGURA 45. DIAGRAMA DE FUERZA LIBRE, MARCO. 102

FIGURA 46. DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE, MARCO. 102

FIGURA 47. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR, MARCO. 103

FIGURA 48. ESQUEMA DE VIGA SUPERIOR, MARCO. 104

FIGURA 49. SECCIÓN TRANSVERSAL, MARCO. 105

FIGURA 50. DIAGRAMA DE FUERZA LIBRE, MARCO. 106

FIGURA 51. DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE, MARCO. 106

FIGURA 52. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR, MARCO. 107

FIGURA 53. CARGAS SEGÚN RESTRICCIONES, MARCO. 108

FIGURA 54. ESFUERZO DE VON MISES EN EL MARCO. 109

FIGURA 55. DESPLAZAMIENTO EN EL MARCO. 110

FIGURA 56. FACTOR DE SEGURIDAD EN EL MARCO. 111

FIGURA 57. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN, VÁSTAGO. 112

FIGURA 58. ESFUERZO DE VON MISES, VÁSTAGO. 113

FIGURA 59. DESPLAZAMIENTO MÁXIMO, VÁSTAGO. 114

FIGURA 60. FACTOR DE SEGURIDAD, VÁSTAGO. 114

FIGURA 61. ESQUEMA, VIGAS DE SOPORTE PARA EL VOLANTE. 115

FIGURA 62. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN, VIGAS DE SOPORTE PARA EL VOLANTE. 116

FIGURA 63. ESFUERZO VON MISES, VIGAS DE SOPORTE PARA EL VOLANTE. 116

FIGURA 64. DESPLAZAMIENTO, VIGAS DE SOPORTE PARA EL VOLANTE. 117

FIGURA 65. FACTOR DE SEGURIDAD, VIGAS DE SOPORTE PARA EL VOLANTE. FUENTE PROPIA 118

FIGURA 66. REACCIONES GENERADAS EN LAS RESTRICCIONES, VIGAS DE SOPORTE DEL VOLANTE. 119

FIGURA 67. VIGAS ENSAMBLADAS CON ADHESIVO LOCTITE. FUENTE PROPIA. 120

FIGURA 68. LOCTITE® HY 4070™ LOCTITE. FUENTE LOCTITE. 120

FIGURA 69. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN, ENSAMBLE DE VIGAS AL MARCO. 121

FIGURA 70. REACCIONES GENERADAS EN LAS RESTRICCIONES, VIGAS DEL MARCO. 122

FIGURA 71. BRIDA DE ACOPLE ENSAMBLADA CON ADHESIVO LOCTITE. . 123

FIGURA 72. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN, ENSAMBLE DE BRIDA AL MARCO. 124

FIGURA 73. REACCIÓN GENERADA EN LA RESTRICCIÓN, BRIDA DE ACOPLE.… 125

FIGURA 74. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN, BRIDA DE ACOPLE. 126

FIGURA 75. ESFUERZO DE VON MISES Y FACTOR DE SEGURIDAD, BRIDA DE ACOPLE. 127

FIGURA 76. DESPLAZAMIENTO, BRIDA DE ACOPLE. 128

FIGURA 77. REACCIONES GENERADAS EN LAS RESTRICCIONES, BRIDA DE ACOPLE. 129

RESUMEN

Este proyecto propondrá diseñar una compuerta hidráulica tipo guillotina utilizando plástico reciclado (Polipropileno), con un enfoque en analizar sus comportamientos mecánicos. La iniciativa destaca su compromiso ambiental al emplear materiales reciclados, contribuyendo así a prácticas más sostenibles. Después, se llevará a cabo un análisis mediante elementos finitos para presentar un diseño óptimo de la compuerta hidráulica.

Un aspecto clave es resaltar que este diseño podría llegar a implementarse en varias industrias, además se proyecta a que sea más económico de fabricar u obtener en comparación con las compuertas hidráulicas convencionales de materiales metálicos.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Es factible sustituir el material utilizado en las compuertas hidráulicas metálicas por compuertas fabricadas con plástico reciclado?

Este cambio no solo podría ofrecer ventajas en términos de sostenibilidad ambiental al utilizar materiales reciclados, sino que también podría tener implicaciones en la reducción de costos de fabricación, haciendo que el diseño sea más accesible desde el punto de vista económico. Sin embargo, es crucial llevar a cabo un análisis detallado de los comportamientos mecánicos y la eficiencia del nuevo diseño para garantizar su viabilidad y rendimiento adecuado en diversas condiciones operativas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar una compuerta hidráulica tipo guillotina en polipropileno reciclado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los parámetros de diseño.
- Diseñar la compuerta según los parámetros establecidos.
- Analizar y validar el diseño estructural de la compuerta hidráulica mediante elementos finitos.
- Realizar planimetría detallada del ensamble y sus piezas.
- Elaborar un manual de montaje y operación.
- Generar una tabla de costos de fabricación y los materiales a utilizar.

3 JUSTIFICACION

La generación de energía en Colombia depende en muy alto porcentaje de fuentes hídricas, según la empresa colombiana de electricidad Enel, este tipo de energía corresponde al 66% de recursos hídricos, mientras que el 30% viene de recursos térmicos como el gas, carbón, fueloil y combustóleo y el 4% restante de otras fuentes.

Ahora bien, Colombia tiene un privilegiado contexto geográfico que le permite usar los recursos hídricos suficientes para realizar grandes megaproyectos de energía hidroeléctrica. Según la asociación colombiana de generadores de energía eléctrica (Acolgen), el país cuenta con 33 centrales hidroeléctricas que tienen la capacidad de producir alrededor de 19.000 megavatios. La justificación de este problema de diseño y selección de material se basa en varios puntos claves que destacan la importancia de investigar y abordar el diseño de una compuerta hidráulica de plástico reciclado. Los argumentos son los siguientes:

- **Costos Relevantes**: La inversión en compuertas metálicas hidráulicas es considerable, y los costos asociados no se limitan a la adquisición inicial, sino que también incluyen gastos continuos de mantenimiento y reemplazo. Es importante destacar que cualquier mejora en la eficiencia y vida útil de las compuertas puede generar ahorros significativos a lo largo del tiempo. En comparación con las compuertas hidráulicas de plástico reciclado,

fabricantes como MaderPlast, Plásticos Estructurales S.A.S y Green Plastic Colombia, señalan que estas no requieren un alto mantenimiento, como decapado y pasivado, no generan bacterias y prescinden del uso de anticorrosivos, recubrimientos y otros complementos comúnmente utilizados en las compuertas de acero. Se deben hacer las cotizaciones para evaluar en qué casos puede ser viable fabricar las compuertas de plástico reciclado.

- **Innovación Tecnológica**: La implementación de esta tecnología llega a reemplazar ciertas aplicaciones del acero y a darle un nuevo uso a los plásticos desechados y lograr un impacto ambiental positivo lo que podría llevar a soluciones más efectivas y sostenibles. En Bogotá se recicla unos 2 millones de toneladas al año según un reporte informativo del diario El Tiempo; por esta cantidad de material reciclado se podría considerar implementar el proyecto, ya que no sería muy complicado obtener la materia prima para fabricar los componentes de la compuerta para operar.

- **Contribución al Conocimiento**: Este proyecto tiene como finalidad poder llegar a contribuir al conocimiento en el campo de la ingeniería mecánica al proporcionar datos y resultados concretos sobre el uso de los plásticos reciclados en compuertas hidráulicas de tipo guillotina con la idea que se llegue a pensar en ideas sostenibles para el diseño mecánico a futuro y buscando la innovación en los campos de la ingeniería.

4 MARCO TEORICO

La construcción de compuertas hidráulicas estuvo estrechamente relacionada con el desarrollo de los sistemas de riego, abastecimiento de agua y navegación fluvial. En los primeros tiempos de la ingeniería hidráulica, el agua se retenía mediante pequeñas presas y se conducía a canales de riego laterales. (P. Erbisti, 2004)

Desde la antigüedad, el ser humano ha buscado dominar la fuerza del agua para su beneficio. Las primeras represas, construidas con pilares de madera o piedra, fueron un hito en esta relación. Sin embargo, con el tiempo, la necesidad de mayor seguridad y flexibilidad llevó a la invención de las represas móviles. Estas ingeniosas estructuras podían ser retiradas para permitir el paso del exceso de agua durante las crecidas, evitando inundaciones y daños. Un ejemplo notable es el canal Little Falls, construido en 1795 y convertido en el primer canal con esclusas de Estados Unidos. Las represas móviles son un testimonio del ingenio humano en su constante búsqueda por controlar y aprovechar los recursos naturales.

4.1 COMPUERTAS HIDRÁULICAS

Las compuertas son equipos mecánicos utilizados para el control de flujos de agua, control de inundaciones, proyectos de irrigación, crear reservas de agua, sistemas de drenaje, proyectos de aprovechamiento de suelo, plantas de tratamiento de agua, incrementar capacidad de reserva de las represas, etc. (Mera, 2015). Actualmente existen varios tipos de compuertas hidráulicas:

- **Deslizantes:** Las puertas deslizantes son un tipo de compuerta fundamental en el manejo del agua. Su funcionamiento se basa en una hoja móvil que se desliza sobre guías laterales, permitiendo un control preciso del flujo de agua. Su simplicidad y seguridad, junto con un bajo mantenimiento, las convierten en una opción ampliamente utilizada en diversos sistemas hidráulicos, como canales de riego, depuradoras, desagües de fondo y pequeñas tomas y aliviaderos de embalses.



Figura 1. Compuerta deslizante. Fuente Regaber https://regaber.com

- **Segmento:** Las compuertas de segmento, como una porción curva de un cilindro, son elementos clave en presas, canales e instalaciones hidráulicas para regular el paso del agua. Su funcionamiento se basa en una placa de revestimiento curva sostenida por brazos radiales que la apoyan sobre cojinetes fijos. Esta disposición permite que la fuerza del agua actúe directamente sobre el punto de giro, evitando aperturas o cierres accidentales. (P. Erbisti, 2004)

En algunos casos, la puerta se eleva con un cabrestante gracias a un ingenioso diseño donde el centro de curvatura se ubica por encima del eje de rotación. Para facilitar aún más su operación, algunas instalaciones incorporan contrapesos en los brazos opuestos a la hoja, permitiendo su apertura y cierre con un mínimo de energía

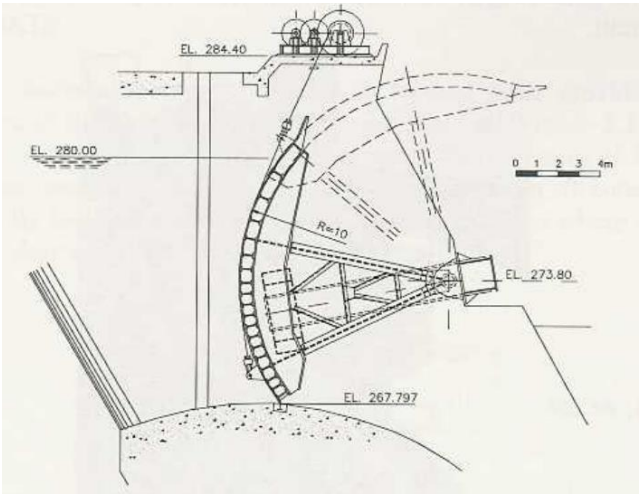


Figura 2. Compuerta de Segmento. Fuente (P. Erbisti, 2004)

- **Oruga:** Las puertas oruga se distinguen por su hoja móvil sostenida por vigas verticales a los lados. Alrededor de estas vigas, se encuentran trenes de rodillos continuos que permiten el desplazamiento de la puerta con mínima fricción. Esta característica, junto a su alta capacidad de carga, las convierte en una opción ideal para instalaciones de gran altura donde se requiere un cierre automático por su propio peso. (P. Erbisti, 2004)

Ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia y rendimiento, especialmente en aplicaciones de gran altura. La decisión final sobre el tipo de puerta a utilizar dependerá de las necesidades específicas de cada proyecto.

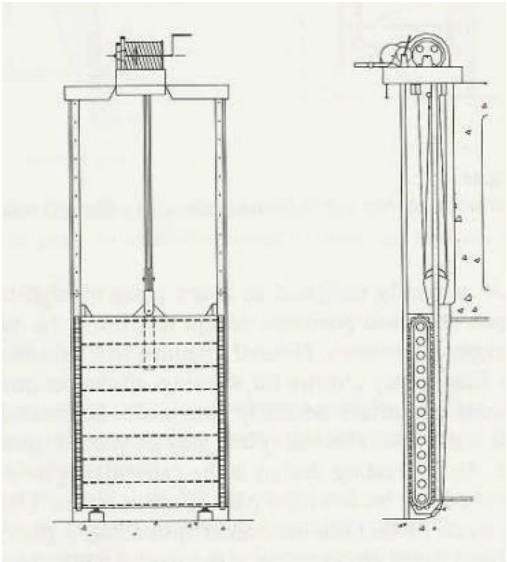


Figura 3. Compuerta tipo Oruga. Fuente (P. Erbisti, 2004)

- **Stoney:** Las compuertas Stoney, también conocidas como compuertas de vagón o compuertas tractoras, son un tipo de compuerta hidráulica utilizada para controlar el flujo de agua en canales, presas y otras estructuras hidráulicas. Se caracterizan por su diseño robusto y su capacidad para manejar grandes caudales de agua.



Figura 4. Compuerta Stoney. Fuente (P. Erbisti, 2004)

- **Basculante:** Puede ser utilizada tanto en la cima del vertedero de una presa como instalado en el fondo de un rio o canal. Por lo general se ubica en el fondo de un rio o canal por la ubicación del gato hidráulico y debido al mismo peso de la compuerta. (E. Dávila, 2005)

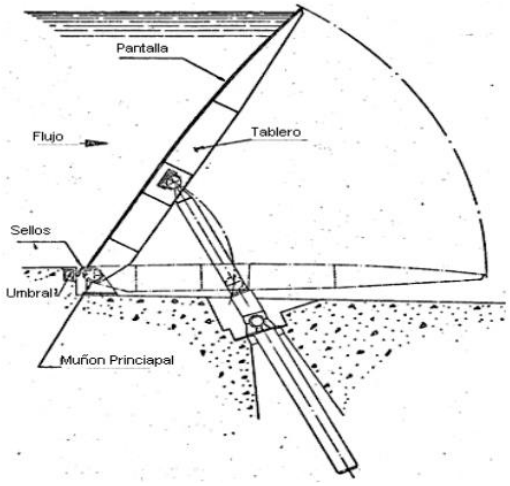


Figura 5. Compuerta Basculante. Fuente (E. Dávila, 2005)

4.2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE DISEÑOS DE COMPUERTAS

La principal tarea para el ingeniero a cargo del diseño es la selección del tipo de compuerta y su diseño básico deben estar debidamente soportados para asegurar la confiabilidad del equipo y de la estructura hidráulica de la que hacen parte. Una vez se haya determinado el tipo de compuerta, es necesario hacer el dimensionamiento (ancho y alto). Este dimensionamiento es función del caudal, de la presión hidrostática y del tipo de compuerta seleccionado. Como regla general, entre mayor sea la presión hidrostática sobre el tablero de la compuerta, menores deberán ser las dimensiones generales de la misma, aunque su estructura deberá ser más robusta.

Por ejemplo, en la figura 6, se indica la relación entre el área máxima de la compuerta en metros cuadrados y la presión hidrostática para: a) compuertas radiales, b) compuertas de vagón, c) compuertas de oruga, d) compuertas deslizantes.

Esta gráfica indica los límites de área vs presión hidrostática, que se han recopilado de experiencias de fabricantes en el mundo. (P. Erbisti, 2004)

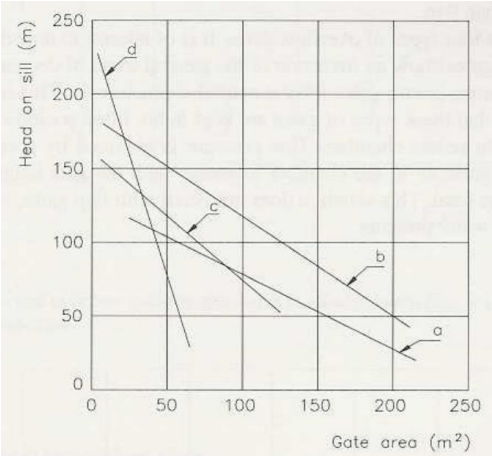


Figura 6. Límites de área vs presión hidrostática (P. Erbisti, 2004)

4.3 EQUIPO DE ACCIONAMIENTO

Después de la selección y el dimensionamiento básico de las compuertas, debemos determinar la configuración de su equipo de accionamiento y elementos asociados. El equipo de accionamiento se refiere al mecanismo que opera la compuerta en su carrera de apertura y cierre. Algunos ejemplos de estos elementos son los tornillos sin fin, cables, cadenas, servomotores hidráulicos, grúas pórtico, entre otros. En este caso, la selección del tipo de accionamiento de la compuerta está condicionado principalmente por las fuerzas de operación, sin embargo, se deben tener en cuenta otros factores como la disponibilidad de suministro eléctrico, la frecuencia de operación de la compuerta, la posibilidad de mantenimiento, entre otros.

Así mismo, el diseño básico debe acotar apropiadamente la configuración de los elementos asociados a la compuerta, tales como las guías metálicas, sellos,

vástagos, sistemas de entrabamiento, entre otros accesorios que hacen parte de la configuración típica de una compuerta. (Integral Ingenieros, 2011)

4.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Es fundamental tener en cuenta las diversas condiciones de servicio o de funcionamiento de la compuerta, en condiciones normales y de emergencia, las condiciones de apertura y de cierre. Así mismo, deberán tenerse en cuenta las necesidades de aireación, los fenómenos de cavitación que puedan producirse y sus efectos como, también, las vibraciones inducidas por el flujo y las velocidades máximas recomendadas aguas abajo de la compuerta. El análisis de estas variables es fundamental. Por lo tanto, durante el diseño de una compuerta hidráulica se deberán cuantificar todos los fenómenos hidrodinámicos que se generan durante su operación, utilizando herramientas como la dinámica de fluidos computacional (CFD) y el análisis estructural utilizando el método de los elementos finitos (FEA).

4.5 PLÁSTICOS RECICLABLES

La generación de residuos y su manejo adecuado son dos de los grandes retos que enfrentan la sociedad actual para garantizar su viabilidad y sustentabilidad. Existen diferentes estrategias para manejarlos, que buscan disminuir su cantidad y los impactos que generan en el ambiente. La mejor opción es la reducción, es decir, el modificar los procesos, actividades y patrones de consumo, de forma que se disminuya la generación de residuos. A esta opción le siguen la reutilización, el

reciclaje, la valorización energética, el tratamiento y la disposición en rellenos sanitarios. (Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C [ANIPAC])

La cantidad de plásticos en los residuos ha crecido continuamente en las últimas décadas, debido en gran parte a su uso en productos desechables. Se estima que el 50% de los plásticos producidos son de un solo uso, entre el 20% y el 25% se utilizan en la construcción, y el resto en productos como electrónicos, muebles y vehículos.

Los plásticos con mayor presencia en los residuos son el polietileno y el tereftalato de polietileno (PET), debido a que representan la mayor proporción en los envases y embalajes (P. Subramanian, 2000)

Para poder reciclar los plásticos hay que conocer su estructura y comportamiento. La propiedad más destacada es su comportamiento a la temperatura este comportamiento permite clasificarlos en termoplásticos, termofijos y elastómeros. Los termoplásticos se funden al estar sometidos al calor y pueden adoptar nuevas formas. “El 80% de los plásticos que se producen son termoplásticos es decir que la mayoría de los plásticos son reciclables” (Al-Salem et al, 2009.)

Los termoplásticos se dividen en dos grupos:

- **Commodities**: Son plásticos de bajo costo que se fabrican en grandes cantidades, por lo que son empleados principalmente para productos de vida corta o un solo uso. Dentro de este grupo están los polietilenos (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), polietileno tereftalato (PET) y sus copolímeros.

- **Composites:** También conocidos como plásticos de ingeniería, estos tienen mejores propiedades mecánicas, resistencia al calor y al impacto. Su costo llega a ser entre 2 y 20 veces comparado con los Commodities, se fabrican con la finalidad de garantizar una vida útil entre 1 a 3 años.

La separación es un paso básico en cualquier proceso de reciclaje, y de ella depende en gran medida la calidad de los nuevos productos que se fabricarán. En 1988 la Sociedad de la Industria de los Plásticos (SPI, por su sigla en inglés) propuso un código en el que se asignó a los Commodities más importantes un número de identificación y ha sido adoptado en todo el mundo, y se aplica a los productos plásticos por medio de impresiones o incluso en el molde en que se fabrica el producto. (ANIPAC)



Figura 7. Códigos de identificación de plásticos. Fuente (ANIPAC)

4.6 SOFTWARE INVENTOR

Inventor es una herramienta de diseño 3D indispensable para ingenieros y diseñadores que buscan crear productos de alta calidad. Con Inventor, es posible dar vida a ideas desde la fase conceptual hasta la producción, gracias a sus potentes capacidades de modelado, simulación y documentación. Crea modelos tridimensionales detallados de piezas y ensamblajes, capturando cada detalle de forma precisa.

La herramienta permite trabajar con geometría paramétrica, lo que significa que se puede modificar fácilmente un diseño y ver cómo se actualizan todas las vistas relacionadas. También antes de fabricar un producto, se puede simular su comportamiento en un entorno virtual. Permite realizar análisis estructurales para evaluar la resistencia de piezas y/o componentes bajo diferentes tipos de cargas, así como simulaciones de movimiento para verificar el funcionamiento de mecanismos y ensamblajes.

Una vez que se finaliza el modelo 3D, Inventor permite generar automáticamente dibujos técnicos de alta calidad en 2D y 3D. Estos dibujos incluyen vistas ortográficas, secciones, detalles y cotas, y son esenciales para la fabricación y la documentación del diseño y/o producto.

4.7 NORMATIVIDAD

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en conjunto con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, mediante Resolución, establecieron un código de

colores unificado para la separación de residuos en la fuente, que deberá adoptarse en todo el territorio nacional a partir del primero de enero de 2021. (Ministerio de ambiente de Colombia [Minambiente])

El Ministerio de ambiente expidió la Resolución No. 2184 de 2019, mediante la cual empezó a regir en el 2021, el código de colores blanco, negro y verde para la separación de residuos en la fuente, de la siguiente manera:

- **Color blanco:** Para depositar los residuos aprovechables como plástico, vidrio, metales, papel y cartón.
- **Color negro:** Para depositar residuos no aprovechables como el papel higiénico; servilletas, papeles y cartones contaminados con comida; papeles metalizados, entre otros.
- **Color verde:** Para depositar residuos orgánicos aprovechables como los restos de comida, desechos agrícolas etc.

Este código de colores debe ser adoptado por los municipios o distritos que adelanten programas de aprovechamiento conforme a sus Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) y permitirá simplificar la separación en la fuente en los hogares, preparando al país para el desarrollo e implementación de nuevos esquemas de aprovechamiento, en dónde se unifiquen los esfuerzos entre todos los actores de la cadena. (Minambiente)

4.7.1 Norma NBR-8883

La norma técnica brasileña NBR 8883 establece los requisitos fundamentales para el diseño y fabricación de compuertas hidráulicas. Esta normativa, elaborada por la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT), es una referencia clave en el sector de la ingeniería hidráulica, especialmente para aquellos involucrados en el diseño y construcción de grandes obras hidráulicas como represas, canales y sistemas de riego.

La NBR 8883 abarca una amplia gama de aspectos relacionados con las compuertas hidráulicas, incluyendo su cálculo estructural, los materiales a utilizar, los procesos de fabricación y los sistemas de control. La norma detalla los criterios de diseño para garantizar la seguridad, durabilidad y eficiencia de las compuertas, considerando factores como las cargas hidráulicas, las condiciones ambientales y los requisitos de operación. Además, la NBR 8883 proporciona directrices para la inspección y el mantenimiento de las compuertas, asegurando así su correcto funcionamiento a lo largo de su vida útil.

4.7.2 AWWA C561

La norma AWWA C561 es el estándar de referencia a nivel internacional para el diseño y fabricación de compuertas de acero inoxidable. Esta norma, desarrollada por la American Water Works Association (AWWA), establece los requisitos técnicos y de calidad que deben cumplir las compuertas de acero inoxidable utilizadas en sistemas de suministro de agua potable y aguas residuales. La AWWA C561 cubre

una amplia gama de aspectos, desde la selección de los materiales adecuados, como los tipos de acero inoxidable permitidos, hasta los procesos de fabricación y las pruebas de calidad que deben realizarse para garantizar la durabilidad y el funcionamiento seguro de las compuertas.

Esta norma es de gran importancia para la industria de la construcción y el mantenimiento de sistemas hidráulicos, ya que proporciona un marco de referencia común para asegurar la calidad y la confiabilidad de las compuertas de acero inoxidable. Al cumplir con los requisitos establecidos en la AWWA C561, se garantiza que las compuertas puedan soportar las condiciones de servicio a las que serán sometidas, como la presión del agua, los cambios de temperatura y los ciclos de apertura y cierre. Además, esta norma contribuye a la seguridad de las personas y la protección del medio ambiente al asegurar que las compuertas no se corroan ni se deformen, evitando así posibles fugas y contaminaciones.

4.7.3 DIN 19704

La norma DIN 19704 es una referencia fundamental en el diseño y construcción de estructuras hidráulicas de acero. Esta norma técnica alemana establece los requisitos y criterios necesarios para garantizar la seguridad, durabilidad y eficiencia de estas estructuras, que son ampliamente utilizadas en proyectos de ingeniería civil como presas, canales, esclusas y otras obras hidráulicas.

La DIN 19704 abarca una amplia gama de aspectos, desde el diseño estructural y la selección de materiales hasta la fabricación y la inspección de las estructuras.

Esta norma considera los diferentes tipos de cargas a las que están sometidas las estructuras hidráulicas, como las cargas hidrostáticas, hidrodinámicas y sísmicas, y establece los métodos de cálculo y análisis estructurales adecuados para cada caso. Además, la DIN 19704 define los requisitos de calidad para los materiales utilizados, como los aceros estructurales, y especifica los procedimientos de soldadura y otros procesos de fabricación.

5 ANTECEDENTES

Los aspectos por revisar para realizar este documento están ligados principalmente con estudios o implementaciones de compuertas hidráulicas en Colombia o en otros lugares fabricadas con materiales no convencionales, Indicando su razón de su estudio, además de sus resultados. Uno de los documentos implicados es de Suarez (2019). Universidad EAFIT, en su tesis “Caso de estudio: cierre de compuerta de aducción en condiciones de contingencia del proyecto hidroeléctrico Ituango”, dicha central hidroeléctrica en su infraestructura cuenta con ocho compuertas hidráulicas en acero inoxidable diseñadas según la norma DIN 19704/1976, para un cierre contra flujo de 177 m3/s, para soportar con una operación de embalse 420 msnm. Con unas medidas nominales de 6.8 m x 5 m y un peso aproximado de 850 KN. Estas compuertas permiten el flujo hacia los ocho grupos de turbinas en el cuarto de máquinas. Otro estudio que implementa compuertas hidráulicas es de los autores Silva & Pulido (2017). Universidad Católica, en donde realizan la “evaluación hidráulica del funcionamiento de las compuertas usadas en el canal de Panamá para adaptarlas en el sistema fluvial del canal del dique”, dicho canal es una de las principales vías fluviales del país, cuenta con 113 kilómetros en total, iniciando en Calamar y desembocando en la Bahía de Cartagena. Su caudal abastece acueductos, además de servir como distritos de riego para las ciénagas aledañas. No obstante, mencionan los autores “en la actualidad el canal ha presentado grandes problemas estructurales al no contar con

una regulación de caudal y entrada de sedimentos, lo que afecta la comunidad y deteriora el medio ambiente, puesto que en la desembocadura del canal se presenta contaminación" (Silva & Pulido, 2017).

El objetivo principal de los autores era evaluar el funcionamiento hidráulico de las compuertas actuales en el Canal de Panamá para determinar la opción técnica más adecuada y adaptarlas a las esclusas del Canal del Dique en Colombia. Según el documento, la mejor opción de compuertas es del tipo rodantes, En términos de facilidad de mantenimiento, estas compuertas simplifican la operación. Además, este diseño minimiza las filtraciones. Como su estructura es hueca, transfieren el peso a la base del canal, que soporta al menos una décima parte del peso total de la compuerta. Esto se fundamenta en el principio de Arquímedes, lo que facilita la apertura y cierre de las compuertas al reducir la carga que deben mover los motores. No obstante, todas las compuertas mencionadas anteriormente tienen como material principal el acero (ya sea inoxidable o galvanizado), ya que es la opción más común, pero existe otro material usado en la industria llamado FRP (compuestos de polímeros reforzados). Mencionan Vijay, Piyush, Hota, Richard y Clarkson (2016) en su artículo "desing and evaluation of an integrated FRP composite wicket gate" sobre la USACE, la cual se encarga de operar y mantener en estados unidos gran variedad de infraestructuras de navegación y control de inundaciones, en una longitud de alrededor de 19.000 km. Dicha organización estimó que, para el año del 2020, eran necesarios más de 13.000 millones de

dólares para el mantenimiento y rehabilitación de las estructuras de compuertas y presas a causa de su deterioro por corrosión. Debido a los altos costos de mantenimiento se interesaron en los compuestos de polímeros reforzados, ya que este reduciría su mantenimiento, por su alta resistencia a la corrosión.

Además, según Vijay, Hota y Udaya (2014), “los FRP se consideran una de las mejores alternativas al acero y la madera para reemplazar las compuertas hidráulicas en esclusas y presas debido a su excelente resistencia a la fatiga y al desgaste junto con su alta durabilidad” Otro documento que habla sobre la implementación del material FRP en compuertas hidráulicas es “worldwide overview of composite applications for waterway infrastructure” de los autores Ruifeng, Hota y Clarkson (2019), la empresa FiberCore Europe ha implementado varios proyectos de compuertas en los países bajos, algunas se construyeron en los años 1999 y 2002, cada una con 3 metros de ancho y 6 metros de alto. Las compuertas al momento de ser escrito el artículo responden a un comportamiento correcto y sin presencia de corrosión. Dichas compuertas se fabricaron mediante el moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) con bajo contenido de huecos, por ende, su costo inicial es principalmente más bajo que la fabricación con materiales convencionales como acero, madera o concreto. Además, el FRP brinda una mayor durabilidad y proporciona mayor resistencia a la corrosión. En Colombia hay algunas empresas que han implementado alternativas diferentes al acero para la fabricación de compuertas hidráulicas, tal es el caso de Maderplast S.A, la cual

fabrica diferentes tipos de compuertas con polipropileno de alta densidad, asegurando ventajas como resistencia a los impactos, menor densidad respecto al acero, un sistema de izaje auto lubricante. Además, resistencia a la corrosión y abrasión, eliminando la necesidad de recubrimientos protectores y mantenimientos periódicos. En un video de su página web, Maderplast (2023) muestran que uno de sus proyectos fue el desarrollo de cuatro compuertas hidráulicas deslizantes tipo guillotina para el caño el salado, en la ciénega grande de Santa marta. Cada compuerta cuenta con unas dimensiones de 8 m x 2.8 m, con un sistema de apertura manual utilizando un volante y un husillo. De igual manera, la empresa Plásticos estructurales, ofrece los servicios de diseño y fabricación en el campo hidráulico para compuertas en ambientes con altas exigencias estructurales, como en plantas de tratamiento de agua, donde están expuestas a fuertes químicos, usando como material base polipropileno.

6 DELIMITACIÓN DEL MARCO CONCEPTUAL

6.1 ESTADO DEL ARTE

El estado del arte es un pilar fundamental en cualquier investigación académica. Al construir sobre los conocimientos existentes, evitamos duplicar esfuerzos y aportar nuevos conocimientos a nuestro campo. Esta revisión bibliográfica exhaustiva no solo delimita el objeto de estudio, sino que también proporciona un marco teórico sólido para la investigación.

6.1.1 Momento Heurístico

Buscando para lograr tener una base sólida en los repositorios institucionales y de la web, se hace la búsqueda de trabajos de grados que dentro de su finalidad tengan una relación teórica-practica sobre el tema que se propone en este trabajo. Dentro de la consulta, se han encontrado 17 documentos de diferente tipología, los cuales son resumidos en la tabla 1.

N°	Nombre	Institución	Area	Tipo	Año
1	MANUAL DEL INGENIERO	EJERCITO DE EE.UU	DISEÑO	MANUAL	2000
2	DISEÑO DE COMPUERTAS HIDRAULICAS	EDITORIAL KRIPS	DISEÑO	BIBLIOGRAFIA	2004
3	DISEÑO DE UNA COMPUERTA HIDRÁULICA TIPO SEGMENTO PARA UN NIVEL MÁXIMO DE AGUAS ARRIBA DE 2 M Y UN NIVEL MÁXIMO DE AGUAS ABAJO DE 2,30 M.	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	TESIS	2005
4	EL RECICLAJE DE LOS PLASTICOS	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA	AMBIENTAL	INVESTIGACIÓN	2008
5	CARACTERIZACIÓN DEL POLIPROPILENO RECICLADO DISPONIBLE A PARTIR DE TAPAS, PARA REINCORPORARLO EN PROCESOS PRODUCTIVOS, MEZCLADO CON POLIPROPILENO VIRGEN	UNIVERSIDAD EAFIT	PRODUCCIÓN	TESIS	2014
6	COMPUESTOS AVANZADOS PARA EL DISEÑO Y REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS	WEST VIRGINIA UNIVERSITY	DISEÑO	TESIS	2014
7	RECICLADO DE POLIPROPILENO	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO	CONSTRUCCIÓN	TESIS	2016
8	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PUERTA DE ENTRADA DE MATERIAL COMPUESTO DE FRP INTEGRADO	WEST VIRGINIA UNIVERSITY	INVESTIGACIÓN	ARTICULO	2016
9	EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS COMPUERTAS USADAS EN EL CANAL DE PANAMÁ PARA ADAPTARLAS EN EL SISTEMA FLUVIAL DEL CANAL DEL DIQUE	UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA	INVESTIGACIÓN	TESIS	2017
10	CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BALDOSA PARA PISO USANDO PLÁSTICO PET RECICLADO Y CASCARILLA DE ARROZ, UNA INNOVACIÓN EN ECUADOR	UNIVERSIDAD LAICA VICENTE ROCAFUERTE	CONTRUCCIÓN	INVESTIGACIÓN	2017
11	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRAL PARA EL RECICLADO DE POLIPROPILENO PARA LA CREACIÓN DE NUEVOS PRODUCTOS	UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE TAMAULIPAS	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	ARTICULO	2018
12	DISEÑO DE UNA COMPUERTA HIDRÁULICA TIPO CLAPETA PARA REGULAR EL NIVEL DE EMBALSE PARA LAS TURBINAS STREAMDRIVER PARA LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA HER 1-LIMA	UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DEL PERÚ	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	TESIS	2018
13	CASO DE ESTUDIO: CIERRE DE COMPUERTA DE ADUCCIÓN EN CONDICIONES DE CONTINGENCIA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO	UNIVERSIDAD EAFIT	MECANICA DE FLUIDOS	TESIS	2019
14	PANORAMA MUNDIAL DE APLICACIONES DE MATERIALES COMPUESTOS PARA INFRAESTRUCTURAS DE VÍAS NAVEGABLES	WEST VIRGINIA UNIVERSITY	DISEÑO	INVESTIGACIÓN	2019
15	COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TRACCIÓN DEL COMPUESTO POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD Y POLIPROPILENO RECICLADO	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	INVESTIGACIÓN	ARTICULO	2020
16	EFECTO DE LA TEMPERATURA DE PROCESAMIENTO Y LA PROPORCIÓN DE POLIPROPILENO VIRGEN-RECICLADO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE PROBETAS MOLDEADAS POR	UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	TESIS	2023
17	PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE RECICLADOS DE PLÁSTICOS PRODUCIDOS EN ECUADOR COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR	INVESTIGACIÓN	ARTICULO	2023

Tabla 1. Momento heurístico. Fuente propia

6.1.2 Momento hermeneútico

Durante el desarrollo del momento heurístico, se recopilaron fuentes de consulta en los principales temas que abarcan el presente trabajo de grado. Esto con el fin de tener información que contribuya a complementar el desarrollo de este.

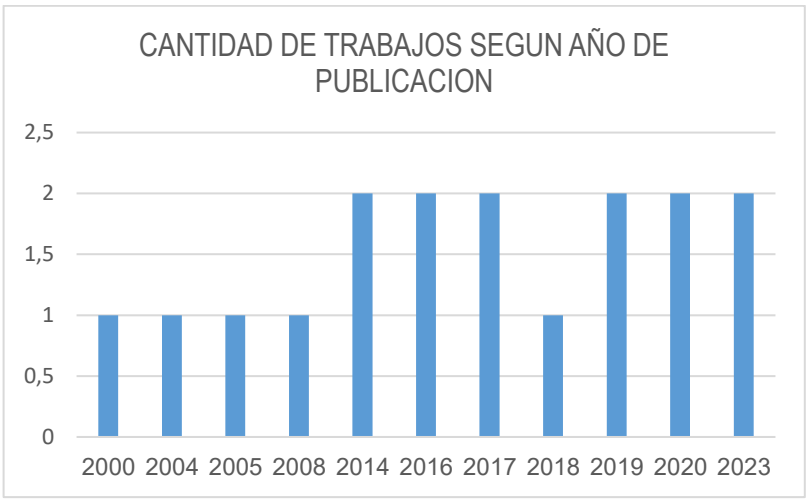


Figura 8. Cantidad de trabajos según año de publicación. Fuente propia

Al analizar el tiempo y el número de publicaciones de los documentos, se evidencia que la investigación y análisis de las compuertas hidráulicas está en curso desde hace más de dos décadas, esto beneficia la investigación ya que hay una amplia gama de información y evolución en dicho campo.

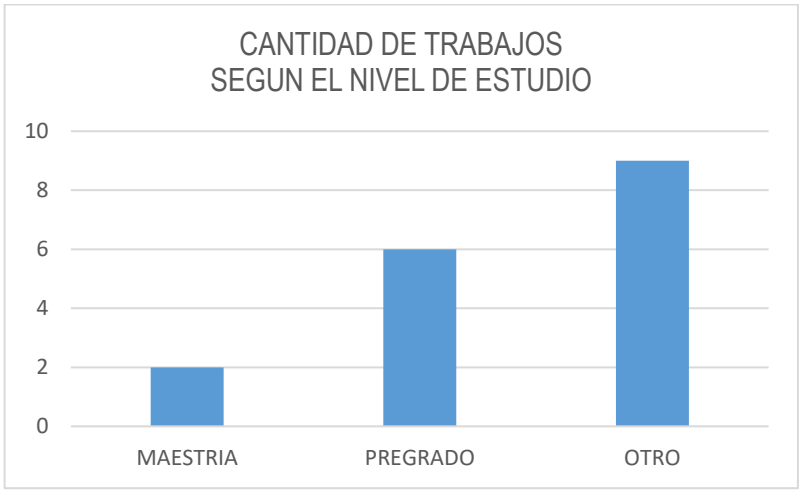


Figura 9. Cantidad de trabajos según el nivel de estudio. Fuente propia

En su mayoría se tiene información de trabajos como artículos de investigación y pregrados, lo que podría facilitar la comprensión e implementación de su contenido al documento.

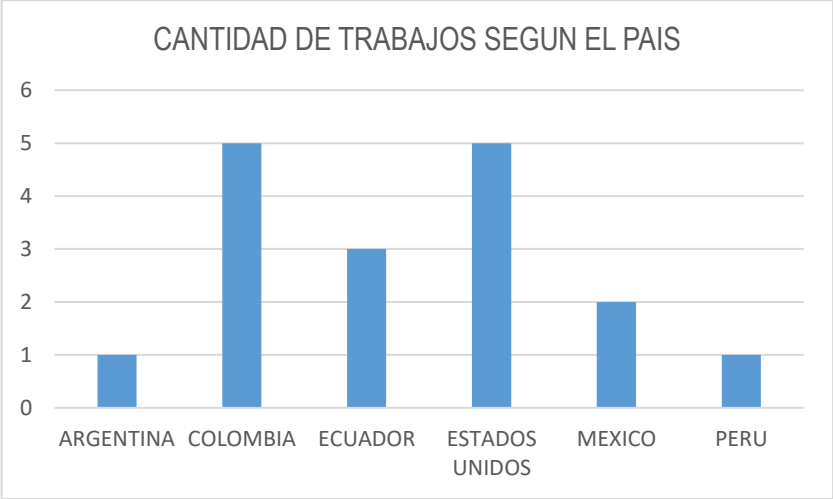


Figura 10. Cantidad de trabajos según el país. Fuente propia

La mayoría de la información se concentra en países de América Latina, lo que permite identificar ciertos criterios operativos que podrían pasarse por alto en naciones de otros continentes. No obstante, también se posee información de un país de primer mundo, el cual se encuentra más avanzado tecnológicamente y permite ampliar la visión al momento de desarrollar la investigación.

6.2 MARCO REFERENCIAL

Esta fase del proyecto reúne los requisitos normativos, técnicos y conceptuales para tener en cuenta para el desarrollo básico del diseño de la compuerta hidráulica.

6.2.1 Requisitos normativos

Colombia, al igual que muchos países de Latinoamérica, no cuenta con una norma específica y detallada para el diseño y fabricación de compuertas hidráulicas a nivel nacional. Esto no significa que no existan regulaciones, sino que éstas suelen estar dispersas en diferentes códigos de construcción, guías técnicas y especificaciones particulares de cada proyecto.

¿Por qué no existe una norma colombiana específica?

Varios factores pueden explicar esta situación:

- **Variedad de aplicaciones:** Las compuertas hidráulicas se utilizan en una amplia gama de aplicaciones (hidroeléctricas, riego, control de inundaciones, etc.), cada una con requerimientos específicos.
- **Evolución tecnológica:** La tecnología en este campo avanza rápidamente, lo que dificulta mantener una norma actualizada.
- **Falta de unificación:** A menudo, las decisiones sobre los estándares a seguir se toman a nivel de proyecto, considerando las recomendaciones de fabricantes, consultores y las normas internacionales.

Ante la ausencia de una norma nacional específica, los ingenieros y constructores en Colombia suelen recurrir a normas internacionales que establecen requisitos generales para el diseño y fabricación de compuertas hidráulicas. Algunas de las normas más utilizadas son:

6.2.1.1 Norma Brasileña NBR 8883

Esta norma es ampliamente utilizada en Latinoamérica, ya que establece criterios detallados para el diseño, fabricación y control de compuertas hidráulicas.

6.2.1.2 Normas europeas (EN)

Las normas europeas, aunque desarrolladas para el mercado europeo, son frecuentemente consultadas como referencia debido a su alto nivel de detalle y exigencia. Las más consultadas son la EN 1991, 1992 y 1993.

6.2.1.3 Normas ASTM

La American Society for Testing and Materials ofrece una variedad de normas relacionadas con materiales y métodos de prueba aplicables al diseño de compuertas.

No existe una norma específica a nivel internacional que aborde el diseño de compuertas hidráulicas o componentes mecánicos utilizando exclusivamente plásticos reciclados. Esto se debe a varios factores, como la variedad de tipos de

plásticos reciclados, las propiedades mecánicas requeridas para cada aplicación y la falta de una amplia experiencia en el uso de estos materiales en este tipo de estructuras, es posible utilizar una combinación de normas existentes y buenas prácticas de ingeniería para desarrollar soluciones innovadoras y sostenibles que es lo que se busca lograr en este trabajo.

6.2.2 Requisitos Técnicos

El uso de plásticos reciclados en la construcción de compuertas hidráulicas es una tendencia emergente que ofrece beneficios ambientales y económicos. Sin embargo, es fundamental abordar ciertos requisitos técnicos para garantizar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de estas estructuras.

6.2.2.1 Selección del Plástico Reciclado

- **Propiedades mecánicas:** Resistencia a la tracción, compresión, flexión, impacto, fatiga y abrasión.
- **Resistencia química:** Resistencia a los agentes químicos presentes en el agua (ácidos, bases, sales) y a los rayos UV.
- **Estabilidad dimensional:** Mínima variación dimensional ante cambios de temperatura y humedad.
- **Densidad:** Influye en el peso de la compuerta y en su flotabilidad.

6.2.2.2 Diseño estructural

- **Análisis de esfuerzos:** Calcular las cargas máximas a las que estará sometida la compuerta (hidrostática, hidrodinámica, viento, sismo).
- **Factor de seguridad:** Aplicar un factor de seguridad adecuado para garantizar la resistencia de la estructura.
- **Detalle de uniones:** Diseñar uniones seguras y estancas entre los diferentes componentes de la compuerta.

6.2.2.3 Fabricación

- **Control de calidad:** Implementar un sistema de control de calidad riguroso para garantizar la uniformidad del material y la correcta ejecución de la fabricación.
- **Uniones:** Utilizar métodos de unión adecuados (soldadura, adhesivos) para garantizar la resistencia y estanqueidad de las uniones.

6.2.2.4 Instalación

- **Ajuste:** Asegurar un ajuste preciso de la compuerta en su ubicación.
- **Sellado:** Utilizar sellados adecuados para evitar fugas.

6.2.2.5 Mantenimiento

- **Inspección periódica:** Realizar inspecciones periódicas para detectar posibles daños o deterioros.
- **Reparación:** Establecer procedimientos de reparación en caso de ser necesario.

6.2.3 Requisitos Conceptuales

Al hablar de requisitos conceptuales para el diseño de compuertas hidráulicas de plástico reciclado, nos referimos a los principios fundamentales y las consideraciones generales que deben tenerse en cuenta desde las primeras etapas de este proyecto. Estos requisitos van más allá de los aspectos técnicos específicos y abarcan factores como la sostenibilidad, la innovación y la adaptabilidad a las necesidades particulares de cada proyecto.

6.2.3.1 Principios Fundamentales

- **Sostenibilidad:** El diseño debe priorizar la reducción del impacto ambiental, optimizando el uso de materiales reciclados y minimizando la generación de residuos.
- **Innovación:** Se debe fomentar la búsqueda de soluciones creativas y originales, aprovechando las ventajas que ofrecen los plásticos reciclados en términos de diseño y funcionalidad.
- **Adaptabilidad:** El diseño debe ser flexible y adaptable a diferentes condiciones y requisitos, permitiendo su aplicación en una amplia gama de proyectos.
- **Seguridad:** La seguridad es un aspecto primordial. La compuerta debe garantizar la protección de personas y bienes, resistiendo las cargas y condiciones a las que estará sometida.

- **Durabilidad:** El diseño debe asegurar una larga vida útil de la compuerta, minimizando la necesidad de mantenimiento y reparaciones.
- **Costo-efectividad:** Se debe buscar un equilibrio entre la calidad, la durabilidad y el costo, considerando los beneficios a largo plazo de la inversión.

6.2.3.2 Tolerancia de especificación

Las especificaciones del proyecto deberán incluir disposiciones para garantizar una fabricación adecuada de conformidad con los requisitos del American National Standard Institute (ANSI), American Welding Society (AWS) D1.1 (1996) y AISC S303 (1992) para tolerancias de fabricación y montaje. También se deben incluir disposiciones para garantizar el funcionamiento adecuado de la compuerta. (P.V. Vijay, 2016)

- **Diseño de Acceso:** Los miembros deben estar ubicados para proporcionar suficiente acceso a los trabajadores y al equipo necesario para la fabricación, pintura e inspección. Debe haber suficiente acceso para los equipos de limpieza con chorro de arena, pintura, inspección y debe haber disposiciones (como trampillas de acceso y barandillas de seguridad) para proporcionar acceso al inspector a las áreas inspeccionadas con frecuencia. (P.V. Vijay, 2016). Si lo requiere

- **Lubricación:** La lubricación del muñón es una consideración de diseño primaria. La lubricación reduce la fricción del muñón para minimizar las fuerzas de elevación y las fuerzas de flexión en los miembros finales el marco. La superficie del pasador del muñón y el casquillo deben estar suficientemente lubricadas para el funcionamiento eficiente de una puerta. (P.V. Vijay, 2016).

7 PARAMETROS DE DISEÑO

Este capítulo está completamente regido a la Norma Brasileña NBR 8883:2008.

7.1 DOCUMENTOS

Según la norma se requieren los siguientes documentos:

a) Memorial de cálculo.

b) Dibujos de implantación del equipo en las obras civiles.

c) Dibujos de conjunto, subconjunto y de detalles de la compuerta y sus componentes.

d) Lista de materiales con la especificación de los materiales, sus cantidades y sus masas.

e) Manuales de montaje, operación, mantenimiento y de comisionamiento en el campo.

f) Especificación de protección anticorrosiva

g) Programa de inspección y control.

Para este proyecto los incisos **(a), (c) y (d)** son los desarrollados y el inciso **(e)** solo se desarrolló manual de montaje y operación.

7.2 MATERIALES

- La elección de los materiales para la construcción de las compuertas, así como aquella de los materiales de las soldaduras (si aplican) de enmienda

de las piezas, se deben determinar por las características de cada estructura y de las tensiones a que están sometidas.

Las constantes de los materiales empleados (módulo de elasticidad, límite de desagüe, etc.) deben ser tomadas de las normas de los respectivos materiales. Materiales no estandarizados deben tener sus características mecánicas comprobadas por medio de ensayos acompañados de la emisión de reporte de ensayo. Las propiedades físicas sobre el polipropileno se obtienen de diversos trabajos resumidos en la tabla 2.

N°	Nombre	Producto	Densidad [g/cm3]	Resistencia a flexion [Mpa]	Resistencia a traccion [Mpa]	Resistencia a compresion [Mpa]	Resistencia a cortante [Mpa]	Modulo de elast. A compresion [Mpa]	Modulo de elast. A flexion [Mpa]
1	Propiedades fisicas y mecánicas de reciclados de plásticos producidos en Ecuador como material de construcción	madera plástica utilizando tereftalato de polietileno (PET) reciclado de botellas y la adición de cáscara de arroz mediante un proceso de extrusión	1,21	15,84	21,94	20,91	2,41	1159,11	3308,5
2	Propiedades fisicas y mecánicas de reciclados de plásticos producidos en Ecuador como material de construcción	polipropileno reciclado de fundas de snacks, costales, entre otros residuos, como materia prima para producir madera plástica mediante el proceso de inyección.	0,97	17,02	15,11	22,43	2,88	750,63	951,69
3	Comportamiento mecánico a tracción del compuesto polietileno de alta densidad y polipropileno reciclado	compuesto polimérico conformado aproximadamente un 77% de polipropileno, 18% polietileno de alta densidad y el restante en aditivos	-	-	28	-	-	1027	-
4	Caracterizacion del polipropileno reciclado disponible a partir de tapas, para reincorporarlo en procesos productivos, mezclado con polipropileno virgen	Polipropileno post consumo a partir de tapas de envases de color negro	0,96	-	30,485	-	-	1474	-
5	Efecto de la temperatura de procesamiento y la proporción de polipropileno virgen reciclado sobre las propiedades mecánicas de probetas moldeadas por inyección.	triturado de polipropileno de uso medico incoloro de canales de alimentación de moldes y piezas no conformes	0,744	-	26	-	-	1020	1370

Tabla 2. Constantes del polipropileno reciclado. Fuente propia mediante diferentes documentos de referencia

- Se deben tener en cuenta todos los factores que influyen los valores de las constantes de los materiales, por ejemplo: espesor, tratamiento térmico, temperatura de servicio etc.

7.3 CONSTANTES FÍSICAS

Según la norma se deben contemplar las siguientes constantes físicas:

- Masa específica del material principal de la compuerta. Ver tabla 2
- Coeficientes de rozamiento de deslizamiento.

Coeficientes de rozamiento de algunos materiales

μ_e = Coeficiente de rozamiento estático, μ_d = Coeficiente de rozamiento dinámico.

Materiales en contacto	Coeficiente Rozamiento Estático μ_e	Coeficiente Rozamiento Dinámico μ_d
Articulaciones humanas	0,02	0,003
Acero // Hielo	0,028	0,09
Acero // Teflón	0,04	0,04
Teflón // Teflón	0,04	0,04
Hielo // Hielo	0,1	0,03
Esquí (encerado) // Nieve (0 °C)	0,1	0,05
Acero // Acero	0,15	0,09
Vidrio // Madera	0,25	0,2
Caucho // Cemento (húmedo)	0,3	0,25
Madera // Cuero	0,5	0,4
Caucho // Madera	0,7	0,6
Acero // Latón	0,5	0,4
Madera // Madera	0,7	0,4
Madera // Piedra	0,7	0,3
Vidrio // Vidrio	0,9	0,4
Caucho // Cemento (seco)	1	0,8
Cobre // Hierro (fundido)	1	0,3

Figura 11. Coeficientes de rozamiento. Fuente empresa Aname

- Coeficientes de rozamiento de rodamiento. Ver figura 11.

- Constantes del material. Ver tabla 2.

7.4 VALORES DE REFERENCIA

En caso de que ninguna condición sea prescrita o ningún cálculo sea ejecutado, los valores de referencia a usar son los siguientes:

- Peso de la protección anticorrosiva de 10 N/m2.
- Peso de cuerpo extraños, contemplar un 5% del peso de la parte estructural de la compuerta.
- Cargas vivas para pasarelas y plataformas según Tabla 4 de la NBR 8883:2008
- Impacto debido al movimiento, multiplicar el peso total sobre el dispositivo por un factor de 1.25.
- Temperatura según Tabla 5 de la NBR 8883:2008
- Perdidas por los sellos de la compuerta, máxima admisible de 0,10 dm3/s por metro lineal de sellado

7.5 ACCIONES PARA CONSIDERAR

Las siguientes acciones deben tenerse presente en el cálculo de la compuerta y sus componentes:

- **Carga hidrostática:** Para este proyecto se planteó un escenario hipotético en el rio de Bogotá en la estación de Rio Bogotá-CHICÚ y se usó la altura de la cota de agua según datos del acueducto. Asumiendo que la compuerta este completamente sumergida el valor de la cota de agua es de 3450 mm.

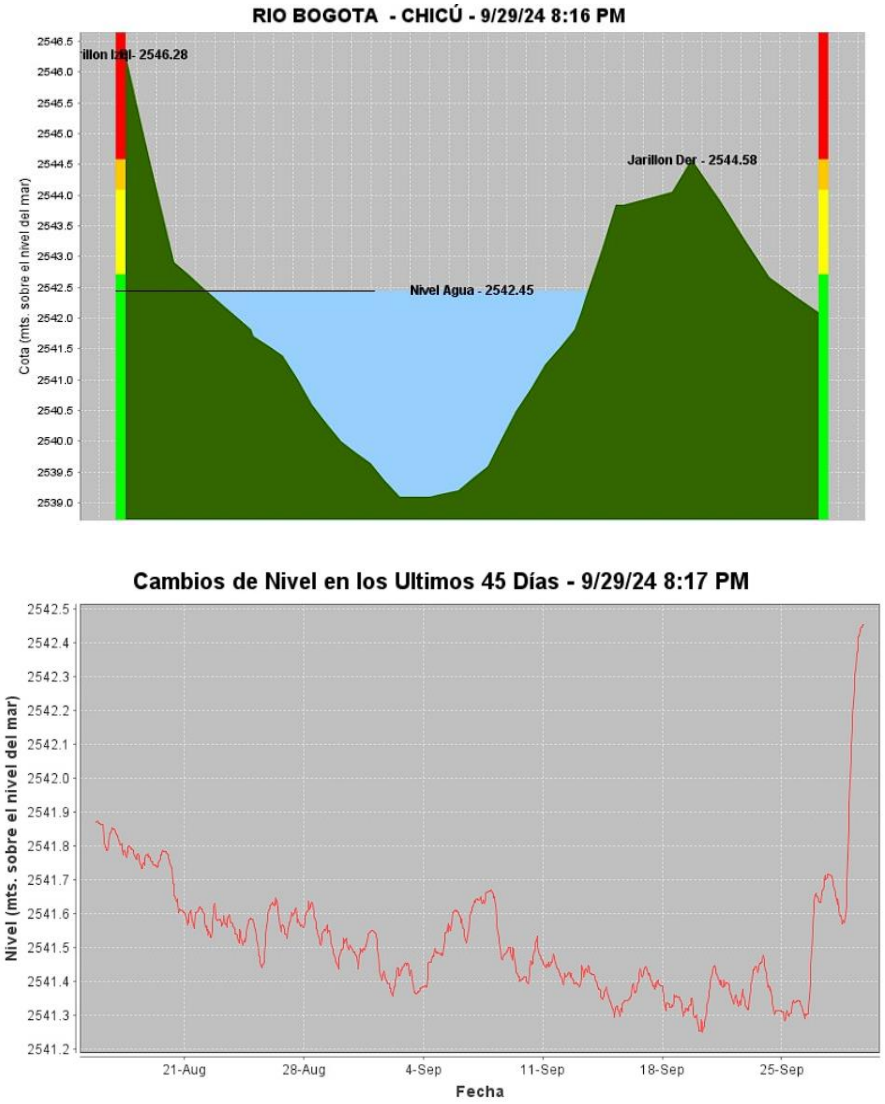
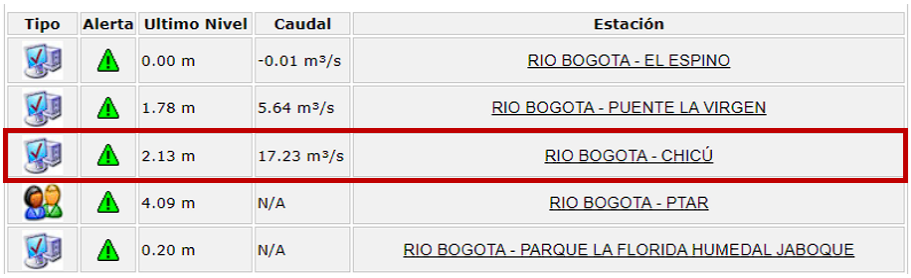


Figura 12. Cota del agua, estación Rio Bogotá - Chicú. Fuente Rio Bogotá-CHICÚ Tomado el 29/09/2024

- **Carga hidrodinámica:** Relación del caudal que se extrae de los datos de la estación Rio Bogotá-CHICÚ.



Tipo	Alerta	Ultimo Nivel	Caudal	Estación
		0.00 m	-0.01 m³/s	RIO BOGOTA - EL ESPINO
		1.78 m	5.64 m³/s	RIO BOGOTA - PUENTE LA VIRGEN
		2.13 m	17.23 m³/s	RIO BOGOTA - CHICÚ
		4.09 m	N/A	RIO BOGOTA - PTAR
		0.20 m	N/A	RIO BOGOTA - PARQUE LA FLORIDA HUMEDAL JABOQUE

Figura 13. Caudal, estación Rio Bogotá - Chicú. Fuente Rio Bogotá-CHICÚ Tomado el 29/09/2024

- Peso: El peso de la compuerta es la suma de las siguientes cuotas:

  a) Peso de la parte estructural:

  La compuerta tiene las siguientes dimensiones generales, alto 1200 mm, ancho 1000 mm, estos valores son los requeridos en el punto de instalación del Rio Bogotá de la estación CHICÚ y su espesor se definió en la etapa de diseño.

- Peso de los conjuntos mecánicos apoyados en la estructura de la compuerta.

  La compuerta tiene los siguientes conjuntos como base para su correcto funcionamiento:

  La figura 14 muestra los componentes requeridos para el correcto funcionamiento de la compuerta.

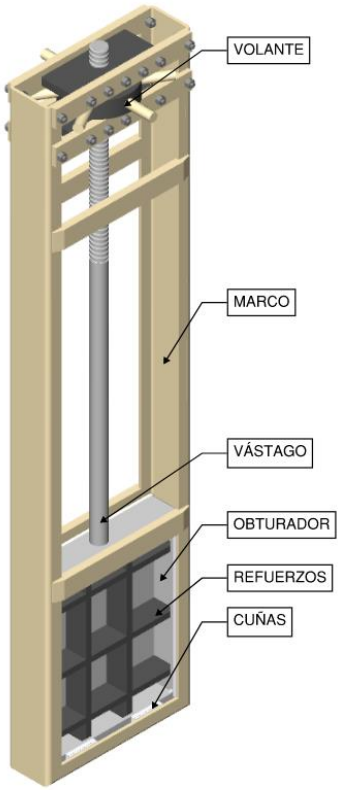


Figura 14. Componentes de una compuerta deslizante. Fuente propia

- **Empuje de Arquímedes**:

  El empuje de Arquímedes está definido por la siguiente ecuación:

  Ecuación 1

  $$E = \rho_{fluido} \cdot g \cdot V_{fluido\ desplazado}$$

  Donde

  - ρ_fluido: Densidad del fluido donde se encuentra sumergido el cuerpo (Agua=1000 kg/m^3).
  - g: Gravedad (9.81 m/s^2).

- V_fluido desplazado: Volumen del fluido desplazado que es igual al volumen de la compuerta (0,1136 m^3).

Reemplazando estos valores en la Ecuación 1 se obtiene la fuerza de empuje:

$$E = 1000\,\frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81\,\frac{m}{s^2} \cdot 0{,}1136\,m^3$$

$$E = 1114{,}42\,N$$

- Rozamiento.

  Ver apartado 8.7 Fuerza de accionamiento.

- Fuerzas debidas a la inercia.

  Las fuerzas debidas a la inercia son contempladas en los cálculos para la fuerza de accionamiento. Ver apartado 8.7 Fuerza de accionamiento.

7.6 FUERZAS DE ACCIONAMIENTO

En compuertas que deben cerrarse por la acción del peso propio, se debe comprobar la preponderancia de cierre, multiplicándose las fuerzas de rozamiento por los siguientes valores:

a) Caso de carga nominal: 1,25 (fuerzas que cierran > fuerzas que abren + 1,25 x Frozamiento).

b) Caso de carga ocasional: 1,20 (fuerzas que cierran > fuerzas que abren + 1,20 x Frozamiento).

7.7 DIMENSIONES DE LAS COMPUERTAS Y COMPONENTES

7.7.1 Vida Útil

Considerando su función, las compuertas hidráulicas y sus componentes deben proyectarse de modo a ser sencillos, robustos y operacionalmente seguros. En caso de que no sea especificado en contrario, la vida útil de las estructuras y componentes abarcados en esta Norma debe ser de 50 años. [NBR 8883:2008]

7.7.2 Memorias de cálculo

La memoria de cálculo debe contener por lo menos los siguientes elementos (cuando apliquen):

a) Grandeza y localización de Croquis de la estructura con las dimensiones generales.

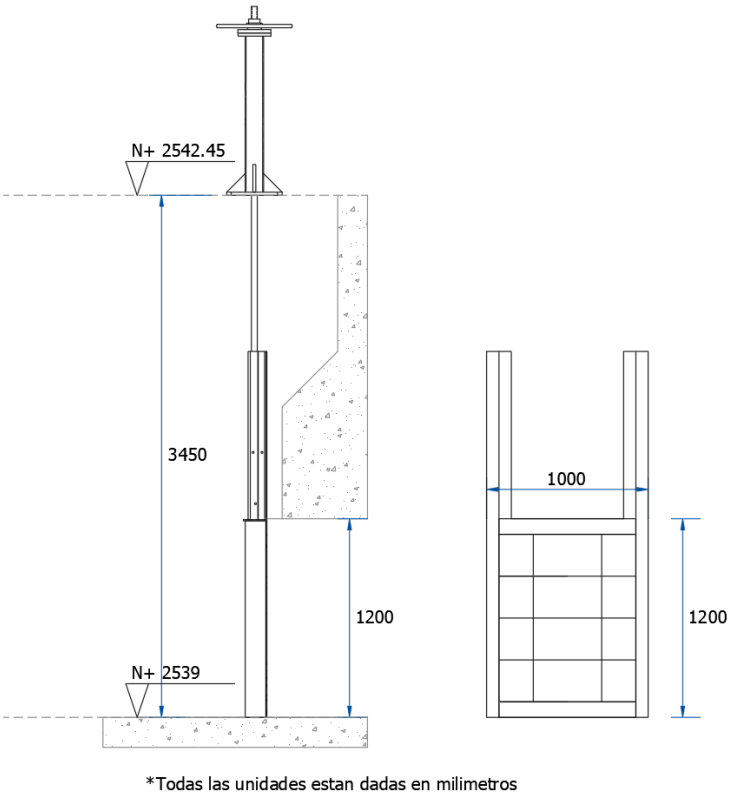


Figura 15. Dimensiones generales. Fuente elaboración propia

b) Cargas generales de operación.

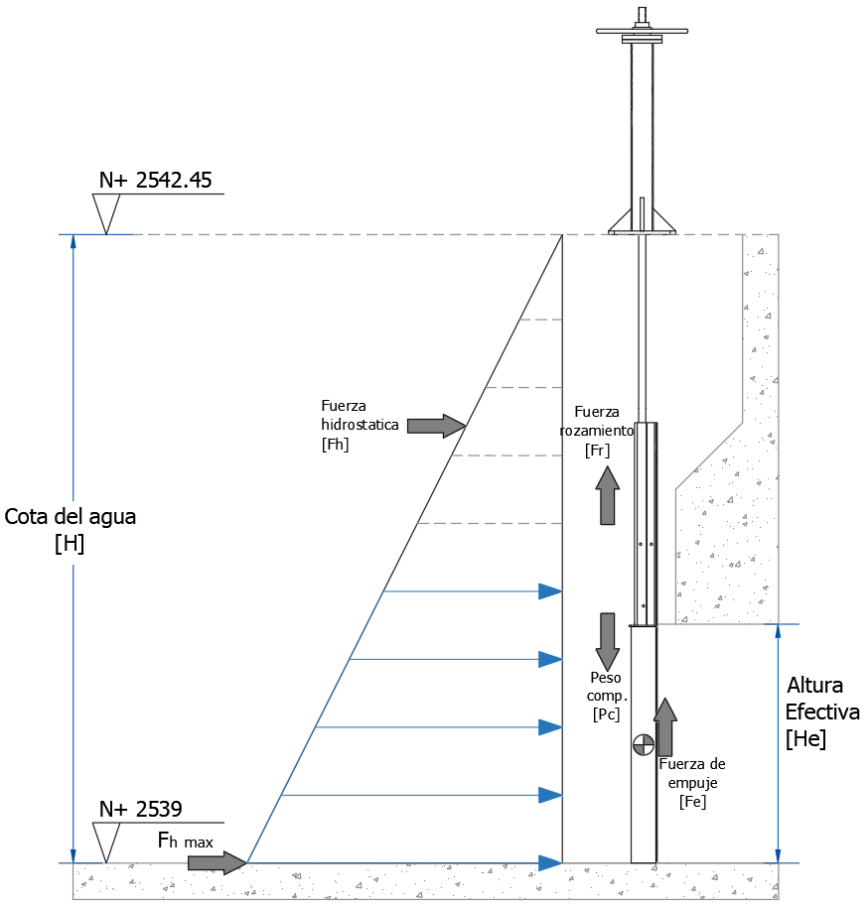


Figura 16. Cargas generales. Fuente elaboración propia

c) Materiales de construcción y elementos de aleación.

El material principal usado para el diseño y la simulación de la compuerta es polipropileno, y sus propiedades mecánicas están en la tabla 2

d) Dimensiones y secciones de los elementos estructurales principales.

e) Tensiones admisibles.

f) Tensiones actuantes en todos los elementos en las secciones principales y en las conexiones.
g) Análisis de la estabilidad elástica.
h) Análisis de fatiga y vibración, siempre que sean necesarios;
i) Valores de las deformaciones y de los desplazamientos máximos que puedan afectar el funcionamiento correcto de la compuerta.
j) Esfuerzos de maniobra que ocurren durante las operaciones de la compuerta.
k) Esfuerzos que ocurren durante las operaciones de montaje y reparaciones en las compuertas.
l) Esfuerzos que ocurren durante el transporte, cuando sean necesarios.
m) Criterios de cálculo y fuentes de consulta.

Los cálculos efectuados por procesos computacionales deben acompañarse de una descripción del método o formulaciones empleadas, de la forma de análisis de la estructura, de los datos de entrada y de los resultados. Los cálculos ejecutados por el método de los elementos finitos o similares deben acompañarse de un listado de los datos de entrada del cálculo. El memorial debe también referenciar el nombre del programa utilizado, su versión y el(los) tipo(s) del (de los) elemento(s) utilizado(s). (NBR 8883:2008)

7.8 MÉTODO DE CÁLCULO

- **Carga estática:** Las estructuras y componentes abarcados en este proyecto son analizados como cargados estáticamente, es decir, las cargas aplicadas aumentan de intensidad a partir de cero, de manera lenta y gradual.
- **Coeficiente de seguridad a la carga estática:** Los coeficientes de seguridad a la carga estática son los indicados en la tabla 6 de la NBR 8883:2008 para aceros.
- **Fatiga:** La verificación a la fatiga es dispensada si:

Ecuación 2

$$\Delta\sigma < 26 \text{ MPa o } n < 5 \times 10e6 \times (26/\Delta\sigma)3$$

Donde:

$\Delta\sigma \rightarrow$ Es la diferencia entre las tensiones máxima y mínima (Amplitud)

$n \rightarrow$ Es el número de ciclos de tensión

- **Resistencia a la fatiga:** Se debe determinar por uno de los siguientes modos:
    1) Adoptándose el límite de fatiga para el cual el material soporta un número ilimitado de ciclos.
    2) Determinándose a partir de la curva de Wöhler del material el valor de la resistencia a la fatiga correspondiente al número total de ciclos de su vida útil.

- **Tensiones:** La verificación de las tensiones se debe hacer para todos los elementos de la estructura y componentes relacionados, para cada caso de carga a considerar.
- **Torsión:** La verificación de la torsión se debe hacer para todos los elementos de la estructura y componentes relacionados, para cada caso de carga a considerar.
- **Tensiones admisibles:** Las tensiones admisibles para los materiales adecuados a la fabricación de compuertas, sus componentes, son las correspondientes al producto de los coeficientes “s” de la Tabla 6 de la Norma, por el:
    a) Límite de desagüe “Se”, en el caso de carga estática (s x Se).
    b) Límite de resistencia a la fatiga del material “S1”, en el caso de análisis a la fatiga (s x S1).

8 CÁLCULOS

8.1 CARGA HIDROSTÁTICA Y PUNTO DE APLICACIÓN

Como la norma NBR 8883:2008 establece que para el cálculo de la compuerta se debe considerar la presión hidrostática más desfavorable, las fuerzas de carga y de esta manera establecer el espesor de la compuerta.

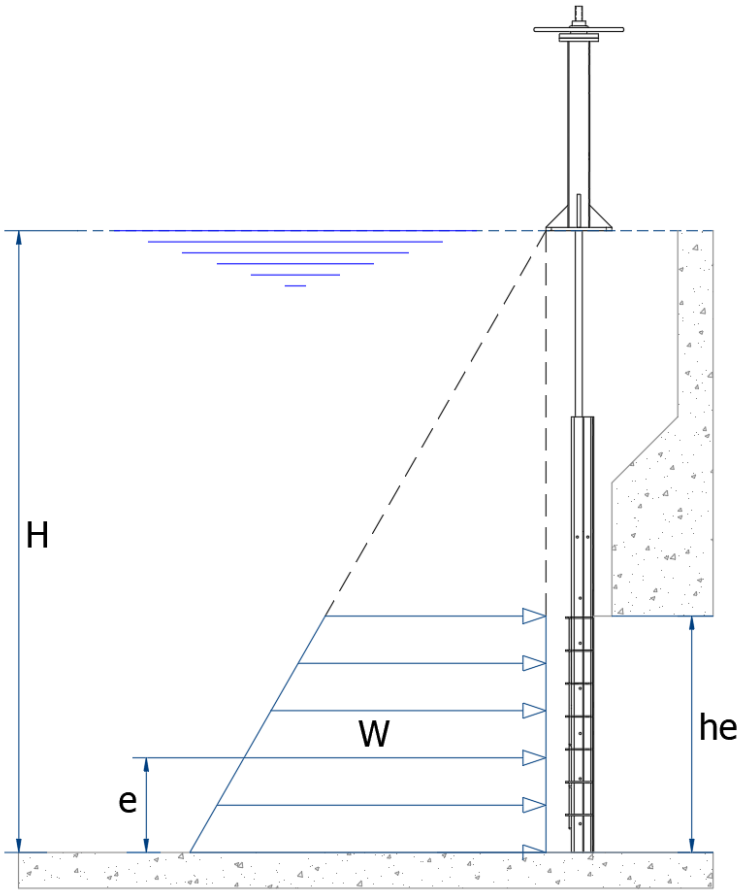


Figura 17. Diagrama de presión y punto de aplicación de la carga, en una compuerta sumergida. Fuente elaboración propia

8.1.1 Carga hidrostática

Para hallar la fuerza hidrostática en compuertas sumergidas se utiliza la ecuación 3, según (Erbisti,2004).

Ecuación 3

$$F_H = \gamma \cdot B \cdot h_e(H - \frac{h_e}{2})$$

Donde

F_H: Carga Hidrostática (KN)

γ: Peso específico del agua = 9,81 KN/m^3

H: Máxima cota de agua (m)

h_e: Altura efectiva de la compuerta (m)

$$F_H = 9{,}81\frac{KN}{m^3} \cdot 1\ m \cdot 1{,}2\ m \cdot (3{,}45\ m - \frac{1{,}2\ m}{2})$$

$$F_H = 33{,}550\ KN$$

8.1.2 Punto de aplicación de la fuerza

El punto de aplicación de la fuerza según (Erbisti, 2004), es definido como:

Ecuación 4

$$e = \frac{h}{3}(1 + \frac{H - h_e}{2H - h_e})$$

Donde:

H: Altura máxima del de agua (m)

h_e: Altura efectiva de la compuerta (m)

$$e = \frac{1{,}2}{3}(1 + \frac{3{,}45 - 1{,}2}{2(3{,}45) - (1{,}2)})$$

$$e = 0{,}5578\,m \cong 0{,}56\,m$$

8.2 POSICIÓN DE REFUERZOS HORIZONTALES

Para determinar la posición de refuerzos horizontales se puede asumir que deben estar separados por h/4 según (Erbisti, 2004). Sin embargo, en este caso, se diseñó para tener 3 refuerzos horizontales.

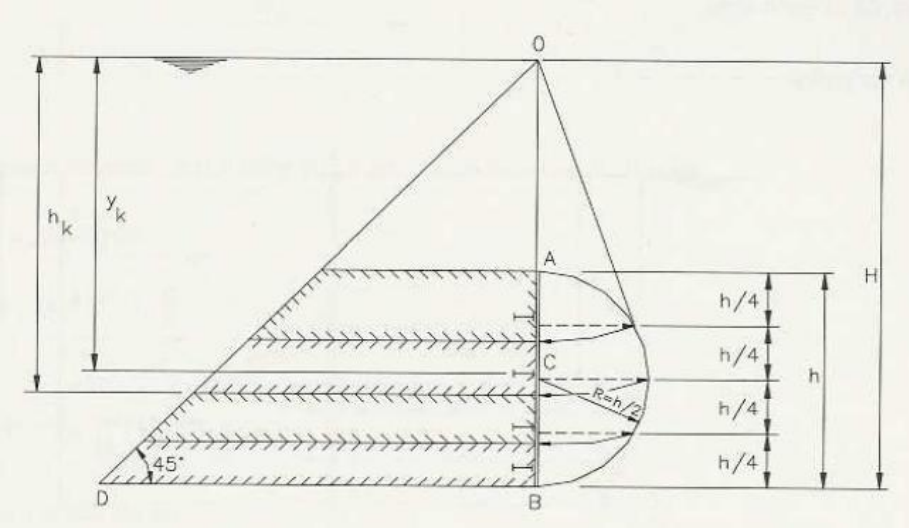


Figura 18. Compuertas sumergidas. división del diagrama de presión en cuatro áreas equivalentes. (Erbisti, 2004).

Para hallar el centroide de presión sobre cada área generada por los refuerzos horizontales y de esta manera determinar la presión se usa la ecuación 5:

Ecuación 5

$$hk = H\sqrt{\frac{k-\beta}{n-\beta}}$$

Donde:

k: Número de refuerzos

n: Cantidad de áreas

β: Factor que se determina con la ecuación 6

Ecuación 6

$$\beta = \frac{n(H - h_e)^2}{H^2 - (H - h_e)^2}$$

La posición de los refuerzos horizontales se define como:

Ecuación 7

$$yk = \frac{2H}{3\sqrt{n + \beta}} * [\ (k + \beta)^{\frac{3}{2}} - (k - 1 + \beta)^{\frac{3}{2}}\ ]$$

En la tabla 5, se presenta un resumen de los datos obtenidos para k=3.

Posicion de refuerzos horizontales					
k	hk [m]	k	yk [m]	Y [m]	X [m]
1	2,71	1	2,49	0,24	0,35
2	3,10	2	2,91	0,42	0,3
3	3,45	3	3,28	0,37	0,35

Tabla 3. Centroides y posición de los refuerzos horizontales. Fuente propia

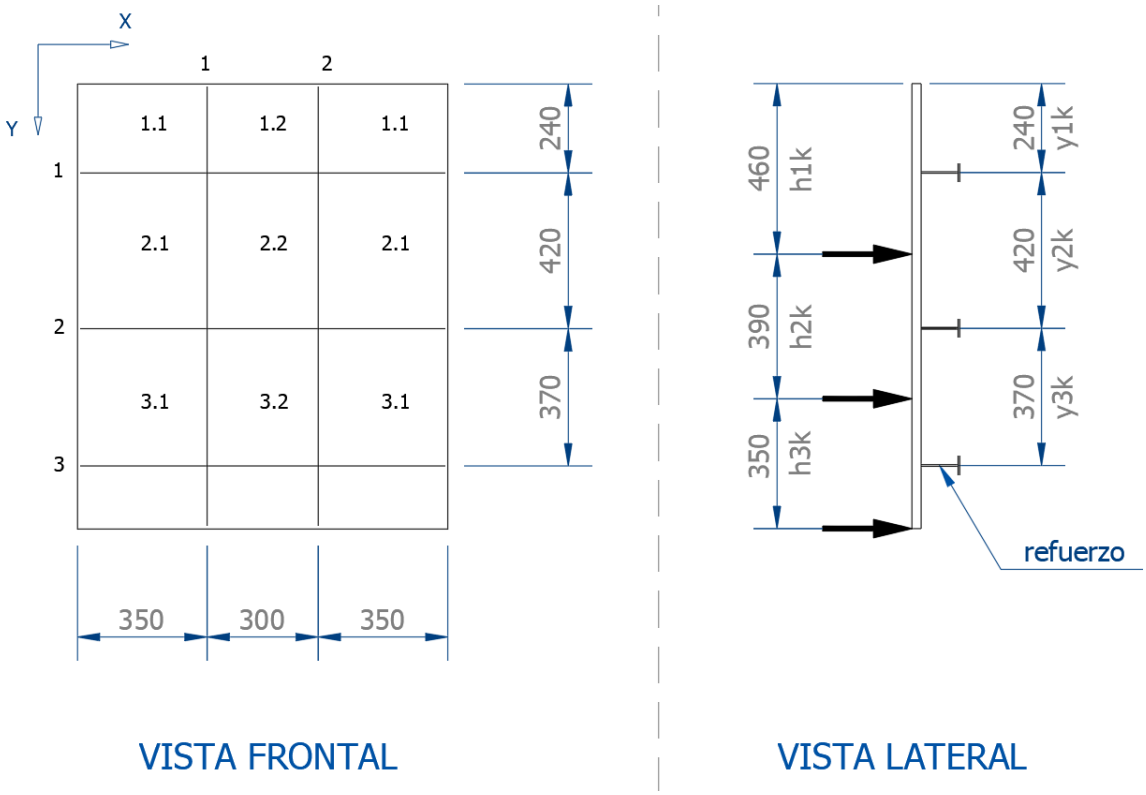


Figura 19. Esquema de centroides y refuerzos horizontales. Fuente propia.

8.3 CANTIDAD DE REFUERZOS HORIZONTALES

Según la norma NBR-8883 define el esfuerzo máximo mediante la ecuación 8:

Ecuación 8

$$\sigma = \pm \frac{K}{100} \cdot p \cdot \frac{a^2}{t^2}$$

Donde:

- k: es un factor adimensional que depende de la relación b/a. Longitud de apoyo de los módulos por las vigas y/o rigidizadores) y las condiciones de apoyo del módulo.

- a: La menor longitud del soporte.
- p: Presión hidrostática relativa en el centroide.
- t: Espesor de pared.

Table 5.3 k-Coefficient (NBR-8883)

b/a	Unfixed mounting of the 4 edges		Rigid fixing of the 4 edges				Rigid fixing of 3 edges and unfixed mount of the fourth edge							
	(a)		(b)				(c)				(d)			
	$\pm\sigma_{1x}$	$\pm\sigma_{1y}$	$\pm\sigma_{1x}$	$\pm\sigma_{1y}$	$\pm\sigma_{4y}$	$\pm\sigma_{3x}$	$\pm\sigma_{1x}$	$\pm\sigma_{1y}$	$\pm\sigma_{4y}$	$\pm\sigma_{3x}$	$\pm\sigma_{1x}$	$\pm\sigma_{1y}$	$\pm\sigma_{2y}$	$\pm\sigma_{3x}$
∞	75.0	22.5	25.0	7.5	34.2	50.0	37.5	11.3	47.2	75.0	25.0	7.5	34.2	50.0
3.00	71.3	24.4	25.0	7.5	34.3	50.0	37.4	12.0	47.1	74.0	25.0	7.6	34.2	50.0
2.50	67.7	25.8	25.0	8.0	34.3	50.0	36.6	13.3	47.0	73.2	25.0	8.0	34.2	50.0
2.00	61.0	27.8	24.7	9.5	34.3	49.9	33.8	15.5	47.0	68.3	25.0	9.0	34.2	50.0
1.75	55.8	28.9	23.9	10.8	34.3	48.4	30.8	16.5	46.5	63.2	24.6	10.1	34.1	48.9
1.50	48.7	29.9	22.1	12.2	34.3	45.5	27.1	18.1	45.5	56.5	23.2	11.4	34.1	47.3
1.25	39.6	30.1	18.8	13.5	33.9	40.3	21.4	18.4	42.5	47.2	20.8	12.9	34.1	44.8
1.00	28.7	28.7	13.7	13.7	30.9	30.9	14.4	16.6	36.0	32.8	16.6	14.2	32.8	36.0

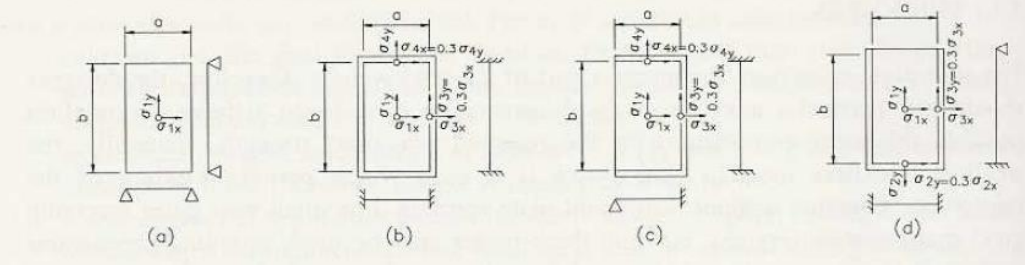


Figura 20. Coeficiente K. (Erbisti, 2004).

El coeficiente K, depende de la forma y se define en la figura 20. Dependiendo de cómo esté sujetado el obturador, se usaron diferentes tipos de factores, revisando la Figura 19, se observa que por su forma constructiva todos los rectángulos serán de tipo b, teniendo 6 tipos diferentes, resumidos en la tabla 4.

Esfuerzo sobre chapa					
Y	X	a [m]	hk [m]	P [Pa]	B/a
1	1	0,237	2,71	26555	1,48
1	2	0,237	2,71	26555	1,27
2	1	0,350	3,10	30400	1,21
2	2	0,300	3,10	30400	1,41
3	1	0,350	3,45	33810	1,05
3	2	0,300	3,45	33810	1,23
Coeficientes K					
Y	X	k1x	k1y	k4y	k3x
1	1	22,1	12,1	34,3	45,5
1	2	18,8	13,5	33,9	40,3
2	1	18,8	13,5	33,9	40,3
2	2	22,1	12,1	34,3	45,5
3	1	13,7	13,7	30,9	30,9
3	2	18,8	13,5	33,9	40,3
Esfuerzo sobre chapa					
Y	X	σ1x	σ1y	σ4y	σ3x
1	1	9,15	5,01	14,21	18,84
1	2	7,79	5,59	14,04	16,69
2	1	19,45	13,96	35,07	41,69
2	2	16,80	9,20	26,07	34,58
3	1	15,76	15,76	35,55	35,55
3	2	15,89	11,41	28,65	34,06

Tabla 4. Cálculos de esfuerzos en áreas. Fuente propia

Utilizando un espesor mínimo de 6 mm, teniendo como referencia la norma AWWA C561-21, se obtiene el esfuerzo máximo, que se genera en la zona (2,1) y es de 41,69 MPa.

8.4 ESFUERZO ADMISIBLE

Para calcular el esfuerzo admisible, primero se necesita encontrar el esfuerzo cortante, para ello se asumirá la compuerta como una viga simplemente apoyada en sus 2 extremos, como se observa en la figura 21.

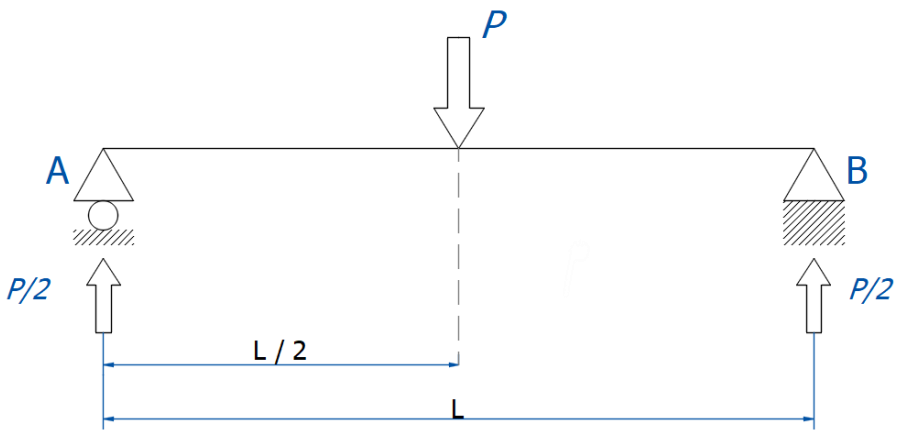


Figura 21. Esquema de compuerta como viga simplemente apoyada. Fuente propia.

Donde:

- L: es la longitud entre apoyos, que para este caso sería de 1 m en el sentido Horizontal y 1,2 m en el sentido vertical.
- P: la fuerza hidrostática.

El cortante máximo se define como:

Ecuación 9

$$\tau max = \frac{V h^2}{8 \cdot I} = \frac{3 \cdot V}{2 \cdot A}$$

- V es la carga 33,55 KN

- A es el área de la sección transversal (altura por espesor), para este caso hay dos situaciones, cuando se asuman los soportes en sentido horizontal el área será de 0,0060 m2 y en el sentido vertical será de 0,0072 m2.

Esfuerzo cortante		Esfuerzo cortante	
V [N]	33550,20	V [N]	33550,20
Ah [m^2]	0,0060	Av [m^2]	0,0072
Th [MPa]	8,3876	Tv [MPa]	6,9896

Tabla 5. Cálculos de esfuerzos cortantes verticales y horizontales. Fuente propia

El esfuerzo admisible se define como:

Ecuación 10

$$\sigma^* = \sqrt{\sigma x^2 + \sigma y^2 - \sigma x \cdot \sigma y + 3\tau xy}$$

- σ_X es el esfuerzo normal en x
- σ_Y es el esfuerzo normal en y
- T_{XY} es el cortante sobre el plano xy

Para calcular el esfuerzo admisible tomaremos de la tabla 4, los esfuerzos máximos σ_{4Y} (2,1); σ_{3X} (2,1); T_maxH

$$\sigma^* = \sqrt{41{,}69^2 + 35{,}07^2 - (41{,}69\ x\ 35{,}07) + (3\ x\ 8{,}39)}$$

$$\sigma^* = 39{,}13\ MPa$$

Se asume como el esfuerzo admisible, el esfuerzo de fluencia a tensión del material (15,11 MPa según tabla 2), multiplicada por un factor dependiente de la siguiente tabla.

Table 5.1 Coefficients for Allowable Stresses, Structural Elements

Type of Stress	Load Case		
	Normal	Occasional	Exceptional
Tension and bending stress	0.68	0.76	0.89
Bending stress if a stability proof is required	0.59	0.68	0.79
Shear	0.39	0.44	0.51
Combined stress	0.76	0.82	0.92
Combined stress in the skin plate	0.87	0.87	0.92

Figura 22. Coeficientes de tensiones admisibles para elementos estructurales. (Erbisti, 2004).

El límite de fluencia del material es 15,11 MPa, se asume como esfuerzos combinados sobre una lámina y se utiliza el coeficiente de 0,87 de carga normal. Con estos datos, se obtiene un esfuerzo admisible de 13,15 MPa, el esfuerzo máximo sobre el obturador por los esfuerzos combinados es de 39,126 MPa, generando así un factor de seguridad de 0,33.

Dicho factor de seguridad no es aceptable, ya que no se asegura la integridad mecánica de la compuerta. Por ende, es necesario recalcular el esfuerzo admisible cambiando el espesor del obturador. Usando un espesor de 20 mm se obtienen un factor de seguridad de 2,96. los resultados obtenidos se presentan en las tablas 6, 7 y 8.

Esfuerzo sobre chapa					
Y	X	a [m]	hk [m]	P [Pa]	B/a
1	1	0,237	2,71	26555	1,48
1	2	0,237	2,71	26555	1,27
2	1	0,350	3,10	30400	1,21
2	2	0,300	3,10	30400	1,41
3	1	0,350	3,45	33810	1,05
3	2	0,300	3,45	33810	1,23
Coeficientes K					
Y	X	k1x	k1y	k4y	k3x
1	1	22,1	12,1	34,3	45,5
1	2	18,8	13,5	33,9	40,3
2	1	18,8	13,5	33,9	40,3
2	2	22,1	12,1	34,3	45,5
3	1	13,7	13,7	30,9	30,9
3	2	18,8	13,5	33,9	40,3
Esfuerzo sobre chapa					
Y	X	σ1x	σ1y	σ4y	σ3x
1	1	0,82	0,45	1,28	1,70
1	2	0,70	0,50	1,26	1,50
2	1	1,75	1,26	3,16	3,75
2	2	1,51	0,83	2,35	3,11
3	1	1,42	1,42	3,20	3,20
3	2	1,43	1,03	2,58	3,07

Tabla 6. Cálculos de esfuerzos en áreas con un espesor de 20 mm. Fuente propia

Esfuerzo cortante		Esfuerzo cortante	
V [N]	33550,20	V [N]	33550,20
Ah [m^2]	0,0200	Av [m^2]	0,0240
Th [MPa]	2,5163	Tv [MPa]	2,0969

Tabla 7. Cálculos de esfuerzos cortantes verticales y horizontales con un espesor de 20 mm. Fuente propia

Esfuerzo admisible		
σ4y	3,16	Mpa
σ3x	3,75	Mpa
τ	2,5163	Mpa
σ	4,444	Mpa

Tabla 8. Cálculos de esfuerzo admisible con un espesor de 20 mm. Fuente propia.

8.5 DEFLEXIÓN MÁXIMA

Según, (Erbisti, 2004). Es posible calcular la deflexión máxima con la siguiente ecuación:

Ecuación 11

$$f = \frac{\alpha \cdot p \cdot a^4}{E \cdot t^3}$$

E: es el módulo de elasticidad del material (750 MPa, Tabla 2)

α: es el coeficiente de Timoshenko (Figura 23)

Table 5.4 α-Coefficient (Timoshenko)

b/a	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞
α	0.0138	0.0188	0.0226	0.0251	0.0267	0.0277	0.0284

Figura 23. coeficiente de Timoshenko. (Erbisti, 2004)

Deflexion maxima						
Y	X	a [m]	hk [m]	P [Pa]	alfa	f [mm]
1	1	0,237	2,71	26555	0,0267	0,3725
1	2	0,237	2,71	26555	0,0188	0,2623
2	1	0,350	3,10	30400	0,0188	1,4294
2	2	0,300	3,10	30400	0,0226	0,9275
3	1	0,350	3,45	33810	0,0138	1,1669
3	2	0,300	3,45	33810	0,0188	0,8581

Tabla 9. Cálculo de deflexión máxima. Fuente propia.

8.6 CÁLCULO DE REFUERZOS

Lo primero es validar si la cantidad de refuerzos horizontales es adecuada, esto podemos verificarlo a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 12

$$N = \frac{100 \cdot h}{t} \cdot \sqrt{\frac{H_m}{2\sigma_{adm}}}$$

H_m: Altura del agua hasta el punto de aplicación de la fuerza en la compuerta, equivalente a 2,89 m

σ_{adm}: Esfuerzo admisible para el polipropileno reciclado tiene un valor de 15,11 MPa (ver tabla 2)

h: Altura de la compuerta. (ver figura 15)

Numero de soportes	
h [m]	1,2
Hm [m]	2,89
σ_adm [Pa]	15110000
t [m]	0,02
N	1,9

Tabla 10. Cálculo número de refuerzos. Fuente propia.

En resumen, son necesarios al menos 2 refuerzos horizontales, como se observa en la figura 19, se había planteado 3 refuerzos.

Además, se calculó el espesor necesario para los refuerzos de la siguiente manera:

Ecuación 13

$$t = \frac{F}{2 \cdot h \cdot \tau_{adm}}$$

F: Fuerza hidrostática calculado con la ecuación 1 (33,55 kN)

T_{adm}: Esfuerzo admisible a cortante es 2,88 MPa (Tabla 2)

h: Ancho del refuerzo

Espesor de refuerzos	
F [N]	33550,20
h[m]	0,15
Tadm [Pa]	2880000
t [mm]	38,831

Tabla 11. Cálculo espesor de refuerzos. Fuente propia.

8.7 FUERZA DE ACCIONAMIENTO

La fuerza necesaria para elevar la carga se define como la sumatoria del peso necesario para elevar la compuerta y la fuerza de fricción debida a la carga hidrostática entre las cuñas y el sello respecto al marco de la compuerta.

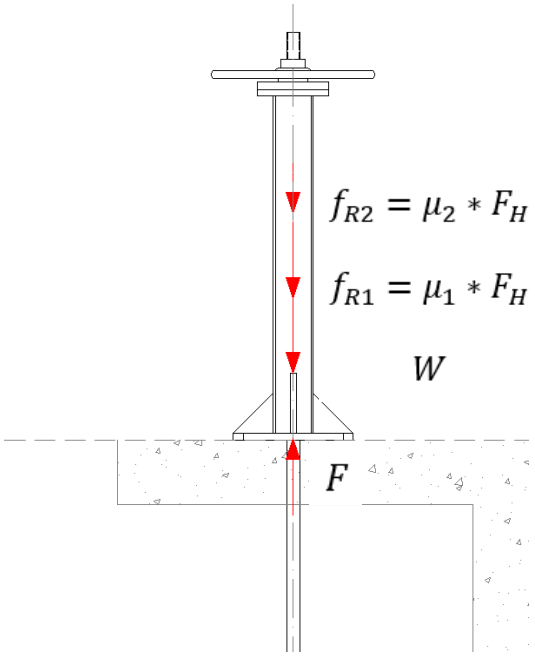


Figura 24. Fuerzas en el sistema. Fuente propia

Para definir los coeficientes de fricción estáticos se toma como base el polietileno ya que es el material con las propiedades más cercanas al polipropileno, ya que no se encuentran bases precisas que definan los coeficientes para varios materiales relacionados con el polipropileno. La figura 25 muestra los distintos coeficientes

Materiales y combinaciones de materiales		Condiciones de la superficie, lubricante	Coeficiente de fricción	
			Estático - $\mu_{estático}$ -	Cinética (deslizante) - $\mu_{deslizante}$ -
Poliestireno	Poliestireno	Limpio y seco	0,5	
Poliestireno	Poliestireno	Grasa	0,5	
Poliestireno	Acero	Limpio y seco	0,3 - 0,35	
Poliestireno	Acero	Grasa	0,3 - 0,35	
Polietileno	Polietileno	Limpio y seco	0,2	
Polietileno	Acero	Limpio y seco	0,2	
Polietileno	Acero	Grasa	0,2	

.

Figura 25. Coeficientes de Fricción del Polietileno. Fuente Engineeringtoolbox

- μ_1 es la fricción estática entre las cuñas en condiciones de la superficie limpia y seca con un valor de 0,2.
- μ_2 es la fricción estática entre el sello y el marco de la compuerta en condiciones de la superficie limpia y seca con un valor de 0,2.
- F_H es la fuerza hidrostática que se calculó en el apartado 8.1.1 Carga hidrostática.

$$f_{R1} = 0{,}2 * 33{,}55\ KN = 6{,}71\ KN$$

$$f_{R2} = 0{,}2 * 33{,}55\ KN = 6{,}71\ KN$$

- W es el peso del sistema y equivale a realizar el producto del volumen por la densidad del material de la compuerta y posteriormente por la gravedad:

Ecuación 14

$$m = V * \rho$$

$$m = \left[(0{,}1136\ m^3\ ) * 1210\ {}^{kg}/_{m^3}\right]$$

$$m = 137{,}46\ kg$$

$$W = 137{,}46\ kg * 9{,}81\ {}^{m}/_{S^2}$$

$$W = 1{,}35\ KN$$

El cálculo del torque requerido para elevar el tornillo se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 15

$$T_u = \frac{F\emptyset_m}{2}\left(\frac{cos\varphi tan\lambda + f}{cos\varphi - ftan\lambda}\right)$$

- T_u es el torque para izar la carga.
- F es la carga para izar. Es la sumatoria de las fuerzas debidas a la fricción y el peso neto de la compuerta.

$$F = f_{R1}\ +\ f_{R2} + W$$

$$F = 6{,}71\ KN +\ 6{,}71\ KN + 1{,}35\ KN$$

$$F = 14{,}77\ KN$$

- $\emptyset_m$ es el diámetro medio del tornillo que para DIN 103 Tr 100 es de 94 mm para un paso de 12.
- φ es el ángulo de la rosca que para DIN 103 es de 15° (Tivoly, 2021).
- λ es el ángulo entre el paso y el perímetro de la rosca, así:

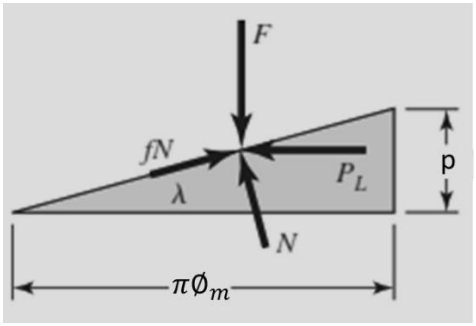


Figura 26. Angulo entre el paso y perímetro de la rosca. Fuente Ingemecanica

- f es el coeficiente de fricción entre el tornillo y la rosca cuyo valor conservador es de 0,15 (mot, 2006).

Calculos del Tornillo	
F (N)	14770,1
Dm (mm)	94
θ (°)	15
λ (°)	3,695
f	0,15
Tu (N. mm)	154111
Tu (N. m)	154,11

Tabla 12. Cálculos del tornillo. Fuente propia.

El torque se define como el producto entre la fuerza y la distancia, la fuerza máxima de un hombre promedio es de 68 kg (Lizeth Muñoz Jashimoto, 2009) equivalente 666 N partiendo del torque necesario podemos deducir que el diámetro mínimo 0,23 m por ergonomía y catálogo de fabricante usaremos un volante de 0,4m.

En paralelo, se va a verificar que la sección del tornillo sea la adecuada para el torque y la fuerza que será sometido. Por lo tanto, el área de tensión del tornillo se expresa como:

Ecuación 16

$$A_t = \frac{\pi}{4}\left(\frac{\emptyset_r + \emptyset_m}{2}\right)^2$$

- $\emptyset_r$ es el diámetro de núcleo.

Entonces,

$$A_t = \frac{\pi}{4}\left(\frac{87 + 94}{2}\right)^2$$

$$A_t = 6432{,}61\ mm^2$$

Luego, por esfuerzo por carga axial pura (Beltran, 2013) y un concentrador de esfuerzos kt=3.

Ecuación 17

$$\sigma = \frac{F}{A_t} * (kt)$$

$$\sigma = \frac{14770{,}1\ \mathrm{N}}{6432{,}61\ mm^2} * (3)$$

$$\sigma = 5{,}27\ MPa$$

El esfuerzo cortante para la rosca se define según (Budynas, 2011) como:

Ecuación 18

$$\tau = \frac{16T}{\pi \emptyset_r{}^3}$$

Entonces,

$$\tau = \frac{16(154111\ N.mm)}{\pi(87\ mm)^3}$$

$$\tau = 1{,}19\ MPa$$

Por Von mises,

$$\sigma_{VM1} = \sqrt{5{,}27^2} = 5{,}27\ MPa$$

$$\sigma_{VM2} = \sqrt{3 * 1{,}19^2} = 2{,}06\ Pa$$

Comparando el límite de fluencia del polipropileno según tabla 2 con el esfuerzo máximo al que estará sometido, el factor de seguridad equivale a 2,87.

9 VALIDACIÓN POR ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

El obturador de la compuerta está conformado por tres refuerzos horizontales y dos refuerzos verticales como se muestra en la figura 19. Estos tienen un ancho de 150 mm, espesor de 39 mm y un largo que depende de su posición, ya sea vertical (1200 mm) u horizontal (1000 mm). Respecto al obturador, las medidas nominales son de 1200 mm de largo y 1000 de ancho, con un espesor de 20 mm.

Basado en la fuerza hidrostática (33,5 kN) calculada a partir de la ecuación 3 de (Erbisti, 2004) y de la ubicación de la carga (0,56m) se realiza la simulación por elementos finitos en el software Inventor ®, en el apartado de análisis de tensión.

Antes de realizar la simulación, se crea el material en base a la tabla 2, con las características mostradas en la figura 27.

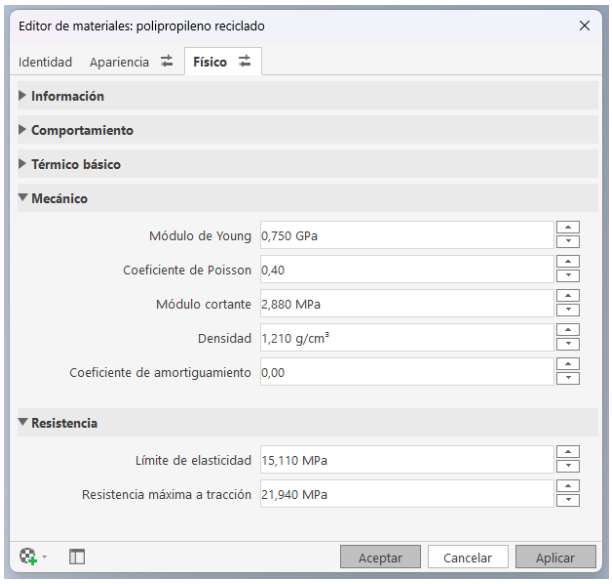


Figura 27. Características del material. Fuente propia.

Los esfuerzos de Von Mises por áreas se presentan en la figura 28.

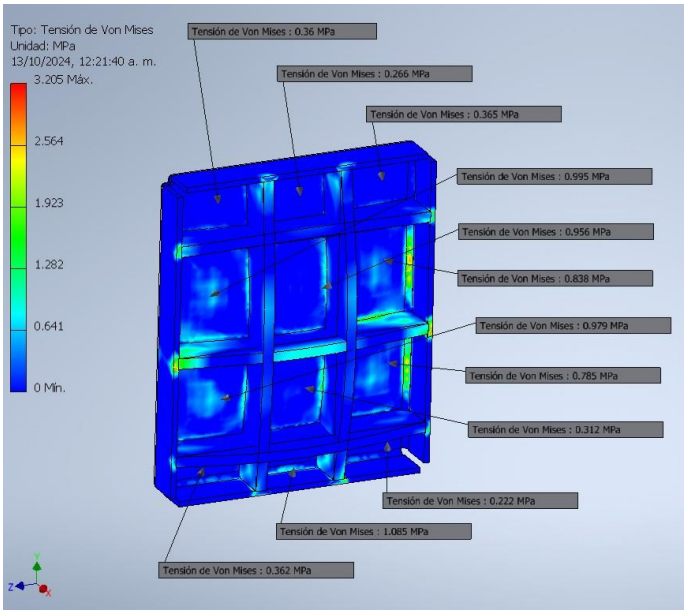


Figura 28. Esfuerzos de Von Mises por áreas. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

La tensión máxima es de 3,205 MPa y se genera en la intersección entre el obturador y los laterales, abarcando el área 2.1, según la figura 29.

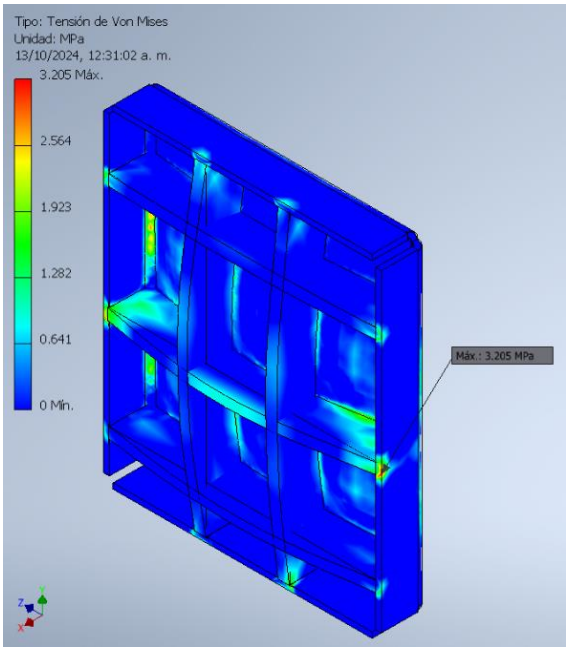


Figura 29. Esfuerzo máximo de Von Mises. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

El desplazamiento máximo en el obturador es de 2,308 mm, la norma AWWA C561, limita la deflexión como L/360. Donde L es la longitud menor, que para este caso es de 1000 mm, permitiendo como desplazamiento máximo 2.8 mm.

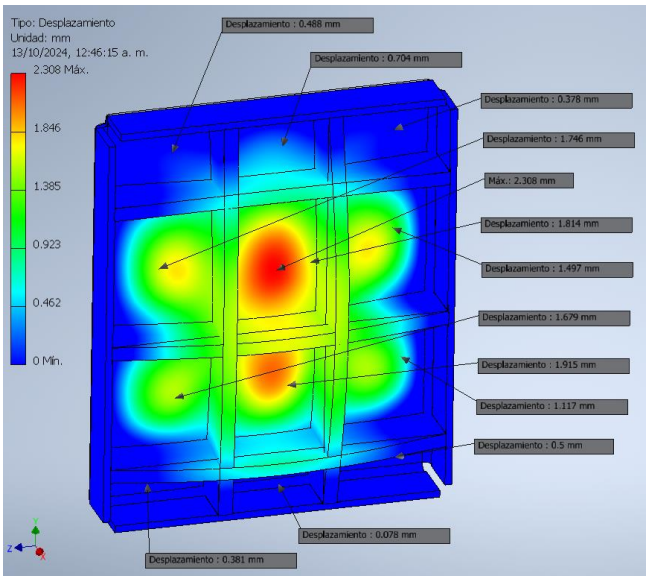


Figura 30. Desplazamiento del obturador. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

El factor de seguridad mínimo en general es de 4,71, visto en la figura 31.

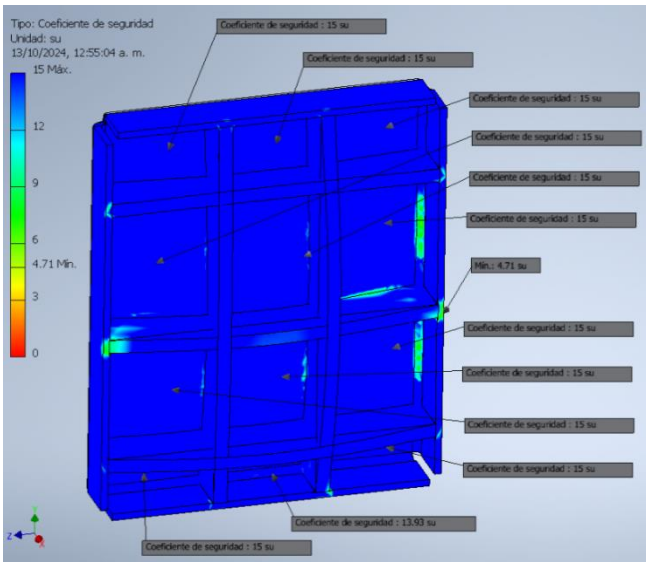


Figura 31. Factor de seguridad. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

Una vez validado el diseño del obturador, se realizó la simulación con las cuñas, estas cumplen la función de apoyo entre el obturador y el marco. Están fabricadas en UHMW, material escogido debido a su bajo coeficiente de fricción. Sus propiedades mecánicas están resumidas en la figura 32.

Propiedades Físicas	Valor	Unidad	Comentario
Gravedad específica	0.930	g / cm^3	ISO 1183
Absorción de Agua	<=0.010	%	Sumergido, 24hr; ISO 62
	<=0.010	%	Saturación en Agua (23ºC)

Propiedades Mecánicas (23ºC)	Valor	Unidad	Comentario
Dureza	66	Shore D	ASTM D2240
Esfuerzo de tracción	40	MPa	ISO 527
Esfuerzo de tracción(65°C)	2.76	MPa	ISO 527
Módulo de tracción	0.552	GPa	ISO 527
Alargamiento de rotura	300	%	ISO 527
Esfuerzo de flexión	24.1	MPa	ASTM 790
Módulo de flexión	0.600	GPa	ASTM 790
Esfuerzo de compresión	20.7	MPa	10 % de Deformación, ASTM D695
Módulo de compresión	0.552	GPa	ASTM D695
Esfuerzo de corte	33.1	MPa	ASTM D732
Ensayo de impacto Charpy con entalle	115P	kJ/m2	ISO 179-1/1eA
Coeficiente de fricción dinámica	0.12		Seco vs. Acero; QTM55007
Velocidad limite de presión	0.105	MPa.m/s	SF=4:1; QTM55007
Maquinabilidad	3		Rango 1-10, 1 fácil de maquinar

Figura 32. Propiedades mecánicas del UHMW. Fuente Duraflon. Tomado de https://www.emacin.com.pe/pdf/Ficha-tecnica-UHMW-PE-1000.pdf

El obturador está configurado con dos cuñas laterales con una longitud de 1150mm, una sección transversal de 50mm x 30mm y cuatro cuñas horizontales de 200mm x 23mm x 50mm, como se observa en la figura 33. Están servirán como restricciones fijas en la simulación.

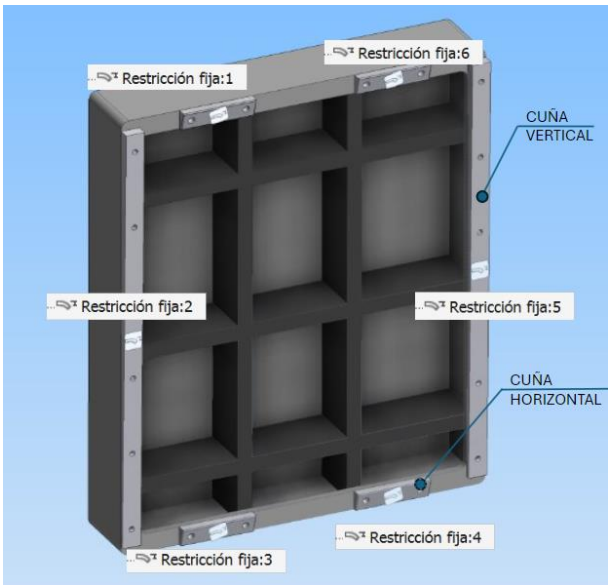


Figura 33. Restricciones entre el montaje obturador-cuñas. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

Condiciones como la fuerza hidrostática y su ubicación se mantienen sin cambios para esta nueva simulación. El esfuerzo máximo se presenta en la figura 34, en uno de los extremos de la cuña horizontal, con una magnitud de 10,33 MPa.

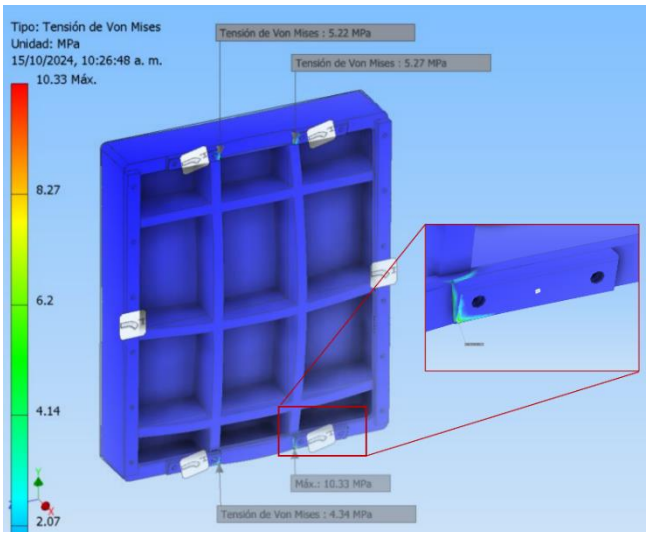


Figura 34. Esfuerzo Von Mises, montaje obturador-cuñas. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

El desplazamiento máximo es de 1,9 mm, originada en el área 2.1 del obturador, cumpliendo con los estándares de la norma AWWA C561, respecto a la deflexión.

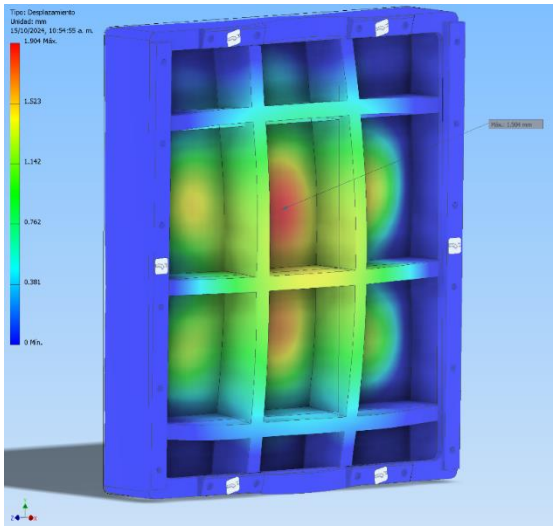


Figura 35. Deflexión máxima, montaje obturador-cuñas. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

El factor de seguridad mínimo es de 2.03, la norma AWWA C561 lo limita a 2.

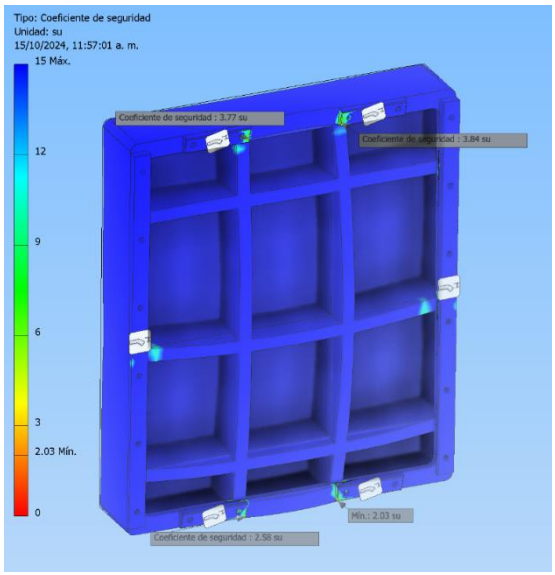


Figura 36. Factor de seguridad, montaje obturador-cuñas. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

Sobre cada una de las restricciones se generaron las reacciones mostradas en la figura 37.

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	3595,58 N	-2925,09 N	239,129 N m	-158,909 N m
		-2068,39 N		170,377 N m
		-306,322 N		53,8734 N m
Restricción fija:2	12223 N	-10079,1 N	354,86 N m	156,667 N m
		-31,4949 N		-216,039 N m
		-6914,6 N		-233,898 N m
Restricción fija:3	4551,21 N	-3757,77 N	303,56 N m	191,644 N m
		2523,22 N		230,391 N m
		-475,388 N		-48,3854 N m
Restricción fija:4	4524,95 N	-3747,25 N	299,838 N m	-189,276 N m
		2490,39 N		-227,752 N m
		480,806 N		-46,971 N m
Restricción fija:5	12262,1 N	-10106,1 N	338,753 N m	-135,938 N m
		-35,2404 N		211,489 N m
		6944,42 N		-227,04 N m
Restricción fija:6	3528,92 N	-2880,78 N	236,512 N m	157,244 N m
		-2020,11 N		-168,249 N m
		271,064 N		53,8946 N m

Figura 37. Reacciones generadas en las restricciones. Fuente propia.

A partir de las reacciones se puede analizar lo que ocurrirá en el marco, es posible asumir los perfiles del marco como vigas simplemente apoyadas. Analizando cómo se comporta en la dirección de mayor magnitud, siendo la restricción 5 en el eje X, con una fuerza de 10106,1 N y un momento de reacción de 233,898 Nm en la restricción 2, eje Y. Debido a que en estas restricciones tenemos una cuña que recorre el canto en toda su longitud (1150 mm), podemos asumir la carga como una carga distribuida de una magnitud de 8788 N/m.

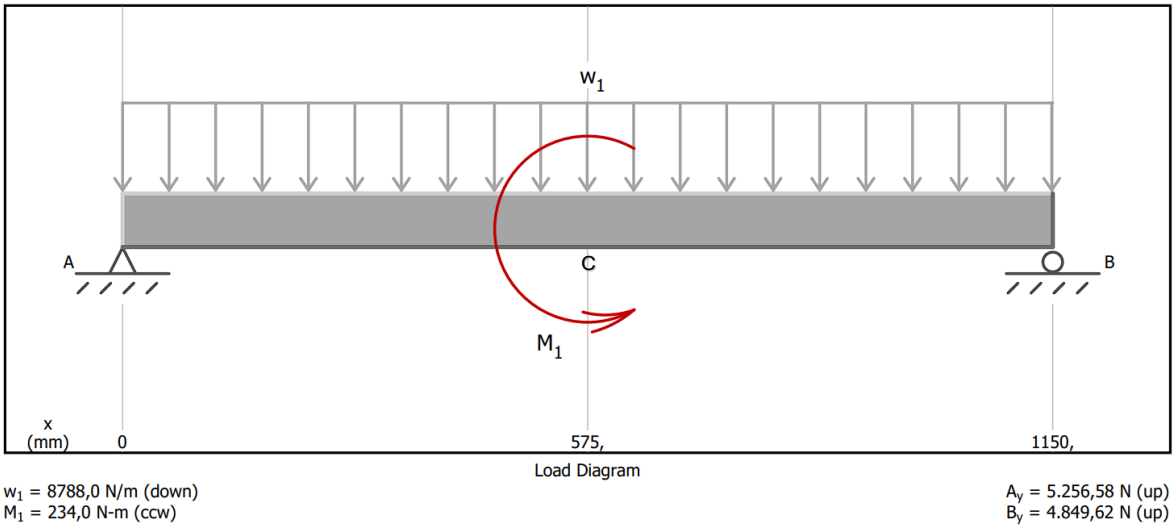


Figura 38. Diagrama de fuerza libre, marco. Fuente propia.

Para conocer las reacciones en a y b, hacemos una sumatoria de fuerzas en Y, así como, una sumatoria de momentos en el centro de la viga:

$$\sum Fy = -10106{,}1\ N + R_{AY} + R_{BY}$$

Despejando reacciones

$$10106{,}1\ N = R_{AY} + R_{BY}$$

$$\sum Mc = 234Nm\ -\ (R_{AY}\ x\ 0{,}575m)\ +\ (R_{BY}\ x\ 0{,}575m)\ =\ 0$$

$$\cdot R_{AY} = 5256{,}58N \quad \cdot R_{BY} = 4849{,}62N$$

Como la carga es distribuida, el comportamiento es lineal en el diagrama de fuerzas cortantes con pendiente negativa. La recta inicia con una magnitud igual a la reacción R_{AY}, cortara en el eje Y, a una distancia de 598,15 mm y su magnitud final equivale a 4849,62 N, tal como se muestra en la figura 39.

El método desarrollado para hacer los diagramas de fuerza cortante y momento flector es mediante integrales, y es de la siguiente forma:

Del punto A al punto C: (Ecuaciones en la figura 41)

$0 \leq x \leq 0{,}575$

$$\Delta V_{AC} = -\int 8788\ dx = -8788x + C$$

$$5256{,}58 = -8788\ (0) + C\ \rightarrow\ C = 5256{,}58$$

$$V_{AC} = -8788x + 5256{,}58$$

$V_A = 5256{,}58\ N$

$V_C = 203{,}48\ N$

Para hallar el punto de corte de la fuerza Vac se iguala a 0 y se despeja, así:

$$0 = -8788x + 5256{,}58$$

$$x = 0{,}598\ m$$

Para hallar la fuerza cortante en el punto B, así:

Del punto C al punto B: (Ecuaciones en la figura 41)

$0{,}575 \leq x \leq 1{,}15$

$$\Delta V_{CB} = -\int 8788\ dx = -8788x + C$$

$$5256{,}58 = -8788\ (0) + C \ \rightarrow \ C = 5256{,}58$$

$$V_{CB} = -8788x + 5256{,}58$$

$V_B = -4849{,}62\ N$

$V_C = 203{,}48\ N$

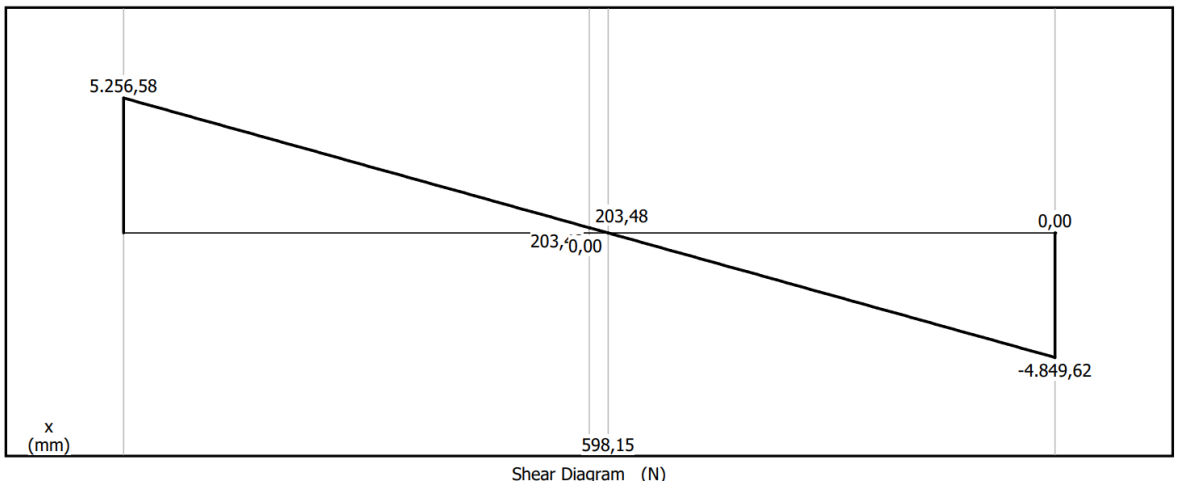


Figura 39. Diagrama de fuerza cortante, marco. Fuente propia.

Utilizando el método de integración (ver figura 41) para hallar los momentos, y sabiendo que una recta en el diagrama de momentos se visualiza como una parábola, el diagrama se representa en la figura 40.

Del punto A al punto C: (Ecuaciones en la figura 41)

$0 \leq x \leq 0{,}575$

$$\Delta M = \int (-8788x + 5256{,}58)dx = -4394x^2 + 5256{,}58x + C$$

$$0 = -4394(0)^2 + 5256{,}58(0) + C \rightarrow C = 0$$

$$M_{AC} = -4394x^2 + 5256{,}58x$$

$M_A = 0\ N$

$M_C = 1569{,}77\ N$

Del punto C al punto B: (Ecuaciones en la figura 41)

$0{,}575 \leq x \leq 1{,}15$

$$\Delta M = \int (-8788x + 5256{,}58)dx = -4394x^2 + 5256{,}58x + C$$

$$1335{,}77 = -4394(0{,}575)^2 + 5256{,}58(0{,}575) + C \rightarrow C = -234$$

$$M_{CB} = -4394x^2 + 5256{,}58x - 234$$

$M_C = 1335{,}77\ Nm$

$$M_{Corte} = -4394(0{,}598)^2 + 5256{,}58(0{,}598) - 234 = 1338{,}123\ Nm$$

$M_B = 0\ N$

Del punto de corte al punto B: (Ecuaciones en la figura 41)

$0{,}55185 \leq x \leq 1{,}15$

$$\Delta M = \int (-8788x + 4849{,}62)dx = -4394x^2 + 4849{,}62x + C$$

$$1104{,}134 = -4394(0{,}55185)^2 + 4849{,}62(0{,}55185) + C \rightarrow C = -234$$

$$M_{Corte\ y\ B} = -4394x^2 + 5256{,}58x - 234$$

$$M_{Corte} = 1104{,}134\ Nm$$

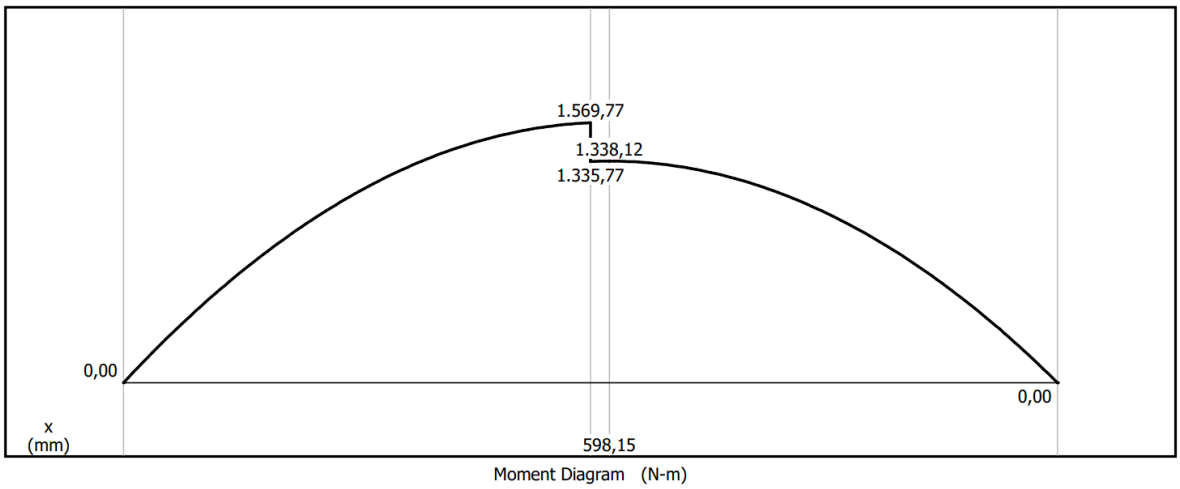


Figura 40. Diagrama de momento flector, marco. Fuente propia.

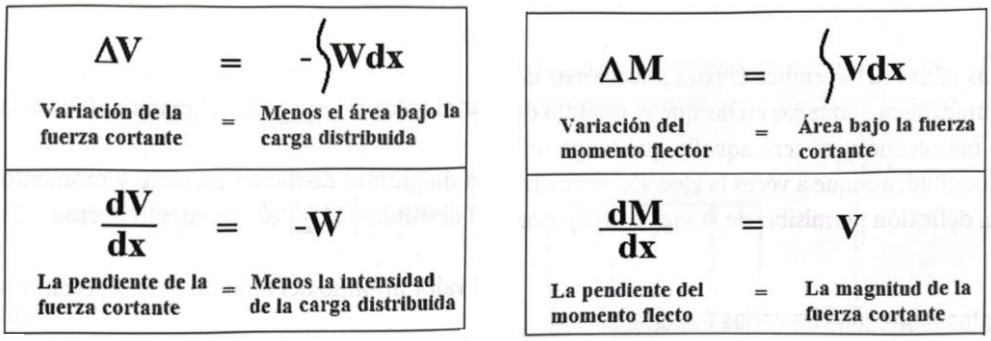


Figura 41. Relaciones entre las cargas distribuidas, fuerza cortante y momento flector. Fuente Pastrán (2013)

Ahora, para conocer los esfuerzos de compresión y tensión sobre la viga debido a los momentos máximos se usa la ecuación 19.

Ecuación 19

$$\sigma = \frac{MC}{I}$$

Donde:

- σ, esfuerzo axial [MPa]
- M, momento flector [N.m]
- C, punto más alejado del eje neutro [m]. es la distancia del centroide de la figura a la zona más lejana donde se genera el esfuerzo máximo.
- I, momento de inercia [mm4]. Es la inercia respecto a z, compuesta de las tres figuras.

La inercia compuesta se calcula como la suma de las inercias respectivas de cada figura, la inercia respecto al eje z se calcula de la siguiente manera.

Ecuación 20

$$C_1 = \sum_{i=1}^{n} Y'_i A_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} A_i$$

$$d_i = |Y_i - C_1|$$

$$I_T = \sum_{i=1}^{n} Iz_i + (A_i)(d_i{}^2)$$

Donde:

- Y’, centroide de la figura de referencia [mm]
- A, área de la figura de referencia [mm2]

- Y’A, primer momento de inercia [mm3]
- C1, centroide de la sección compuesta respecto a la parte inferior [mm]
- C2, centroide de la sección compuesta respecto a la parte superior [mm]
- I_z, momento de inercia respecto al eje z según la figura de referencia [mm4]
- d, valor absoluto de la diferencia del centroide de la figura de referencia respecto al centroide de la sección compuesta [mm].
- I_t, momento total de inercia [mm4].

Sea, ’’O’’ el punto de referencia respecto al par de coordenadas (z,y) en la figura 47, entonces:

Fig.	B [mm]	h [mm]	Y' [mm]	A [mm2]	Y'A [mm3]	Ix [mm4]	d [mm]	It [mm4]	C1 [mm]
1	100	20	284	2000	568000	66666,6667	137	37604666,67	147,00
2	20	254	147	5080	746760	27311773,3	0	27311773,33	C2 [mm]
3	100	20	10	2000	20000	66666,6667	137	37604666,67	147,00
Σ				9080	1334760			1,02521E+08	

Tabla 13. Inercia de la sección transversal. Fuente propia.

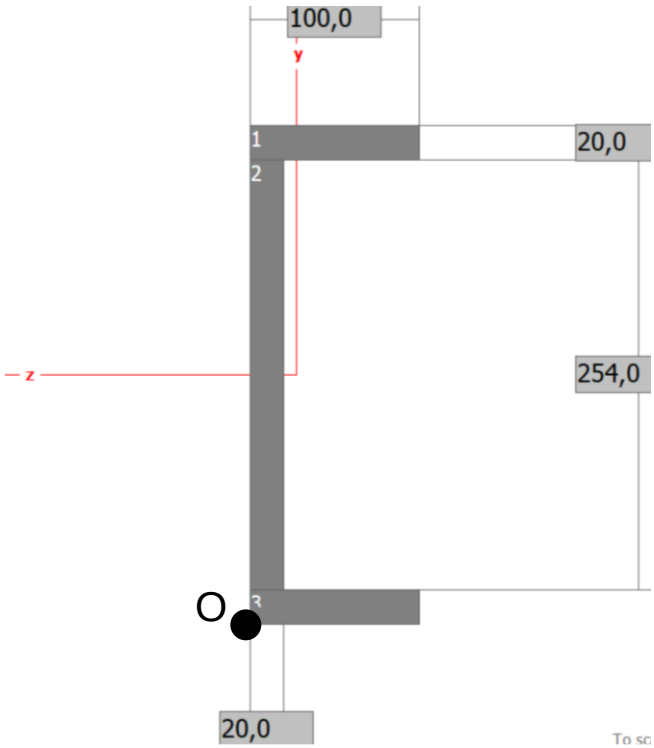


Figura 42. Sección transversal, marco. Fuente propia.

Utilizando la ecuación 19, se halla el esfuerzo en función del momento máximo.

$$\sigma = \frac{1569{,}77\ N.m\ (147x10^{-3}m^3\ )}{1{,}025\ x\ 10^{-4}m^4\ x\ 10^{-6}}$$

$$\sigma_t = 2{,}251\ Mpa$$

En paralelo, (Goodno,2009), define el cortante máximo, como se muestra en la ecuación 21.

Ecuación 21

$$\tau_{max} = \frac{V \cdot h^2}{8 \cdot I} = \frac{3 \cdot V}{2 \cdot A}$$

Donde:

- V: es la carga máxima resultante del diagrama de cargas
- A: es el área de la sección de la fuerza

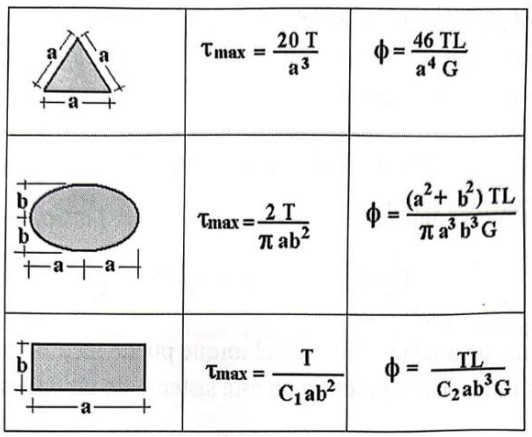
$$\tau_{max} = \frac{3\ (5256{,}58N)}{2\ (20x10^{-3}m)(\ 100x10^{-3}\ m)} = 3{,}942\ MPa$$

El cortante máximo debido al torque se define como:

Ecuación 22

$$\tau = \frac{T}{c_1\ x\ a\ x\ b^2}$$

- T: es el torque, que para este caso es de 234 Nm (ver figura 37)
- C1: es un coeficiente que depende de la forma (ver figura 43), para este caso a/b = 3.0, asumimos C1 como 0.267
- a y b son características geométricas



a/b	C1	C2
1.0	0.208	0.1406
1.2	0.219	0.1661
1.5	0.231	0.1958
2.0	0.246	0.229
2.5	0.258	0.249
3.0	0.267	0.263
4.0	0.282	0.281
5.0	0.291	0.291
10.0	0.312	0.312
α	0.333	0.333

Figura 43. Coeficientes para secciones rectangulares. Fuente Pastrán (2013, p.134.)

$$\tau = \frac{234\ Nm}{0{,}267(\ 100x10^{-3}m)^2(\ 290x10^{-3}m)}$$

$$\tau = 0{,}298\ MPa$$

El esfuerzo de Von mises se define como:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma x^2 + 3({\tau_{xy}}^2 + {\tau_{xz}}^2)}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{2{,}251^2 + 3(3{,}942^2 + 0{,}298^2)}$$

$$\sigma_{VM} = 7{,}208\ MPa$$

Tomando el esfuerzo de Von mises, se obtiene un factor de seguridad de 2,1, resolviendo la restricción sin fricción 2, de igual manera se comportará la restricción sin fricción 5.

Por otra parte, la viga inferior del marco está sujeta a dos cargas puntuales de 3757,77 N (ver figura 44), referentes a las restricciones fijas 3 y 4. Estas serán contenidas con un perfil en U, con una sección ilustrada en la figura 42.

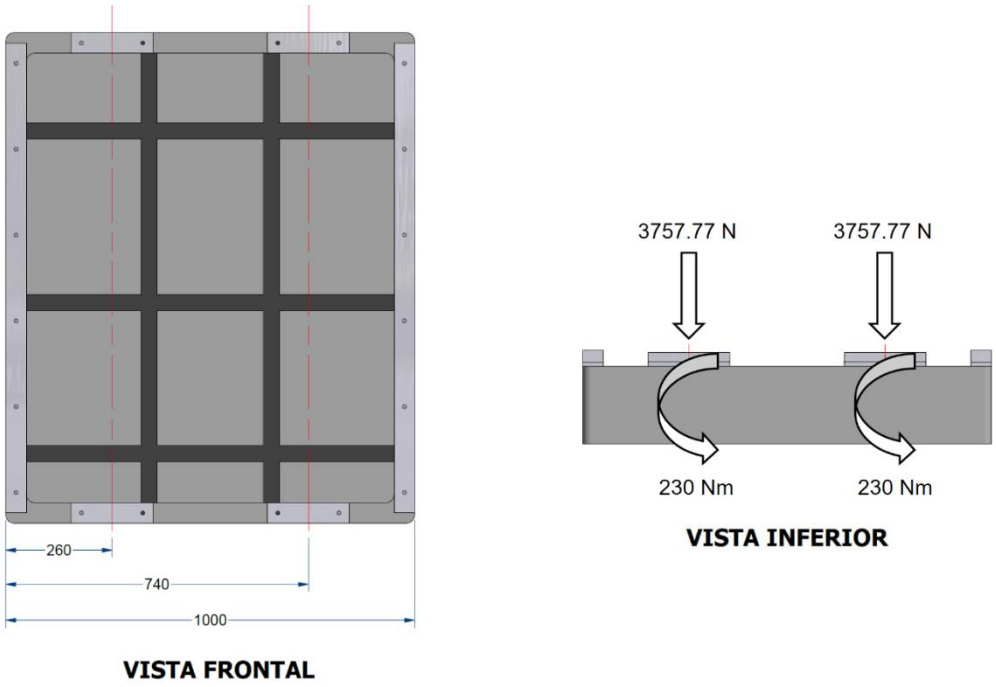


Figura 44. Esquema de viga inferior, marco. Fuente propia.

Usando el mismo procedimiento que se hizo en la viga anterior, se calculan las reacciones y se generan los diagramas.

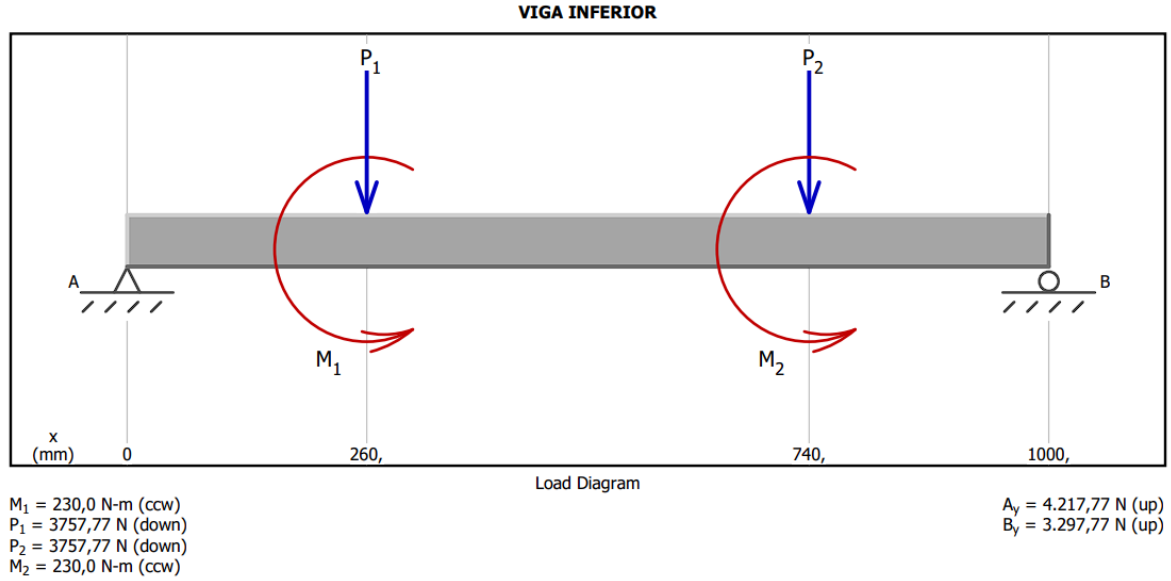


Figura 45. Diagrama de fuerza libre, marco. Fuente propia.

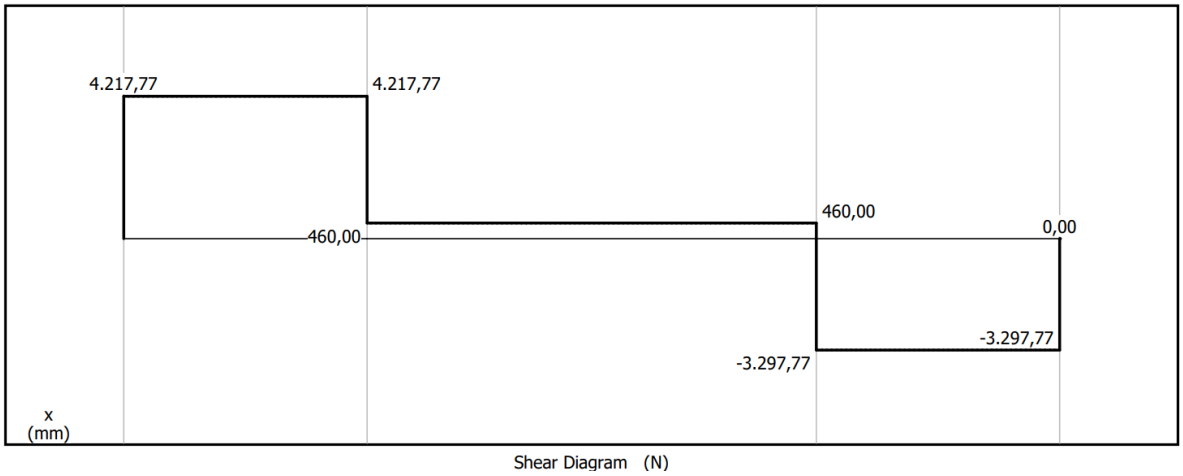


Figura 46. Diagrama de fuerza cortante, marco. Fuente propia.

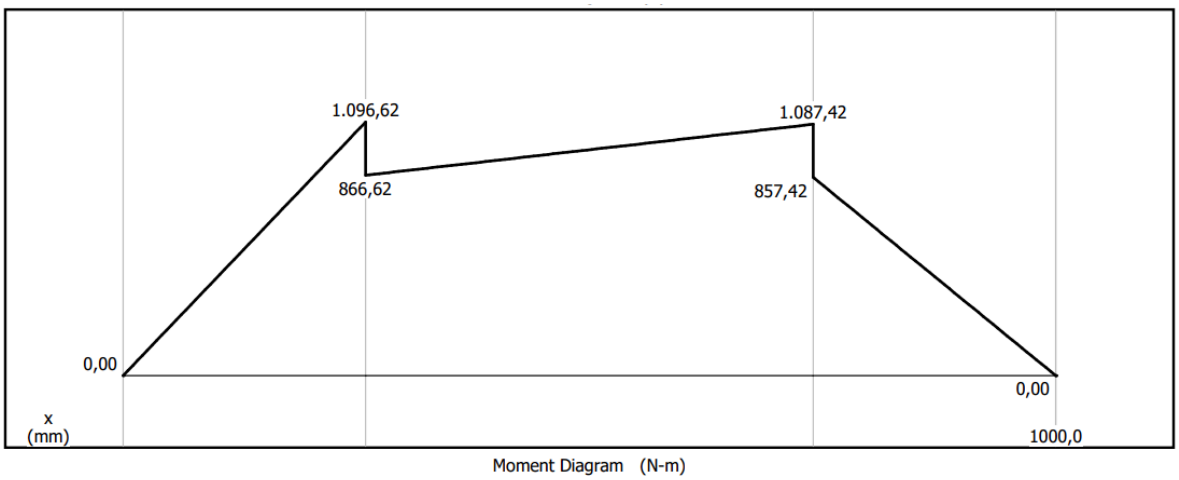


Figura 47. Diagrama de momento flector, marco. Fuente propia.

Como las propiedades geométricas son idénticas al perfil anterior, se procede a calcular los esfuerzos y los cortantes máximos.

$$\sigma_t = \frac{1096{,}62\ Nm\ (147x10^{-3}m^3\ )}{1{,}025x10^{-4}m^4} = \ 1{,}572\ MPa$$

$$\tau_{max} = \frac{3\ (4217{,}77N)}{2\ (20x10^{-3}m)(\ 100x10^{-3}\ m)} = 3{,}163\ MPa$$

$$\tau = \frac{230\ Nm}{0{,}267(\ 100x10^{-3}m)^2(\ 290x10^{-3}m)} = 0{,}293\ MPa$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{1{,}572^2 + 3(3{,}163^2 + 0{,}293^2)} = 5{,}723\ MPa$$

Usando el esfuerzo de Von mises, se obtiene un factor de seguridad de 2,64.

Por último, la viga superior está sometida de igual manera a una fuerza puntual de 2925 N y un momento de 170 Nm en las restricciones 1 y 6 (ver figura 48), el perfil es diferente y esta descrito en la figura 49.

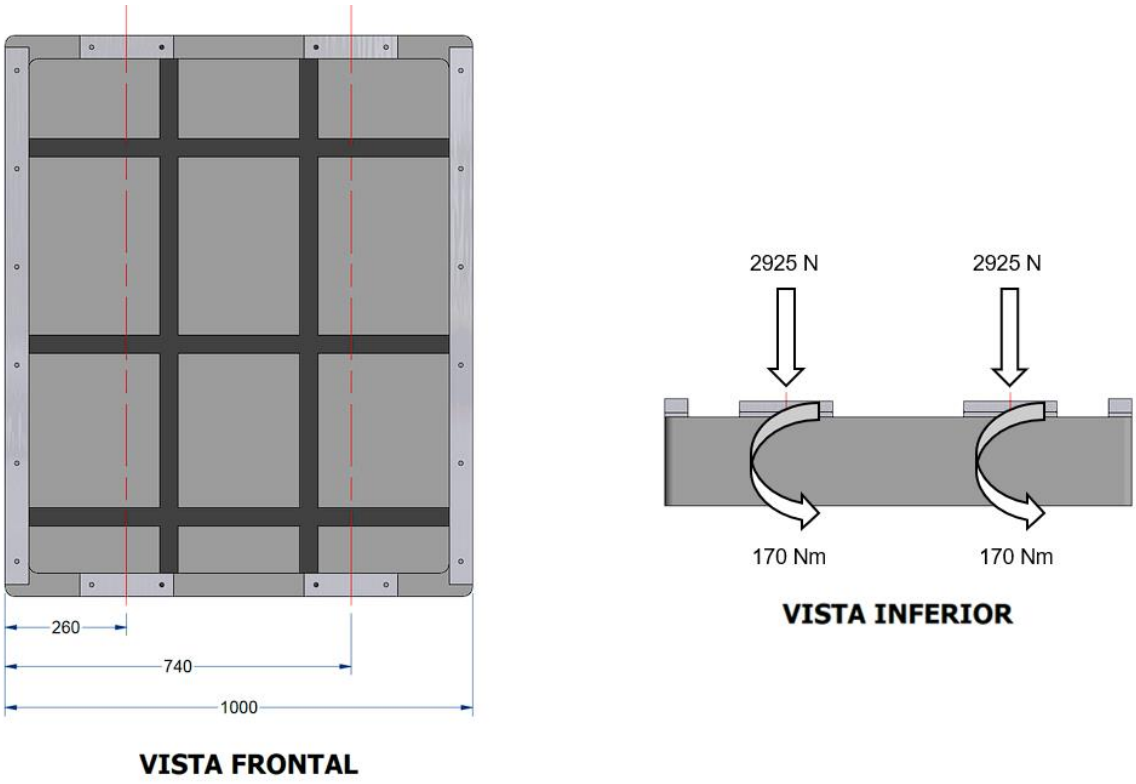


Figura 48. Esquema de viga superior, marco. Fuente propia.

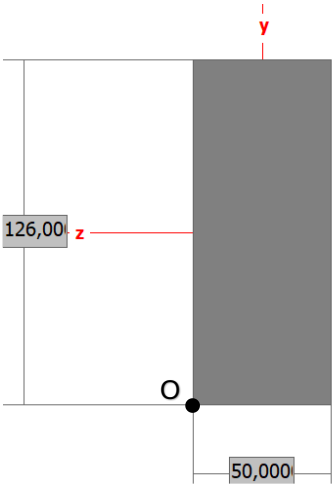


Figura 49. Sección transversal, marco. Fuente propia.

Asimismo, sea "O" el punto de referencia respecto al par de coordenadas (z,y), entonces:

Fig.	B [mm]	h [mm]	Y' [mm]	A [mm2]	Y'A [mm3]	Ix [mm4]	d [mm]	It [mm4]	C1 [mm]
1	50	126	63	6300	396900	8334900	0	8334900	63,00
Σ				**6300**	**396900**			**8,33490E+06**	

Tabla 14. Inercia de la sección transversal. Fuente propia.

Usando el mismo procedimiento se calculan las reacciones y se generan los diagramas de fuerza libre, fuerza cortante y momento flector, respectivamente.

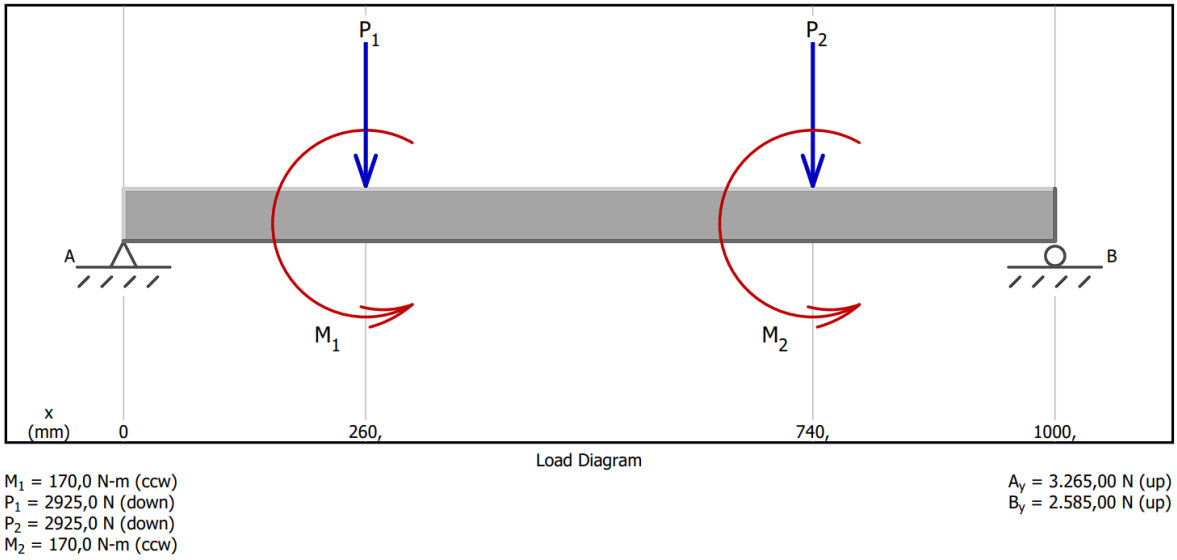


Figura 50. Diagrama de fuerza libre, marco. Fuente propia.

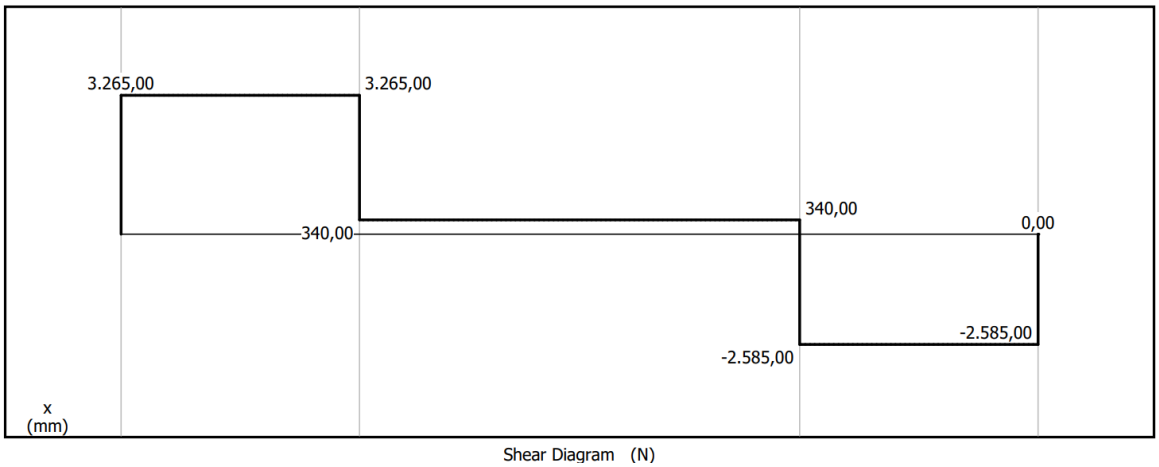


Figura 51. Diagrama de fuerza cortante, marco. Fuente propia.

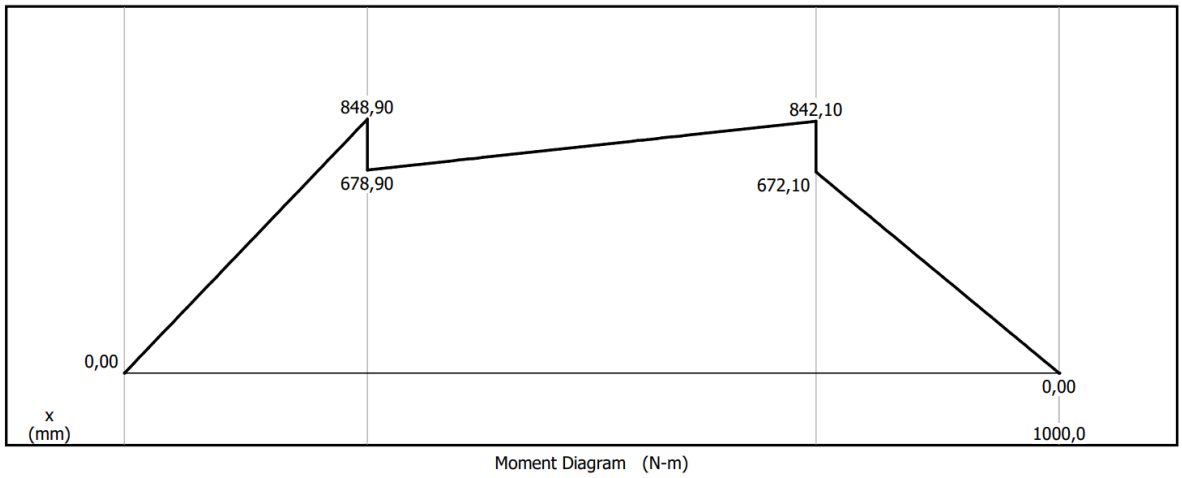


Figura 52. Diagrama de momento flector, marco. Fuente propia.

Se procede a calcular los esfuerzos y los cortantes máximos.

$$\sigma_t = \frac{849\ Nm\ (63x10^{-3}m^3\ )}{8{,}335\ mm^4} = \ 6{,}417\ MPa$$

$$\tau_{max} = \frac{3\ (3265\ N)}{2\ (50\ mm)(\ 126\ mm)} = 0{,}777\ MPa$$

$$\tau = \frac{170\ Nm}{0{,}258(\ 50\ mm)^2(\ 126\ mm)} = 2{,}091\ MPa$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{6{,}417^2 + 3(0{,}777^2 + 2{,}091^2)} = 7{,}4914\ MPa$$

Analizando el esfuerzo de Von mises respecto al límite de fluencia del polipropileno, el factor de seguridad será de 2,017.

A partir de las reacciones que se generan en las restricciones fijas se puede transferir las cargas al marco y analizar la simulación, como se ve en la figura 53.

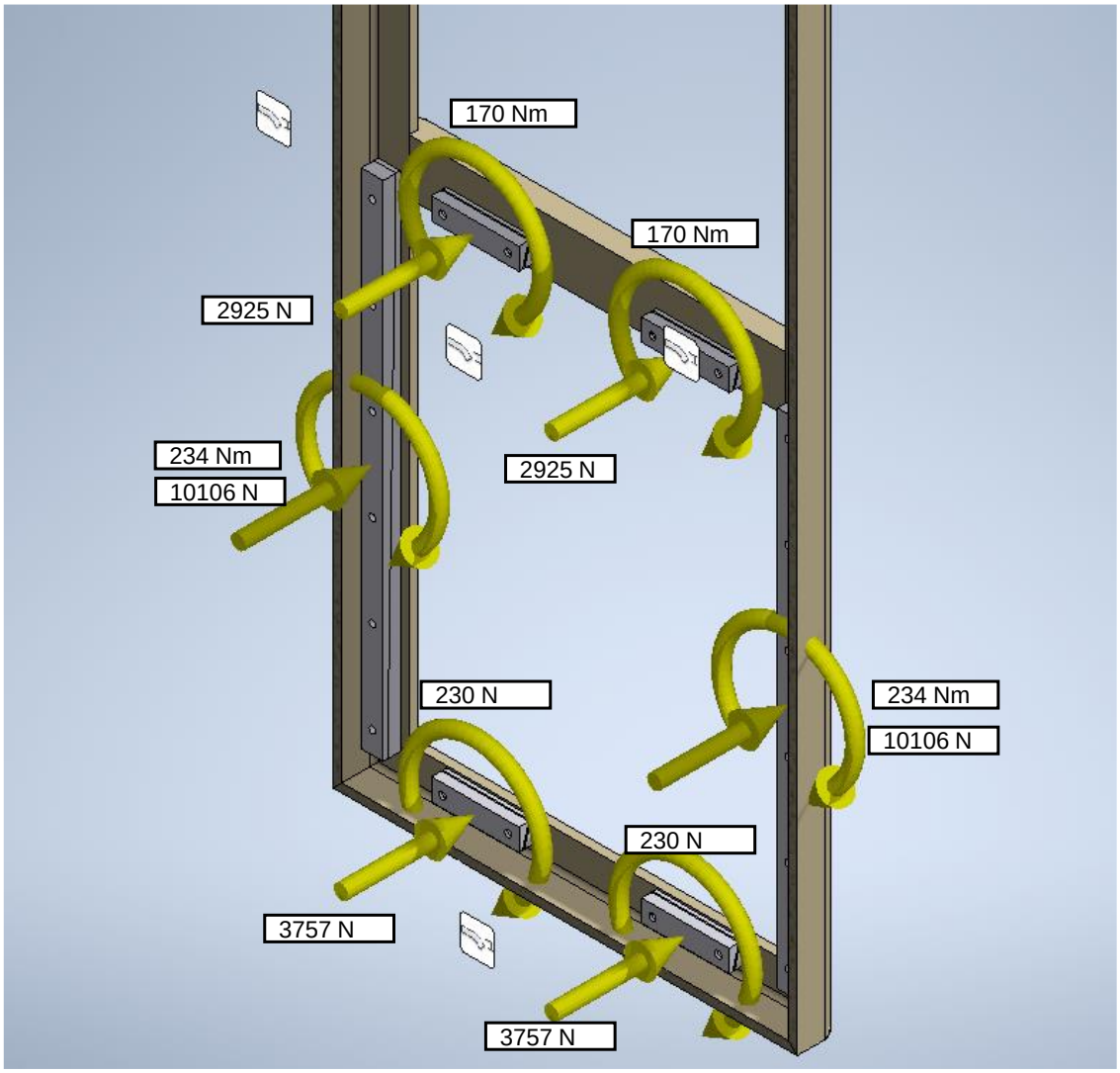


Figura 53. Cargas según restricciones, marco. Fuente propia.

El esfuerzo máximo se genera en el concentrador de esfuerzos de la cuña lateral, con una magnitud de 5,517 MPa, cuya zona se observa en la figura 54.

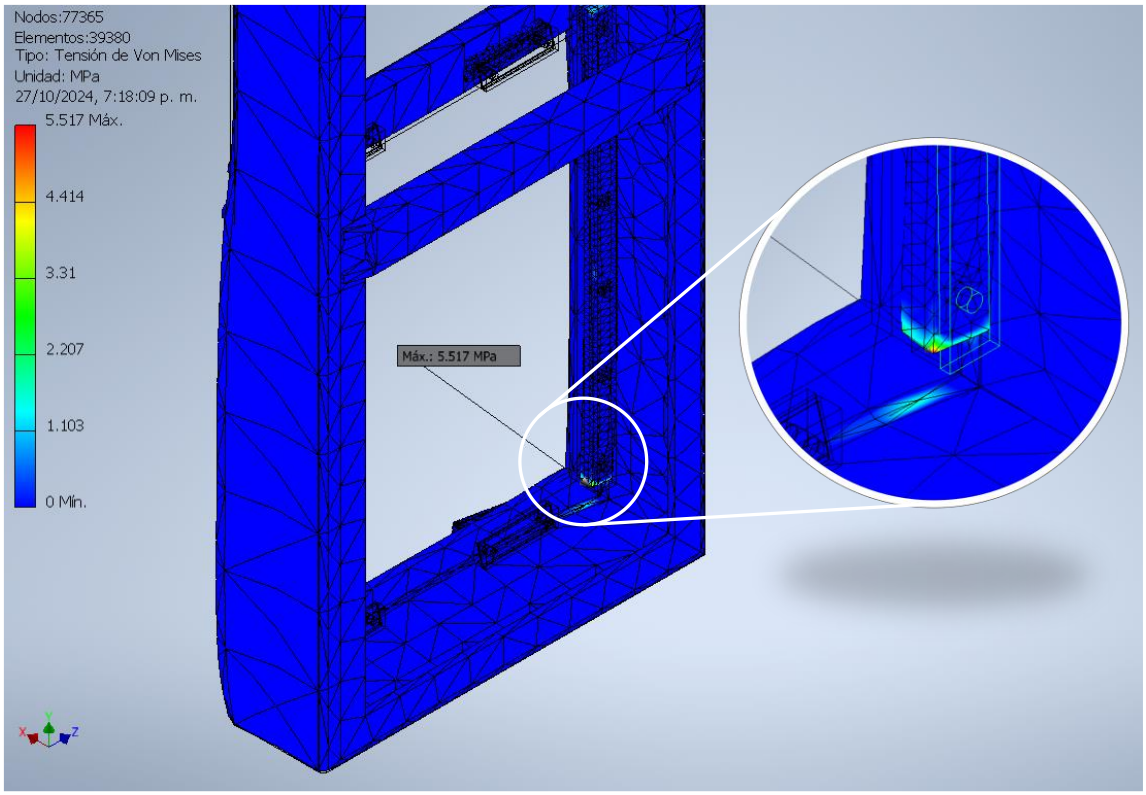


Figura 54. Esfuerzo de Von mises en el marco. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

La mayor deformación se genera en la parte inferior del marco donde descansa la cuña, esta deformación es de 1,621 mm como se observa en la figura 55, esta es menor a lo indicado por la norma AWWA C561 que lo limita a L/ 360, que sería de 2,77 mm partiendo de la menor longitud del marco (1000 mm).

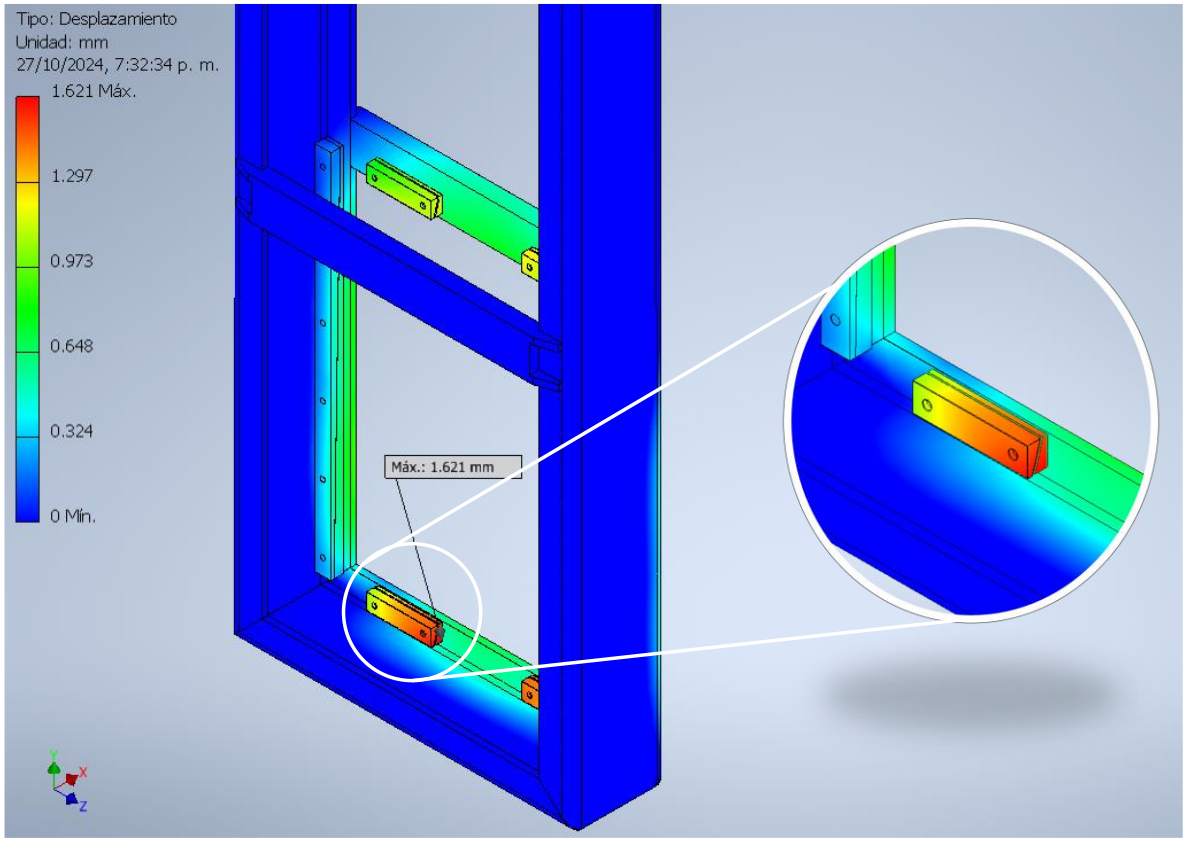


Figura 55. Desplazamiento en el marco. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

El factor de seguridad mínimo es de 3,81 y se encuentra en la zona donde el esfuerzo es máximo. El mínimo indicado por la AWWA C561 es de 2,0.

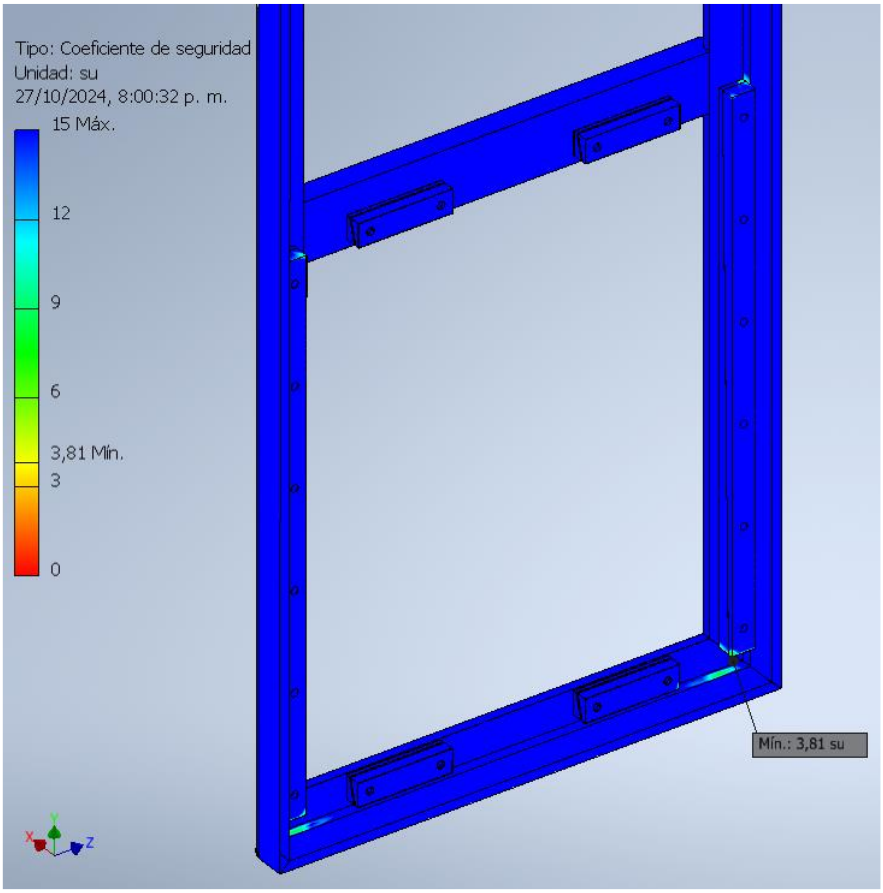


Figura 56. Factor de seguridad en el marco. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

Ahora, validando la integridad mecánica del eje por medio de elementos finitos, el cual tiene como material de fabricación polipropileno reciclado. Tomando la carga de 14897 N, hallada en el apartado 8.7 (fuerza de accionamiento) y aplicando las restricciones en el soporte de izaje y el rigidizador del vástago, también fabricados en polipropileno reciclado, tal como ilustra la figura 57.

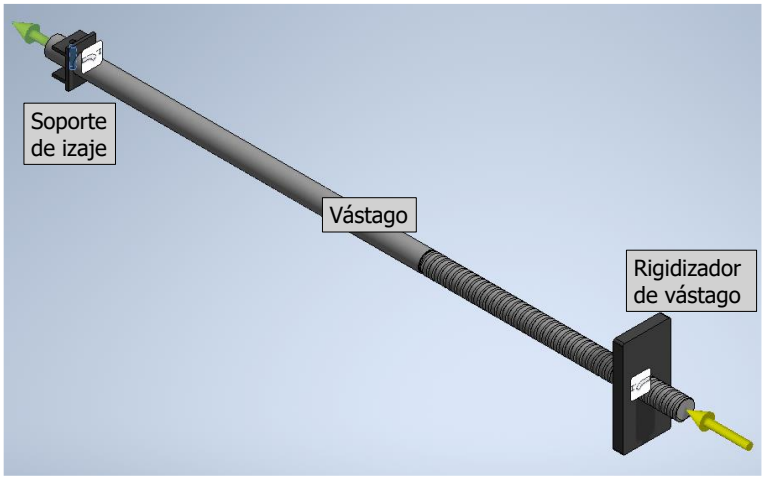


Figura 57. Parámetros de simulación, vástago. Fuente propia.

Como muestra la figura 58, la mayor carga se genera sobre el rigidizador del vástago, con una magnitud de 8,827 MPa. En paralelo, el mayor esfuerzo que se ejerce en el soporte de izaje es de 3,757 MPa.

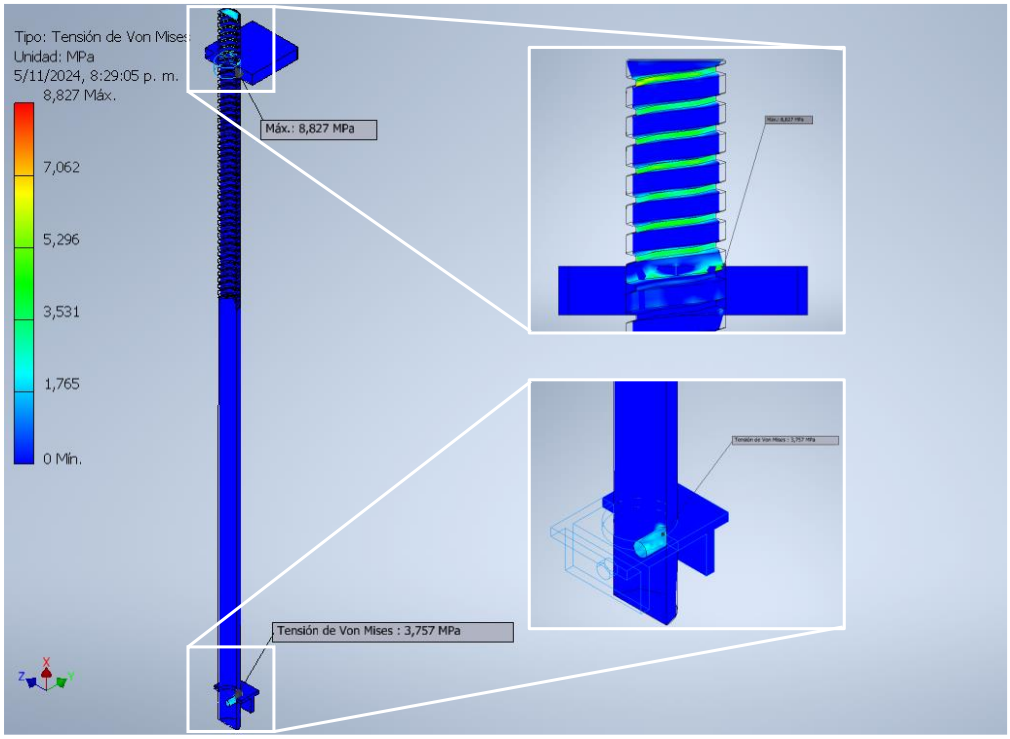


Figura 58. Esfuerzo de Von mises, vástago. Simulación por elementos finitos. Fuente propia.

Respecto al desplazamiento, su valor máximo se genera en el extremo del vástago, donde se aplica la fuerza, siendo de 1,165 mm.

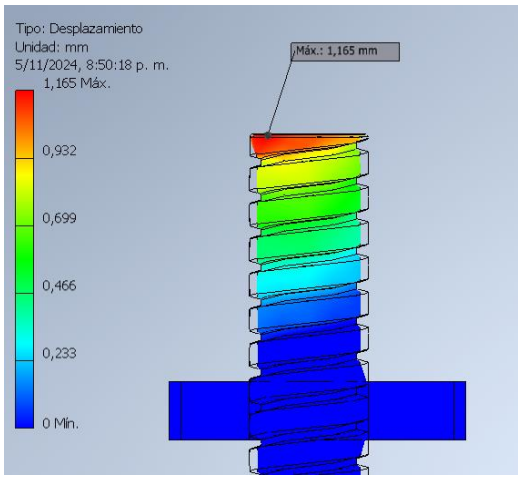


Figura 59. Desplazamiento máximo, vástago. Según simulación por elementos finitos.

Fuente propia.

Como se observa en la figura 60, en el extremo del eje, donde se aplica la fuerza se presenta el factor de seguridad más bajo, el cual es de 1,71.

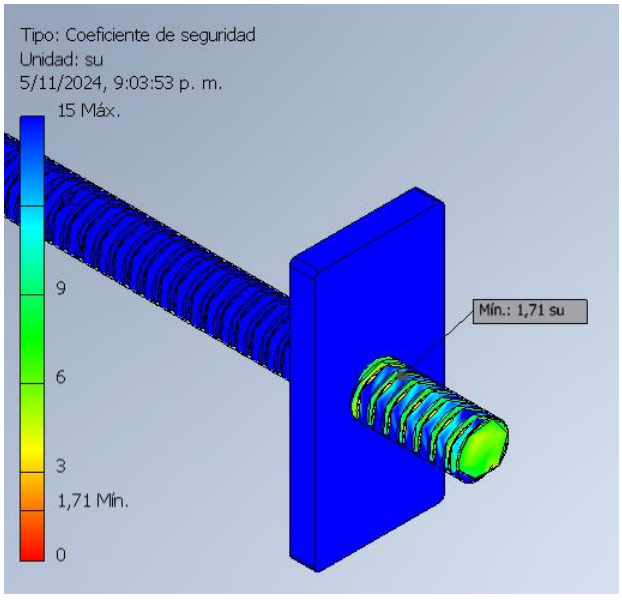


Figura 60. Factor de seguridad, vástago. Según simulación por elementos finitos. Fuente propia.

Continuando con la validación de elementos finitos, el volante estará apoyado sobre dos vigas pernadas al marco, con una sección transversal descrita en la figura 49, con un material base de polipropileno reciclado.

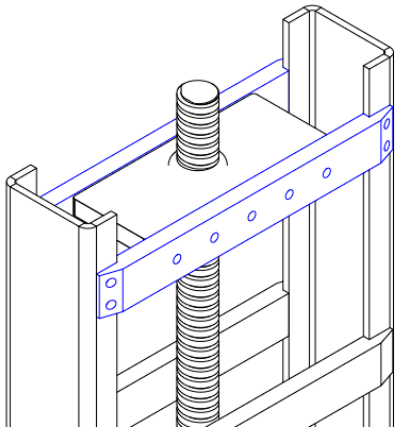


Figura 61. Esquema, vigas de soporte para el volante. Fuente propia.

Las vigas se restringen por medio de 18 pernos de Ø1" en polipropileno. Estas, soportan una carga de 14770 N, fuerza necesaria para elevar la compuerta según los cálculos previamente realizado en la tabla 12.

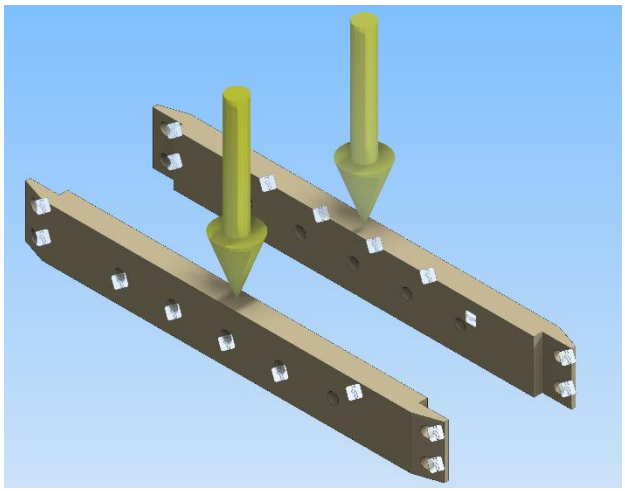


Figura 62. Parámetros de simulación, vigas de soporte para el volante. Fuente propia.

El esfuerzo máximo se genera en uno de los pasadores, con una magnitud de 6,2 MPa, como se observa en la figura 63.

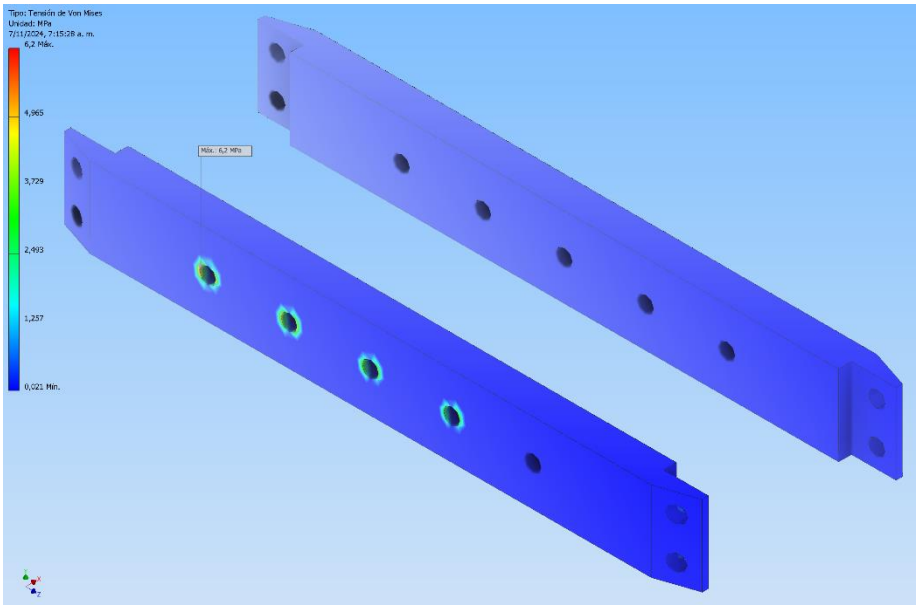


Figura 63. Esfuerzo Von mises, vigas de soporte para el volante. Fuente propia.

La mayor deformación se genera en la parte superior de las vigas, su desplazamiento es de 0,274 mm como se observa en la figura 64.

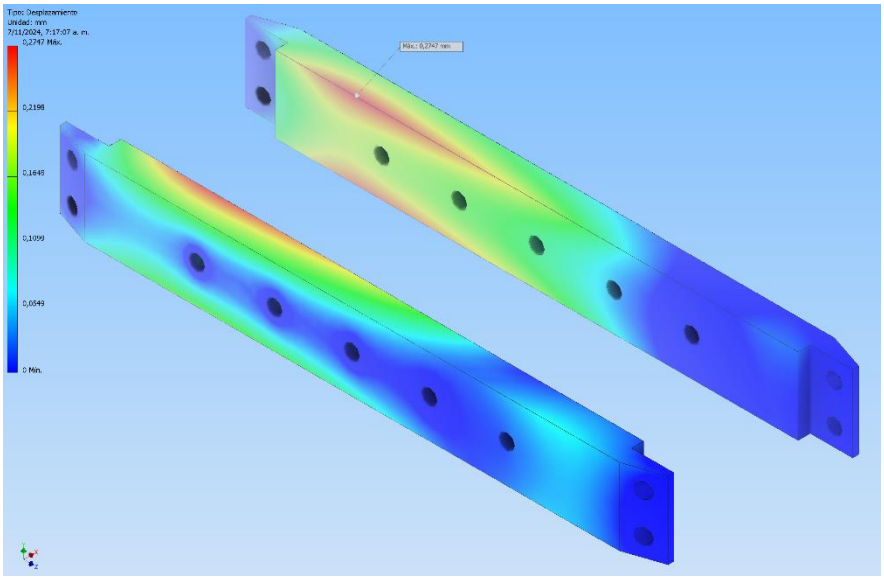


Figura 64. Desplazamiento, vigas de soporte para el volante. Fuente propia.

El factor de seguridad mínimo es de 2,44 y se encuentra en la zona donde el esfuerzo es máximo. El mínimo indicado por la AWWA C561 es de 2,0.

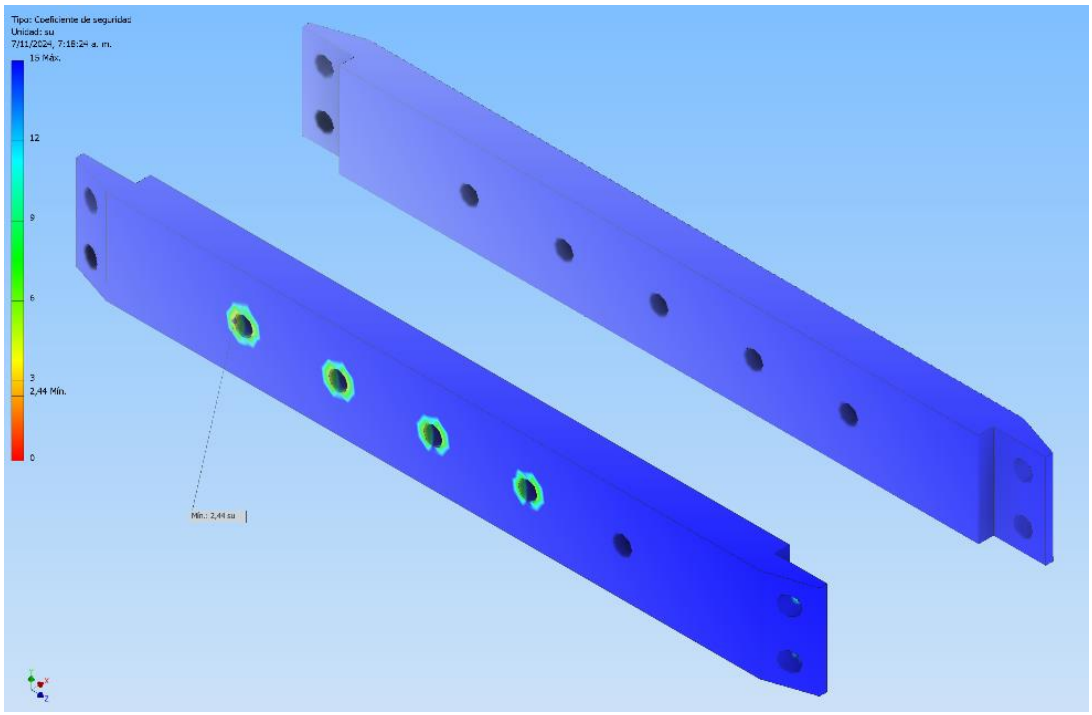


Figura 65. Factor de seguridad, vigas de soporte para el volante. Fuente propia

Para validar los pernos, se analizaron las reacciones generadas en las restricciones mediante la simulación, siendo la mayor carga de 1273,69 N, ubicada en la restricción 18, tal como se muestra en la figura 64. Utilizando la formula del cortante máximo (Ecuación 21), en un perno fabricado en UHMW, cuyo límite de fluencia a cortante es de 33,1 MPa (Figura 37) y con un diámetro de Ø1”, se comprobó su resistencia mecánica.

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot (1274\ N)}{2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot (25{,}4\ mm)^2\right)} = 3{,}771\ MPa$$

$$F.S = \frac{33{,}10\ MPa}{3{,}771\ MPa} = 8{,}777$$

Dando como resultado un esfuerzo cortante máximo de 3,771 MPa y un factor de seguridad de 8,777.

Fuerza y pares de reacción en restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	444,81 N	156,568 N	0,892831 N m	0,754934 N m
		403,597 N		-0,43816 N m
		102,235 N		0,187716 N m
Restricción fija:2	437,766 N	-161,546 N	0,818349 N m	0,752461 N m
		354,797 N		0,17701 N m
		-199,152 N		0,268636 N m
Restricción fija:3	358,071 N	82,4442 N	0,558023 N m	0,371306 N m
		348,197 N		-0,34547 N m
		13,2874 N		0,232747 N m
Restricción fija:4	317,943 N	-95,6903 N	0,691271 N m	0,444519 N m
		274,064 N		0,396522 N m
		-129,692 N		0,350754 N m
Restricción fija:5	487,766 N	-4,02343 N	1,56411 N m	-1,25122 N m
		481,554 N		-0,528286 N m
		-77,4933 N		0,775759 N m
Restricción fija:6	451,044 N	0 N	1,85062 N m	-1,51305 N m
		416,663 N		0,707094 N m
		172,722 N		0,797184 N m
Restricción fija:7	656,254 N	296,709 N	2,14139 N m	-1,17992 N m
		494,499 N		1,78278 N m
		-313,216 N		0,122572 N m
Restricción fija:8	717,429 N	-311,157 N	2,13018 N m	-1,11225 N m
		471,953 N		-1,81045 N m
		441,754 N		0,151126 N m
Restricción fija:9	640,672 N	-42,0539 N	1,0631 N m	1,06072 N m
		639,265 N		-0,0709295 N m
		-5,73334 N		0,0038986 N m
Restricción fija:10	948,256 N	-38,8119 N	0,692599 N m	0,668325 N m
		947,46 N		-0,160352 N m
		-1,49593 N		-0,0855711 N m
Restricción fija:11	1054,33 N	-11,0971 N	0,577244 N m	0,162018 N m
		1053,83 N		0,0470789 N m
		30,5849 N		-0,552036 N m
Restricción fija:12	1031,6 N	45,1954 N	0,510238 N m	0,34998 N m
		1030,42 N		0,0502204 N m
		19,8858 N		0,367879 N m
Restricción fija:13	962,235 N	59,0338 N	0,798064 N m	0,747781 N m
		960,394 N		-0,116072 N m
		7,40055 N		0,253492 N m
Restricción fija:14	973,079 N	48,2947 N	0,777675 N m	0,571032 N m
		971,772 N		-0,118201 N m
		-14,4806 N		-0,514519 N m
Restricción fija:15	1592,92 N	-4,60829 N	0,846452 N m	-0,0313911 N m
		1592,04 N		-0,0291574 N m
		-52,8505 N		0,845367 N m
Restricción fija:16	1967,57 N	-3,2469 N	19,4567 N m	1,74067 N m
		1965,6 N		0,12571 N m
		-87,9799 N		-19,3782 N m
Restricción fija:17	1220,43 N	-50,3777 N	0,329741 N m	0,0626196 N m
		1218,4 N		-0,227687 N m
		48,9737 N		-0,230145 N m
Restricción fija:18	1273,69 N	34,0223 N	0,431994 N m	-0,135321 N m
		1272,42 N		-0,0417948 N m
		45,3276 N		0,408118 N m

Figura 66. Reacciones generadas en las restricciones, vigas de soporte del volante. Fuente propia.

Del mismo modo, hay vigas en el marco que no se encuentran pernadas, tal como ilustra la figura 67. Para estos elementos, se utilizó las propiedades del adhesivo LOCTITE® HY 4070™. Según su ficha técnica, tiene una resistencia al corte en placas de 7 MPa para materiales en PVC, el cual es el más cercano por sus propiedades químicas al polipropileno.

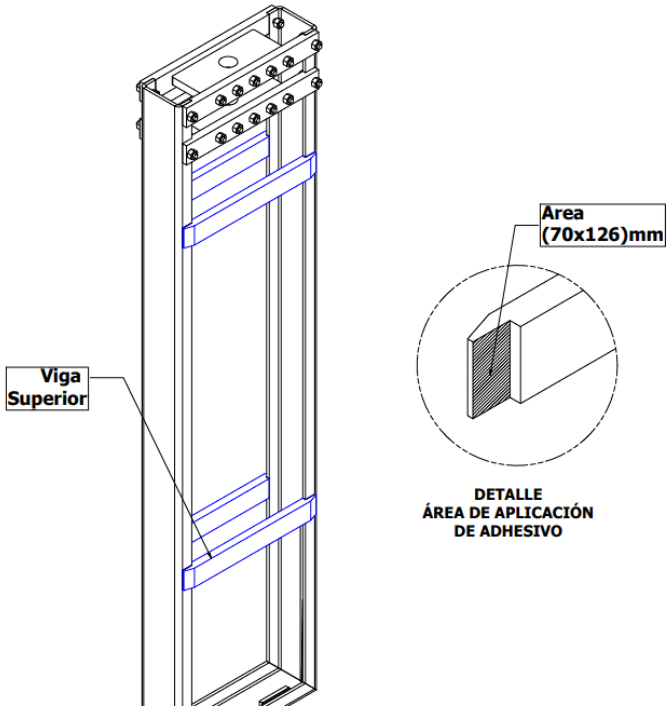


Figura 67. Vigas ensambladas con adhesivo LOCTITE. Fuente propia.

Resistencia al Corte en placas, ISO 4587::		
Acero dulce(Sandblasteado)	N/mm²	25
	(psi)	(3,625)
Aluminio	N/mm²	15
	(psi)	(2,175)
Aluminio (etched)	N/mm²	20
	(psi)	(2,900)
Policarbonato	* N/mm²	12
	* (psi)	(1,740)
PVC	* N/mm²	7
	* (psi)	(1,015)
Zinc dichromate	N/mm²	22
	(psi)	(3,190)

Figura 68. LOCTITE® HY 4070™ LOCTITE. Fuente LOCTITE.

Para la simulación, el marco se restringe en las áreas de aplicación del adhesivo de las 4 vigas, respecto a las cargas, se utilizaron las mismas fuerzas puntuales y momentos enseñados en la figura 53.

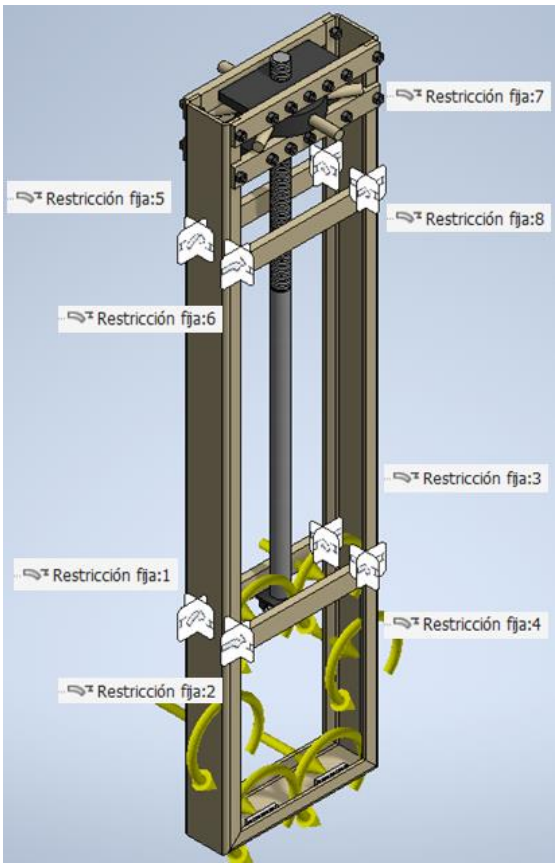


Figura 69. Parámetros de simulación, ensamble de vigas al marco. Fuente propia.

⊟ **Fuerza y pares de reacción en restricciones**

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	9337,75 N	-1621,8 N	294,498 N m	282,342 N m
		9188,16 N		74,0523 N m
		375,543 N		-39,0884 N m
Restricción fija:2	9583,39 N	-1768,87 N	330,96 N m	-317,246 N m
		9412,97 N		-77,4416 N m
		-329,278 N		-53,7819 N m
Restricción fija:3	9676,64 N	-3184,28 N	308,546 N m	211,808 N m
		-9133,41 N		-72,1436 N m
		280,241 N		-212,446 N m
Restricción fija:4	10012 N	-3000,45 N	311,573 N m	-231,263 N m
		-9543,35 N		67,7882 N m
		-401,383 N		-197,484 N m
Restricción fija:5	60,2581 N	11,2308 N	2,01458 N m	-1,6526 N m
		59,1266 N		0,373682 N m
		2,9926 N		1,08988 N m
Restricción fija:6	53,6947 N	11,0228 N	0,834384 N m	0,737445 N m
		52,3918 N		-0,0279472 N m
		4,08913 N		0,389347 N m
Restricción fija:7	7,16001 N	-1,70472 N	0,369414 N m	-0,304927 N m
		-3,27231 N		-0,00640342 N m
		-6,13609 N		0,208436 N m
Restricción fija:8	13,1291 N	9,4899 N	2,25821 N m	2,15759 N m
		7,24787 N		0,280913 N m
		-5,45737 N		0,604488 N m

Figura 70. Reacciones generadas en las restricciones, vigas del marco. Fuente propia.

Se analizaron las reacciones generadas en las restricciones mediante la simulación, siendo la mayor carga de 10012 N, ubicada en la restricción 4, tal como se muestra en la figura 69. Utilizando la formula del cortante máximo (Ecuación 21) y teniendo una sección transversal de 70mm x 126 mm (Figura 70), se comprobó la integridad de la unión entre las vigas y el marco obteniendo un esfuerzo máximo de 1,702 MPa y un factor de seguridad de 4,11.

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot (10012\ N)}{2 \cdot (70mm\ \cdot\ 126mm)}$$

$$\tau_{max} = 1{,}703\ MPa$$

$$F.S = \frac{7{,}000\ MPa}{1{,}703\ MPa}$$

$$F.S = 4{,}11$$

Continuando con la funcionalidad del adhesivo, se analizó la brida que permite la unión de la compuerta al pasa-muro de la obra civil. Esta se adhiere al marco y la viga superior, tal como lo muestra la Figura 71.

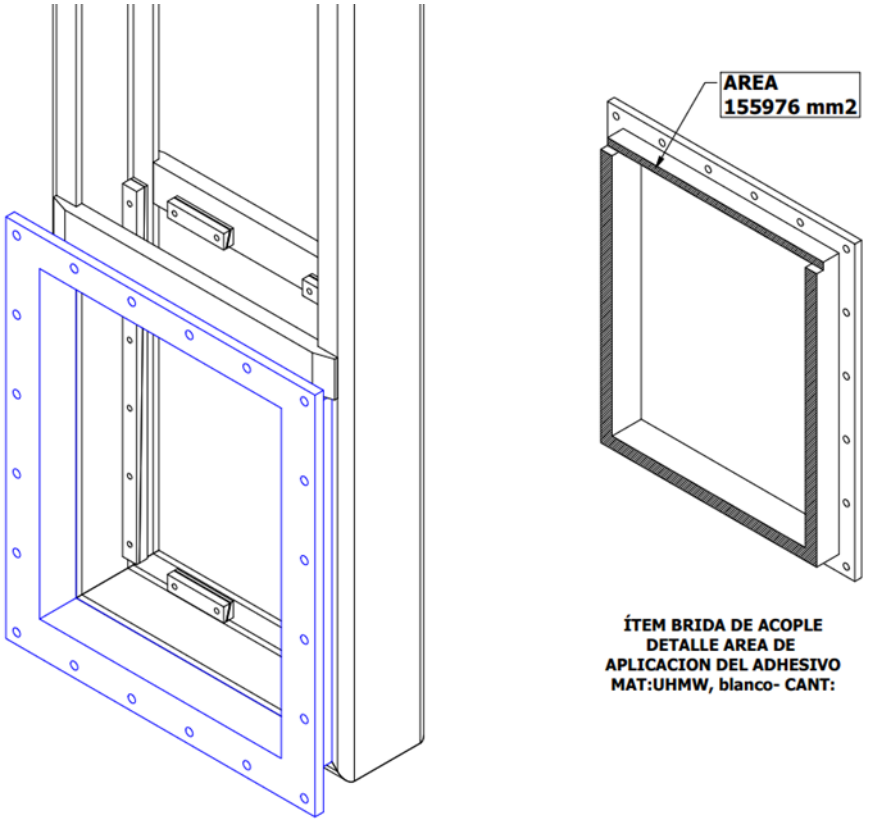


Figura 71. Brida de acople ensamblada con adhesivo LOCTITE. Fuente propia.

En los parámetros para la simulación, se restringe la cara donde se aplicará el adhesivo LOCTITE® HY 4070™ y se mantienen las fuerzas puntuales y momentos enseñado en la figura 58.

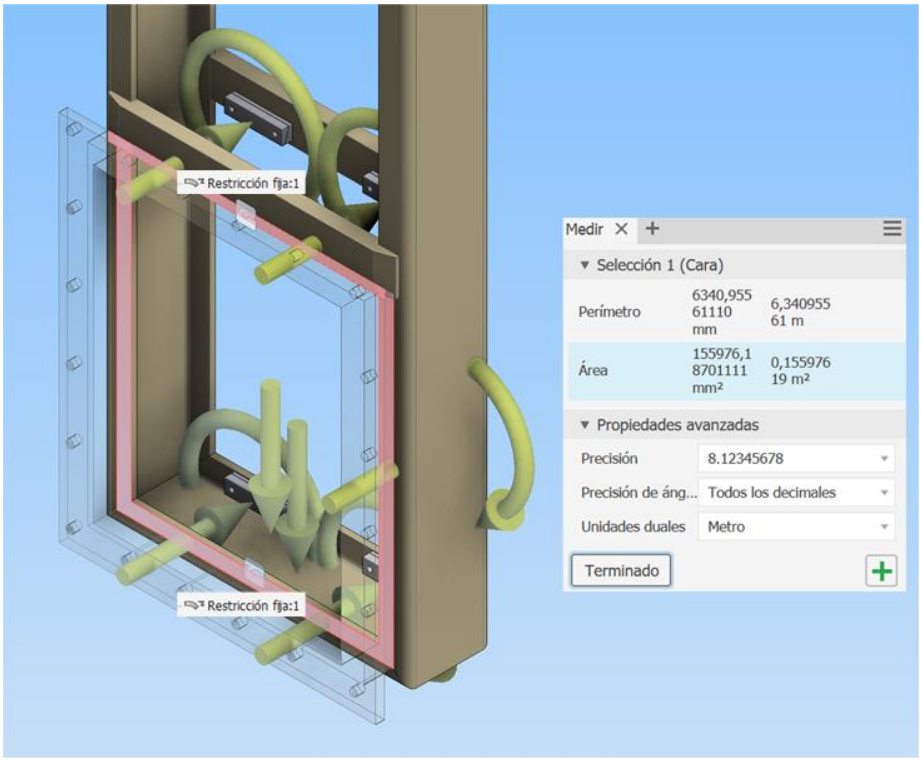


Figura 72. Parámetros de simulación, ensamble de brida al marco. Fuente propia.

Se analizo la reacción generada en la restricción mediante la simulación, teniendo una fuerza de 27106 N, tal como se muestra en la figura 73. Nuevamente se recurre a la formula del cortante máximo (Ecuación 21) y teniendo una sección transversal de 155976 mm^2. De esta manera se validó la unión entre la brida al marco y la viga

superior, obteniendo un esfuerzo cortante máximo de 0,260 MPa y un factor de seguridad de 26,85.

Fuerza y pares de reacción en restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	27106,7 N	-16788 N	3891,47 N m	-635,395 N m
		21282,3 N		0 N m
		0 N		3839,25 N m

Figura 73. Reacción generada en la restricción, brida de acople. Fuente propia.

$$\tau_{max} = \frac{3\ (27106{,}7\ N)}{2\ (155976\ mm^2)}$$

$$\tau_{max} = 0{,}260\ MPa$$

$$F.S = \frac{7{,}00\ MPa}{0{,}260\ Mpa}$$

$$F.S = 26{,}85$$

Validando la brida de acople por medio de elementos finitos, esta tiene como material de fabricación UHMW. A partir de la reacción hallada anteriormente (Figura 73), se puede transferir la carga de 27107 N a la brida y siendo restringida por 20 pernos de Ø1” en UHMW, tal como se ilustra en la figura 74.

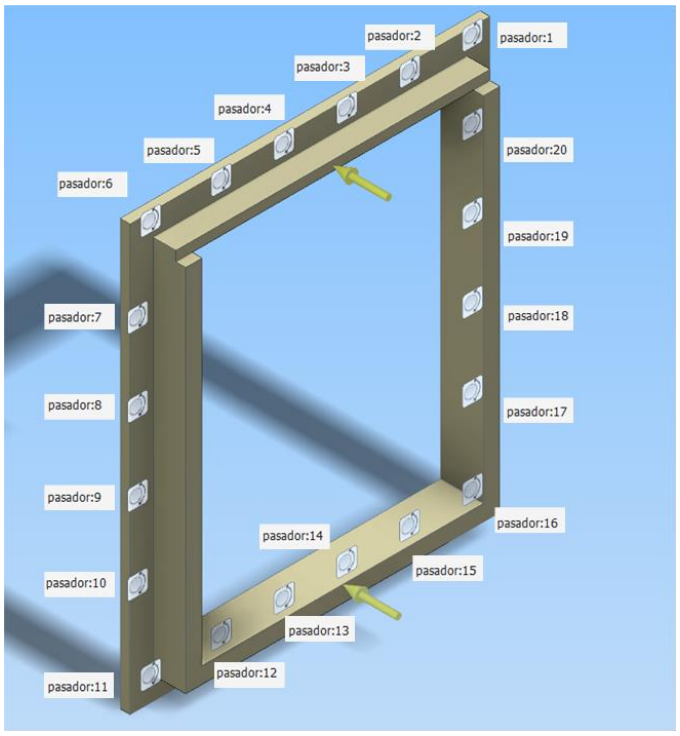


Figura 74. Parámetros de simulación, brida de acople. Fuente propia.

El esfuerzo máximo se genera en uno de los pasadores, con una magnitud de 11,12 MPa y presenta un factor de seguridad de 1,89.

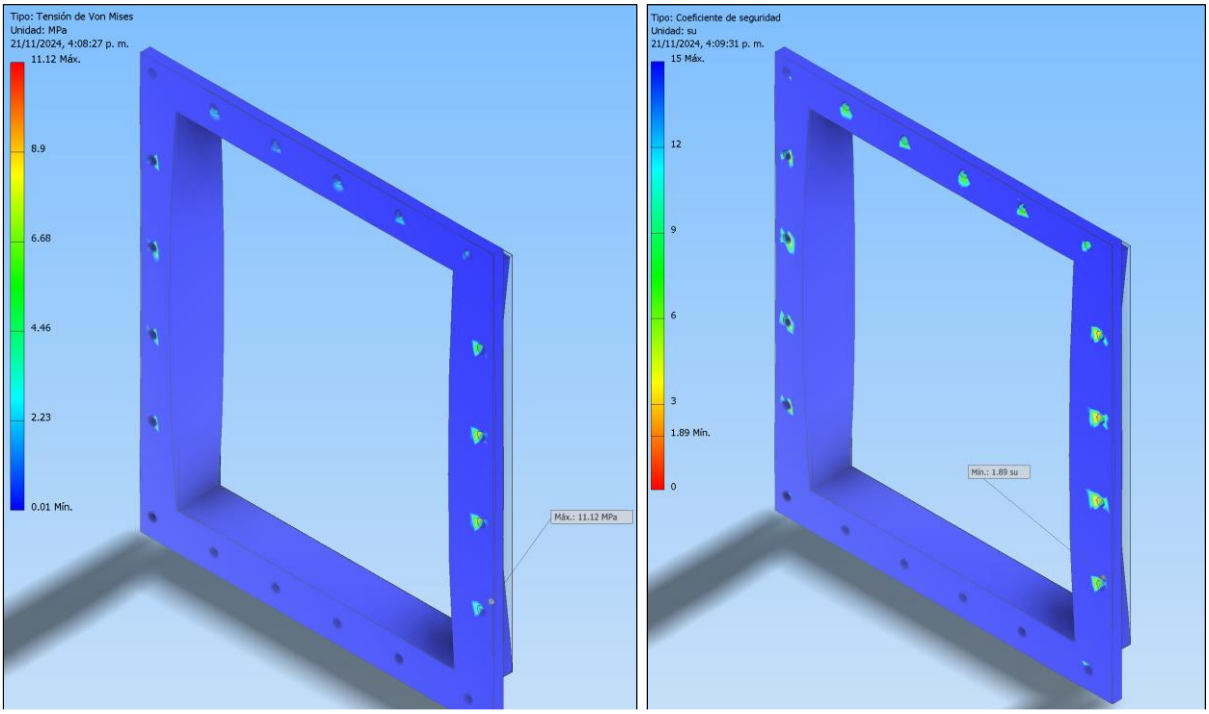


Figura 75. Esfuerzo de Von mises y factor de seguridad, brida de acople. Fuente propia.

La mayor deformación tiene una magnitud de 0,938 mm, ubicada en un costado al interior de la brida de acople, pero al ser un valor tan bajo se considera despreciable.

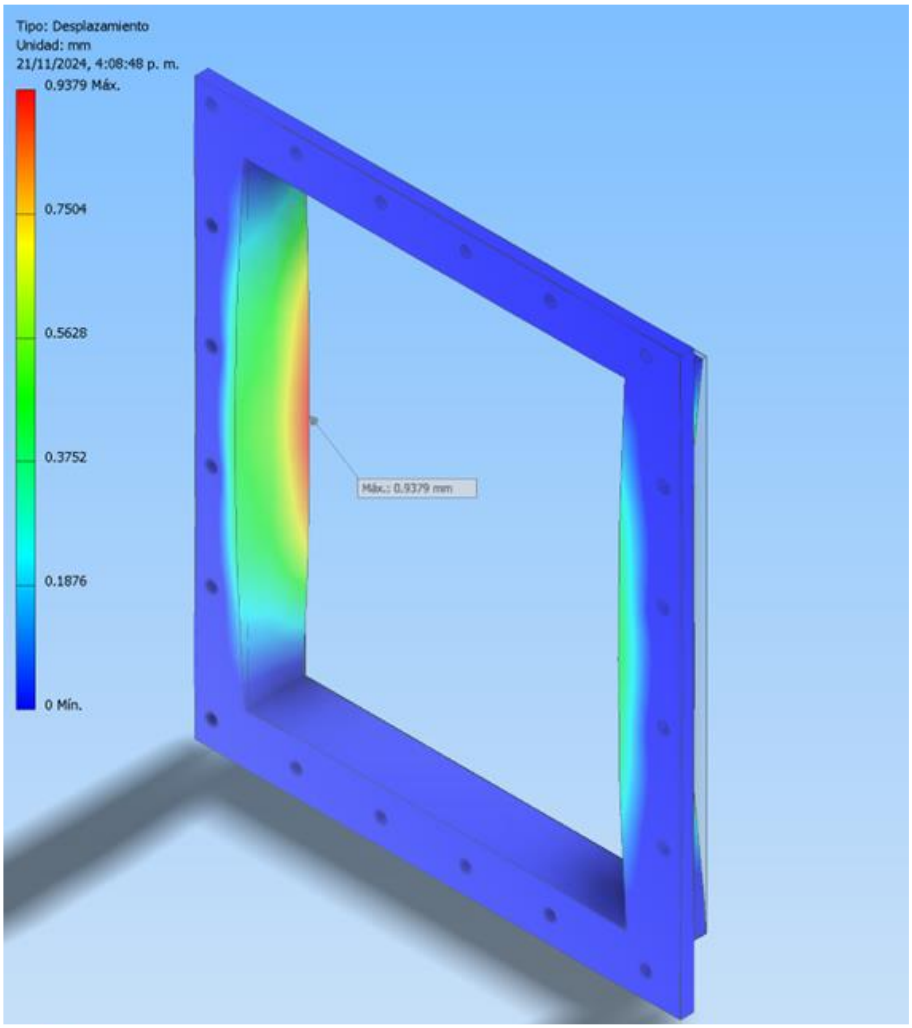


Figura 76. Desplazamiento, brida de acople. Fuente propia.

Para validar los pernos, se analizaron las reacciones generadas en las restricciones mediante la simulación, siendo la mayor carga de 2026 N, ubicada en la restricción 12, tal como se muestra en la figura 77. Utilizando la formula del cortante máximo (Ecuación 21), en un perno fabricado en UHMW, cuyo límite de fluencia a cortante

es de 33,1 MPa (Figura 37) y con un diámetro de Ø1”, se comprobó su resistencia mecánica.

Fuerza y pares de reacción en restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción de pasador:1	589,483 N	421,97 N	15,7635 N m	0 N m
		-310,372 N		11,1326 N m
		270,371 N		11,1604 N m
Restricción de pasador:2	1225,63 N	1180,26 N	34,9859 N m	0 N m
		-273,325 N		-4,74371 N m
		-185,598 N		34,6628 N m
Restricción de pasador:3	851,975 N	851,868 N	40,3 N m	0 N m
		10,7348 N		-0,749496 N m
		-8,17977 N		40,293 N m
Restricción de pasador:4	849,806 N	849,652 N	39,5836 N m	0 N m
		9,13789 N		0 N m
		13,3388 N		39,5836 N m
Restricción de pasador:5	1134,46 N	1106,5 N	41,8998 N m	0 N m
		-137,25 N		4,92711 N m
		209,317 N		41,6091 N m
Restricción de pasador:6	996,023 N	814,114 N	24,4919 N m	-0,0376471 N m
		-497,994 N		-14,325 N m
		-285,097 N		19,8657 N m
Restricción de pasador:7	1641,89 N	1630,58 N	63,9956 N m	0 N m
		-65,7926 N		63,8659 N m
		180,819 N		-4,07234 N m
Restricción de pasador:8	1768,96 N	1767,92 N	86,8933 N m	0 N m
		-44,0709 N		86,8932 N m
		-41,8584 N		-0,101661 N m
Restricción de pasador:9	1759,48 N	1758,13 N	89,0058 N m	0 N m
		40,4049 N		88,9882 N m
		-55,8808 N		1,76979 N m
Restricción de pasador:10	1651,41 N	1642,57 N	63,1004 N m	0 N m
		111,867 N		62,9665 N m
		128,849 N		4,10905 N m
Restricción de pasador:11	664,615 N	556,543 N	16,4924 N m	0 N m
		315,989 N		11,8249 N m
		179,233 N		-11,4966 N m
Restricción de pasador:12	2025,76 N	2011,63 N	72,6927 N m	0,271253 N m
		225,474 N		-23,2365 N m
		-78,7785 N		-68,8783 N m
Restricción de pasador:13	1356,2 N	1355,81 N	46,8216 N m	-0,102232 N m
		-9,79776 N		-2,64579 N m
		30,6734 N		-46,7466 N m
Restricción de pasador:14	1394,4 N	1394,33 N	46,7343 N m	0 N m
		-13,462 N		-0,294549 N m
		-4,33414 N		-46,7334 N m
Restricción de pasador:15	1735,14 N	1727,84 N	58,5434 N m	-0,437761 N m
		93,906 N		8,43336 N m
		128,24 N		-57,9311 N m
Restricción de pasador:16	1573,7 N	1552,4 N	114,147 N m	0,880885 N m
		9,0642 N		-32,6343 N m
		-257,88 N		-109,379 N m
Restricción de pasador:17	1472,26 N	1413,47 N	57,5325 N m	0,107588 N m
		371,105 N		-57,5276 N m
		-178,758 N		-0,743787 N m
Restricción de pasador:18	1749,57 N	1737,6 N	87,5494 N m	0 N m
		183,465 N		-87,518 N m
		90,0102 N		2,34228 N m
Restricción de pasador:19	1755,95 N	1755,14 N	87,232 N m	0 N m
		-8,89047 N		-87,2319 N m
		52,4299 N		0,169209 N m
Restricción de pasador:20	1611,47 N	1600,53 N	64,179 N m	0 N m
		-10,7704 N		-64,1678 N m
		-187,155 N		-1,20166 N m

Figura 77. Reacciones generadas en las restricciones, Brida de acople. Fuente propia.

Dando como resultado un esfuerzo cortante máximo de 5,997 MPa y un factor de seguridad de 5,519.

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot (2026\ N)}{2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot (25{,}4\ mm)^2\right)} = 5{,}997\ MPa$$

$$F.S = \frac{33{,}10\ MPa}{5{,}997\ MPa} = 5{,}519$$

RESUMEN DE RESULTADOS					
PIEZA	MATERIAL	LIMITE DE FLUENCIA DEL MATERIAL [Mpa]	ESFUERZO MAXIMO [Mpa]	DEFORMACION [mm]	FACTOR DE SEGURIDAD
Obturador	Polipropileno reciclado	15,110	3,205	2,308	4,710
Marco - perfil lateral	Polipropileno reciclado	15,110	7,208	-	2,100
Marco - viga inferior	Polipropileno reciclado	15,110	5,723	-	2,640
Marco - viga superior	Polipropileno reciclado	15,110	7,491	-	2,202
Marco	Polipropileno reciclado	15,110	5,517	1,621	3,810
Sistema de izaje	Polipropileno reciclado	15,110	8,827	1,165	1,710
Vigas de soporte del volante	Polipropileno reciclado	15,110	6,200	0,274	2,440
Pernos de la viga de soporte del volante	UHMW	33,100	3,771	-	8,777
Ensamble de vigas al marco, con adhesivo	Loctite HY 4070	7,000	1,703	-	4,110
Ensamble de brida de acople al marco, con adhesivo	Loctite HY 4070	7,000	0,260	-	26,850
Brida de acople	UHMW	33,100	11,120	0,938	1,890
Pernos de la brida de acople	UHMW	33,100	5,997	-	5,519

Tabla 15. Resumen de resultados. Fuente propia.

10 COSTOS DE FABRICACIÓN Y MATERIALES

La tabla 16 muestra los costos de fabricación de la compuerta hidráulica de polipropileno reciclado con sus componentes. Se evidencia un gran valor económico debido a los precios de los moldes para poder inyectar la materia prima y materializar las partes.

CONCEPTO	MATERIAL	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Molde Obturador	AIS / SAE 1045	1 Und	$ 120.000.000	$ 120.000.000
Molde Refuerzos	AIS / SAE 1045	1 Und	$ 150.000.000	$ 150.000.000
Molde volante	AIS / SAE 1045	1 Und	$ 30.000.000	$ 30.000.000
Molde marco	AIS / SAE 1045	1 Und	$ 50.000.000	$ 50.000.000
Materia prima	Polipropileno Reciclado	500 kg	$ 8.948	$ 4.474.200
Vastago	Polipropileno Reciclado	2 Und	$ 2.864.330	$ 5.728.660
Cuñas	UHMW	4 Und	$ 123.490	$ 493.960
Montaje	-	1 Und	$ 11.900.000	$ 11.900.000
Transporte	-	1 Und	$ 2.900.000	$ 2.900.000
TOTAL COSTOS				$ 375.496.820

Tabla 16. Tabla de costos de fabricación y materiales. Fuente propia.

Esta tabla abarca los costos necesarios para poder fabricar, transportar e instalar la compuerta, no se tiene en cuenta precio de ingeniería debido al tipo de proyecto. (Ver anexo 3)

11 CONCLUSIONES

- Las normas encontradas, que dan pautas estrictas para diseñar las compuertas hidráulicas, se refieren en su mayoría a materiales metálicos. Por ende, solo se tuvieron en cuenta parámetros sencillos como el tamaño, tipo, ubicación, columna de agua y tipo de accionamiento. De igual manera, las normas proporcionan valores de referencia para validar la integridad de cada componente diseñado, como el factor de seguridad y los desplazamientos mínimos aceptados según las diferentes normas.

- Se cumplió con éxito el diseño completo de la compuerta hidráulica, siguiendo los parámetros establecidos para garantizar su funcionalidad y eficiencia. Además, se llevó a cabo el análisis y la validación estructural del diseño mediante el método de elementos finitos, asegurando la integridad y seguridad de cada componente. Este trabajo demuestra la viabilidad de utilizar materiales reciclados en aplicaciones mecánicas, destacando su aporte al diseño sostenible y a la reducción del impacto ambiental en la industria.

- Como resultado de la investigación, se identificó la posibilidad de estandarizar los perfiles de los componentes, como las vigas del marco, los

refuerzos y el obturador, lo que permitiría optimizar el diseño, reduciendo el peso, el material, el tamaño y los costos, sin comprometer su desempeño estructural.

- Se desarrolló la planimetría detallada de cada ensamble y de los componentes que conforman la compuerta hidráulica, con el propósito de proporcionar una referencia técnica. Sin embargo, las tolerancias geométricas y superficiales que se requieren para la fabricación no fueron consideradas.

- Se elaboró un manual técnico que establece las pautas necesarias para el montaje y la operación adecuada de la compuerta hidráulica fabricada en polipropileno reciclado. Este documento asegura un proceso de instalación correcto y proporciona recomendaciones clave para preservar la funcionalidad del equipo a lo largo del tiempo. Además, se detallan procedimientos de reemplazo de componentes sujetos al desgaste, garantizando así la durabilidad y el óptimo desempeño de la compuerta.

- Se generó una tabla de costos que proporciona una estimación detallada de los recursos mínimos necesarios para la adquisición de materiales, fabricación, ensamblaje y transporte de la compuerta hidráulica hasta el sitio

de funcionamiento. Dado que este estudio solo contempla una etapa conceptual básica, no se incluyeron los costos relacionados con actividades de ingeniería (investigación, análisis, diseño). Sin embargo, la información presentada en esta tabla sirve como una referencia inicial para orientar el proceso de implementación y evaluar la viabilidad económica del diseño.

12 REFERENCIAS

Como se genera la electricidad | Enel Colombia. (s. f.-b). https://www.enel.com.co/es/empresas/enel-generacion/como-se-genera-la-electricidad.html

Top 5: ¿Por qué hay que salvar el agua de Colombia? (s. f.). WWF. https://www.wwf.org.co/?262934/Top-5-Por-qu-hay-que-salvar-el-agua-de-Colombia

Energía renovable convencional y no convencional ¿Cuáles son las diferencias? | AES Colombia. (s. f.). AES Colombia.

Acolgen. (2024, 15 octubre). Acolgen - Asociación Colombiana. https://acolgen.org.co/

Gerardo. (s. f.). Inicio - fabricamos tus ideas. https://www.plasticosestructurales.com/web/

Green Plastic Colombia SAS. (2021, 16 diciembre). Green Plastic Colombia SAS. https://greenplastic.co/

Schmaußer, G. (2004). Rezension: Design of Hydraulic Gates. By P. C. F. Erbisti. Stahlbau, 73(8), 644-646. https://doi.org/10.1002/stab.200490162

Regaber, S.A. (2024, 19 junio). Sistemas de riego – Regaber. Regaber. https://regaber.com/

Antonio. (2019, 28 marzo). Hidroeléctricas en Colombia: entre el impacto ambiental y el desarrollo. Noticias Ambientales. https://es.mongabay.com/2018/06/hidroelectricas-colombia-hidroituango/

OpEPA. (2022, 13 octubre). Camino hacia carbono neutral - OPEPA.

Sanjuan, M. I. D. (2023, 18 mayo). ¿Cómo avanza Colombia en educación e implementación de medidas para el reciclaje? El Tiempo.

Suarez-Agudelo, B. (2019). Cierre de compuerta de aducción en condiciones de contingencia del proyecto hidroeléctrico Ituango. Disponible en: https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/4ed7d06d-2554-48ad-af22-172457435cb0/content.

Pulido-Prada, J y Silva-Vargas, C. (2017). Evaluación hidráulica del funcionamiento de las compuertas usadas en el Canal de Panamá para adaptarlas en el sistema fluvial del Canal del Dique. Disponible en: http://hdl.handle.net/10983/15492.

Vijay. P.V, Piyush R, Hota V.S, Richard G y Clarkson. J. (2016). Design and evaluation of an integrated FRP composite wicket gate. En Elseiver, Composite Structures, pp(145, 149–161). Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.093

Ruifeng. R, Hota V.S y Clarkson. J. (2019). Worldwide overview of composite applications for waterway infrastructure. Disponible en: https://par.nsf.gov/servlets/purl/10202419

Maderplast S.A. Estructuras plásticas (01 junio del 2023). Fabricación de compuertas inoxidables hidráulicas de grandes dimensiones - Atlántico Colombia [video].
YouTube: https://youtu.be/4XC2HsHdsCU?si=iJd4wMYCu9XExXl4

Director, M. L. E. R., & Vladimir, D. J. E. (2006, 5 enero). Diseño de una compuerta hidráulica tipo segmento para un nivel máximo de aguas arriba de 2m y un nivel máximo de aguas abajo 2,30m. http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4276

SOLUCIONES INTEGRALES DE INGENIERÍA. (s. f.). https://www.integral.com.co/

ANIPAC | Por una Industria más Sustentable y Circular. (s. f.). https://anipac.org.mx/

Subramanian, P. (2000). Plastics recycling and waste management in the US. Resources Conservation And Recycling, 28(3-4), 253-263. https://doi.org/10.1016/s0921-3449(99)00049-x

Al-Salem, S.M., Lettieri, P. and Baeyens, J. (2009) Recycling and Recovery Routes of Plastic Solid Waste (PSW) A Review. Waste Management, 29, 2625-2643. - References - Scientific Research Publishing. (s. f.). https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1954195

Inicio - Bienvenido al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -. (2024, 7 noviembre). https://www.minambiente.gov.co/

Asociación Brasileña de Normas Técnicas. (2008). NBR 8883: Tubos de polietileno de alta densidad (PEAD) para sistemas de distribuição de água a pressão. Recuperado de https://www.abnt.org.br/

ANAME, instrumentación científica de alta especializacion. https://www.aname.es/index.php/es/

Tivoly. (2021). Obtenido de http://www.perfor.hu/custom/perfor/image/data/pdf/menet-tr.pdf
Mot, R. L. (2006). Diseño de elementos de maquinas. Mexico : Pearson .
Lizeth Muñoz Jashimoto, E. d. (2009). FUERZA MÁXIMA DE AGARRE CON MANO DOMINANTE Y NO DOMINANTE . XV CONGRESO INTERNACIONAL DE ERGONOMÍA SEMAC. Nogales, Sonora .

Beltran, O. P. (2013). Guia para el analisis y solucion de problemas de ressitencia de materiales . Bogota : Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
Budynas, R. (2011). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.

Goodno, J. M. (2009). Mecanica de Materiales . Ciudad de Mexico : Cengage Learning.

ANEXOS

1. Planimetría detallada del ensamble y sus piezas.
2. Manual de montaje y operación.
3. Cotizaciones