



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGA DE UN AUTOCLAVE PARA INDUSTRIA AERONÁUTICA

Autor:

Álvarez Martín, Ignacio

Tutores:

San Juan Blanco, Manuel

Ingeniería de Procesos de Fabricación

Gutián Lledías, Jorge

Aciturri Aerostructures

Valladolid, Junio 2020

Agradecimientos

Este trabajo constituye el fin de cinco años de gran esfuerzo y superación personal. Estoy convencido de que no hubiera llegado hasta aquí de no haber sido por mi padre y mi madre, quienes me han apoyado en todo momento, especialmente en los más difíciles. Les debo todo. El orgullo del resto de mi familia y su calor me han dado también la fuerza necesaria para continuar.

A mis amigos, los de toda la vida y los que he ido conociendo durante esta etapa de mi vida. Por su ayuda en todos los niveles, por estar ahí siempre dispuestos a pasar un buen rato. Espero mantenerlos a mi lado toda la vida.

A Pat, por motivarme a mejorar como persona cada día, incluido en el ámbito académico, y por su comprensión y cariño.

A mis tutores en este TFG, Manuel por ayudarme a gestionar los aspectos académicos, y a Jorge por transmitirme sus conocimientos y su asistencia con aspectos técnicos.

Resumen

En el proceso de fabricación de piezas aeronáuticas de fibra de carbono es necesario realizar ciclos de curado en autoclave. El gran tamaño de dichas piezas normalmente complica su manipulación. Una factoría española desea solventar los problemas que tiene el sistema de carga que emplean actualmente, para lo que se redactó una especificación técnica.

Este trabajo de fin de grado surge como respuesta a dicha especificación, diseñando un nuevo proceso de carga y un nuevo mecanismo de elevación. Se dimensionan los distintos componentes de acuerdo con las necesidades especificadas, siguiendo la normativa vigente, y se realizan cálculos de resistencia para comprobar la viabilidad del diseño. Para ello se emplea el programa de elementos finitos Autodesk Inventor. También se eligen los distintos componentes comerciales que acompañan al mecanismo, como son cilindros hidráulicos, cadenas y pernos de anclaje.

Para concluir se evalúa el diseño creado y las posibles modificaciones o alternativas.

Palabras clave: sistema de carga, industria aeronáutica, elevador, diseño mecánico, autoclave.

Abstract

Aeronautic carbon fiber parts construction requires curing cycles in autoclaves. The size of such parts makes handling difficult. A Spanish factory wants to improve their current loading procedure, creating a technical specification.

This TFG is a response to said specification, designing a new loading procedure and a new elevation mechanism. All components are designed to comply with the specified necessities, following current regulations, while performing strength calculations to test the viability of the design. The program used for these calculations is Autodesk Inventor. The adjacent commercial components are also chosen, such as hydraulic cylinders, chains and anchor bolts.

To conclude the final design is evaluated, as well as possible modifications and alternatives.

Keywords: loading system, aeronautical industry, elevator, mechanical design, autoclave.

ÍNDICE

Documento 1: Memoria.....	13
1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 MOTIVACIÓN.....	13
1.2 ANTECEDENTES	14
1.3 OBJETIVO	19
1.4 ALCANCE.....	20
2 DISEÑO	21
2.1 CRITERIOS DE DISEÑO.....	21
2.1.1 Especificaciones	21
2.1.2 Seguridad.....	21
2.1.3 Reducción de costes.....	22
2.1.4 Sostenibilidad	23
2.1.5 Normativa de referencia	23
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN	24
2.2.1 Procedimiento.....	24
2.2.2 Sistema de elevación	31
2.2.3 Componentes:.....	36
2.2.4 Iteraciones previas	43
2.3 SISTEMA DE CONTROL:.....	46
2.4 SEGURIDADES:.....	46
2.5 SISTEMA HIDRÁULICO:	49
3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL	51
3.1 INTRODUCCIÓN.....	51
3.2 HIPÓTESIS	52
3.3 CÁLCULO DE FUERZAS	53
3.4 ANÁLISIS	56
3.4.1 Frame.....	56
3.4.2 Torres de elevación.....	60
3.4.3 Viga de carga	67
4 DIMENSIONADO DE COMPONENTES	71
4.1 CADENAS.....	71
4.2 CILINDROS HIDRÁULICOS	72

4.3	BASAS Y ANCLAJES A HORMIGÓN.....	76
5	CONCLUSIONES.....	83
6	BIBLIOGRAFÍA.....	85
6.1	Referencias.....	85
6.2	Normativa.....	86
	Documento 2: Presupuesto.....	87
1	Presupuesto parcial primero: Refuerzos frames.....	87
2	Presupuesto parcial segundo: Estructura torres de elevación.....	87
3	Presupuesto parcial tercero: Vigas de apoyo.....	88
4	Presupuesto parcial cuarto: Sistema hidráulico.....	88
5	Presupuesto parcial quinto: Seguridades.....	88
6	Presupuesto parcial sexto: Costes de diseño y fabricación.....	89
7	Presupuesto total.....	89
	Documento 3: Pliego de condiciones técnicas.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Frame superior.....	15
Ilustración 2. Frames apilados	15
Ilustración 3. AGV	15
Ilustración 4. División zonas de carga original.	16
Ilustración 5. 0 -Situación inicial, frames vacíos.	17
Ilustración 6. 1- Carga, a nivel de suelo, del frame inferior con útiles empleando el puente grúa.	17
Ilustración 7. 2-Apilado de frame intermedio vacío, usando el puente grúa, sobre el frame inferior.	17
Ilustración 8. 3-Carga del frame intermedio una vez apilado.....	18
Ilustración 9. 4-Carga, a nivel de suelo, del frame superior.....	18
Ilustración 10. 5-Apilado del frame superior cargado, sobre los otros dos frames.	18
Ilustración 11. Nueva disposición de zonas.....	25
Ilustración 12. Estado inicial	26
Ilustración 13. 1- Carga frame inferior e intermedio.....	26
Ilustración 14. 2- Elevación frame intermedio	27
Ilustración 15. 3- Apilado frames inferior e intermedio.....	27
Ilustración 16. 3- Liberación de la zona de elevación	28
Ilustración 17. 4- Posicionado de frame superior en zona de elevación mediante puente grúa	28
Ilustración 18. 4- Carga frame superior.....	29
Ilustración 19. 5- Elevación frame superior	29
Ilustración 20. 5- Apilado de frames y carga en autoclave	30
Ilustración 21. 6- Transporte mediante AGVs	30
Ilustración 22. 6- Introducción en autoclave con AGVs.....	31
Ilustración 23. Pórtico. [2].....	32
Ilustración 24. Husillo. [3].....	32
Ilustración 25. Movimiento del conjunto	33
Ilustración 26. Superficie de apoyo	34
Ilustración 27. Zonas de apoyo iniciales	34
Ilustración 28. Refuerzo de patas	35
Ilustración 29. Posición final elegida.	35
Ilustración 30. Posición en planta.....	35

Ilustración 31. Posición torres	36
Ilustración 32. Torre de elevación, vista frontal	37
Ilustración 33. Torre de elevación, vista posterior.	38
Ilustración 34. Viga de apoyo, vista frontal.....	39
Ilustración 35. Viga de apoyo, vista posterior.	39
Ilustración 36. Cáncamo y grillete. Representativos, no los empleados.[5].....	40
Ilustración 37. Conjunto de cilindro y detalle de pedestal.	41
Ilustración 38. Conjunto de frame y sistema de elevación.	42
Ilustración 39. Primera iteración de diseño	43
Ilustración 40. Segunda iteración de diseño.	44
Ilustración 41. Tercera iteración de diseño.....	44
Ilustración 42. Cuarta iteración de diseño.	45
Ilustración 43. Quinta iteración de diseño.	46
Ilustración 44. Barrera de seguridad. [7]	47
Ilustración 45. Estado inicial.	48
Ilustración 46. Frame en movimiento.....	48
Ilustración 47. Frame en posición correcta.....	49
Ilustración 48. Frame en posición incorrecta.	49
Ilustración 49. Esquema hidráulico.[8].....	50
Ilustración 50. Configuración de malla.	53
Ilustración 51. Configuración Inventor.	53
Ilustración 52. Momento frontal sobre viga horizontal.	54
Ilustración 53. Fuerzas sobre apoyos.....	55
Ilustración 54. Tensión de Von Mises para frame sin refuerzo.....	57
Ilustración 55. Desplazamiento para frame sin refuerzo	57
Ilustración 56. Coeficiente de seguridad para frame sin refuerzo	57
Ilustración 57. Refuerzo de frame.	58
Ilustración 58. Tensión de Von Mises para frame con refuerzo.....	59
Ilustración 59. Tensión de Von Mises para frame con refuerzo.....	59
Ilustración 60. Desplazamiento para frame con refuerzo	59
Ilustración 61. Coeficiente de seguridad para frame con refuerzo	60
Ilustración 62 Tensión de Von Mises altura máxima.	61
Ilustración 63 Desplazamiento altura máxima.	62
Ilustración 64. Coeficiente de seguridad altura máxima	62

Ilustración 65 Tensión de Von Mises altura media.	63
Ilustración 66 Desplazamiento altura media.	64
Ilustración 67 Factor seguridad altura media.	64
Ilustración 68 Tensión Von Mises altura inferior.....	65
Ilustración 69. Desplazamiento altura inferior.	66
Ilustración 70. Factor de seguridad altura inferior.	66
Ilustración 71. Escuadras de refuerzo en guías.....	67
Ilustración 72. Refuerzos viga de elevación.....	68
Ilustración 73. Platabanda viga elevación.	68
Ilustración 74. Tensiones de Von Mises viga de apoyo.	69
Ilustración 75. Desplazamiento viga de apoyo.....	69
Ilustración 76. Coeficiente de seguridad viga de apoyo.....	70
Ilustración 77. Esquema longitud cadena.	73
Ilustración 78. Esquema fuerzas pistón. [17]	75
Ilustración 79 Dimensiones pistón[17].....	75
Ilustración 80. Esquema basas[18]	77
Ilustración 81. Momento sobre base.....	78
Ilustración 82 Determinación fuerza pernos.[19].....	79
Ilustración 83. Perno FIX II. [19]	79
Ilustración 84. Dimensiones basas.	81
Ilustración 85. Masa estructura.....	81
Ilustración 86. Área basas cilindros.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones perfil CF. [4].....	37
Tabla 2. Dimensiones perfiles HEB.[4].....	40
Tabla 3. Características mecánicas mínimas de los aceros. [11].....	52
Tabla 4. Peso de carga.	54
Tabla 5. Momento frontal.....	54
Tabla 6. Fuerzas apoyos frontales.	55
Tabla 7. Momento lateral.....	55
Tabla 8. Furezas apoyos laterales.	56
Tabla 9. Dimensiones perfiles IPE. [4].....	58
Tabla 10. Fuerza sobre torres de elevación.	60
Tabla 11. Posición superior fuerzas torres de elevación.	61
Tabla 12. Posición intermedia fuerzas torres de elevación	63
Tabla 13. Posición intermedia fuerzas torres de elevación	65
Tabla 14. Tracción de cadenas.	69
Tabla 15. Carga por cadena.	71
Tabla 16. Dimensiones cadena. [15]	71
Tabla 17. Fuerza por cadena y cilindro.	72
Tabla 18. Carrera de pistón.....	74
Tabla 19. Datos de pistón elegido.[17].....	75
Tabla 20. Dimensiones pistón.	75
Tabla 21. Longitud pedestal.	76
Tabla 22. Valores para cálculo de c.....	77
Tabla 23. Fuerza sobre apoyos.	78
Tabla 24. Resistencia pernos.	80
Tabla 25. Datos pernos.[19]	80
Tabla 26. Resistencia hormigón bajo basas de torres.	82
Tabla 27. Resistencia hormigón bajo basas de cilindros.	82

Documento 1: Memoria

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Los últimos modelos de aviones comerciales incorporan cada vez más materiales compuestos o “composites” en su estructura debido a su ligereza y alta rigidez, lo cual los convierte en la elección idónea para reducir el consumo de combustible.

Se define composite como la asociación de un material reforzante y una matriz. En el caso de la industria aeronáutica, se emplean fibras de carbono unidireccionales pre impregnadas de resina epoxi.

El proceso de fabricación consiste en los siguientes pasos:

- 1- Encintado con fibra de carbono pre impregnada con epoxi, creando un estratificado de capas sobre una mesa plana.
- 2- Corte del material para la creación de kits con tolerancias de posicionamiento.
- 3- Colocación de los kits sobre moldes, previamente impregnados con líquido desmoldeante.
- 4- Polimerización o curado de las resinas mediante ciclos de calor, introduciendo los moldes encintados dentro de autoclaves.
- 5- Recanteado (mecanizado) de material sobrante para obtención de piezas con las dimensiones finales.
- 6- Procesos finales, en los que se incluyen montaje de varias piezas, lijado e imprimaciones.
- 7- Proceso de inspección y verificación.

Las piezas fabricadas pueden tener grandes dimensiones, y si bien las piezas en sí son muy ligeras con relación a su tamaño, los útiles sobre los que se encinta y que se introducen en

el autoclave tienen pesos de varias toneladas. Esto provoca que su manejo y manipulación sea complicado y peligroso, por lo que se requieren sistemas diseñados a medida para cada movimiento.

Este proyecto es respuesta a una especificación presentada por una factoría española, la cual desea mejorar el proceso de carga actual de un autoclave para reducir el número de ciclos y aumentar la seguridad de la operación. Se trata de una especificación real, por lo que ciertos datos han sido modificados o no se han incluido para no causar perjuicios de confidencialidad.

1.2 ANTECEDENTES

La especificación citada va a servir como punto de partida para el proceso de diseño. En ella se explica el proceso de carga existente en la fábrica, las instalaciones con las que se cuenta y los requisitos y limitaciones a respetar. Se definen primero algunos términos:

-Útil de curado: molde sobre el que se aplican las fibras de carbono para formar una pieza única y que es introducido en autoclave para el curado. Sus pesos y dimensiones varían según el tipo:

- Longitud: 7000mm – 12500mm

- Anchura: 1040mm – 2100mm

- Altura: 800mm – 1000mm

- Peso: 5000kg – 8000kg

-Frame: estructura de acero (perfiles IPE 240 acero S275) de grandes dimensiones y forma de mesa sobre la que se posicionan, mediante puente grúa o carretilla elevadora, los distintos útiles de curado para facilitar su movimiento y que pueden ser apilados para permitir un mayor aprovechamiento del espacio del autoclave. Hay dos tipos:

- Inferiores: son más bajos y siempre deben ser la base del apilamiento.
- Intermedio y superior: iguales físicamente entre ellos, son más altos y se pueden apilar encima de los inferiores o de ellos mismos.

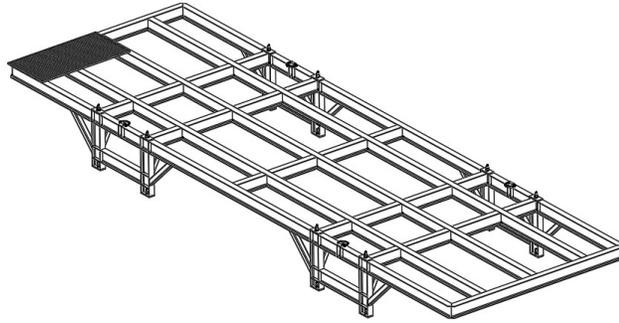


Ilustración 1. Frame superior.

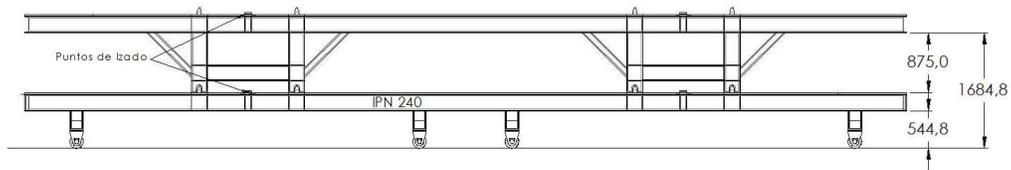


Ilustración 2. Frames apilados

-AGV: carro de transporte autopropulsado, consistente en cuatro grupos de ruedas guiadas sobre raíles y un chasis de altura regulable. Se deslizan debajo de los frames y una vez en posición se eleva el chasis de forma que este soporte todo el peso del frame y las patas de este queden separadas del suelo. Tienen un controlador que permite trabajar con varios a la vez en tándem.

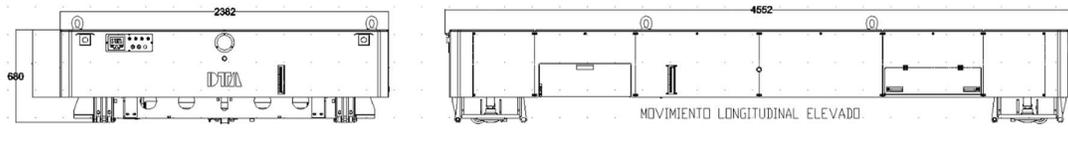


Ilustración 3. AGV

La nave de la fábrica donde se encuentra el autoclave está dividida en zonas donde se realizan distintas tareas. Estas son:

- Zona de carga.
- Zona de espera.
- Zona de frames vacías.

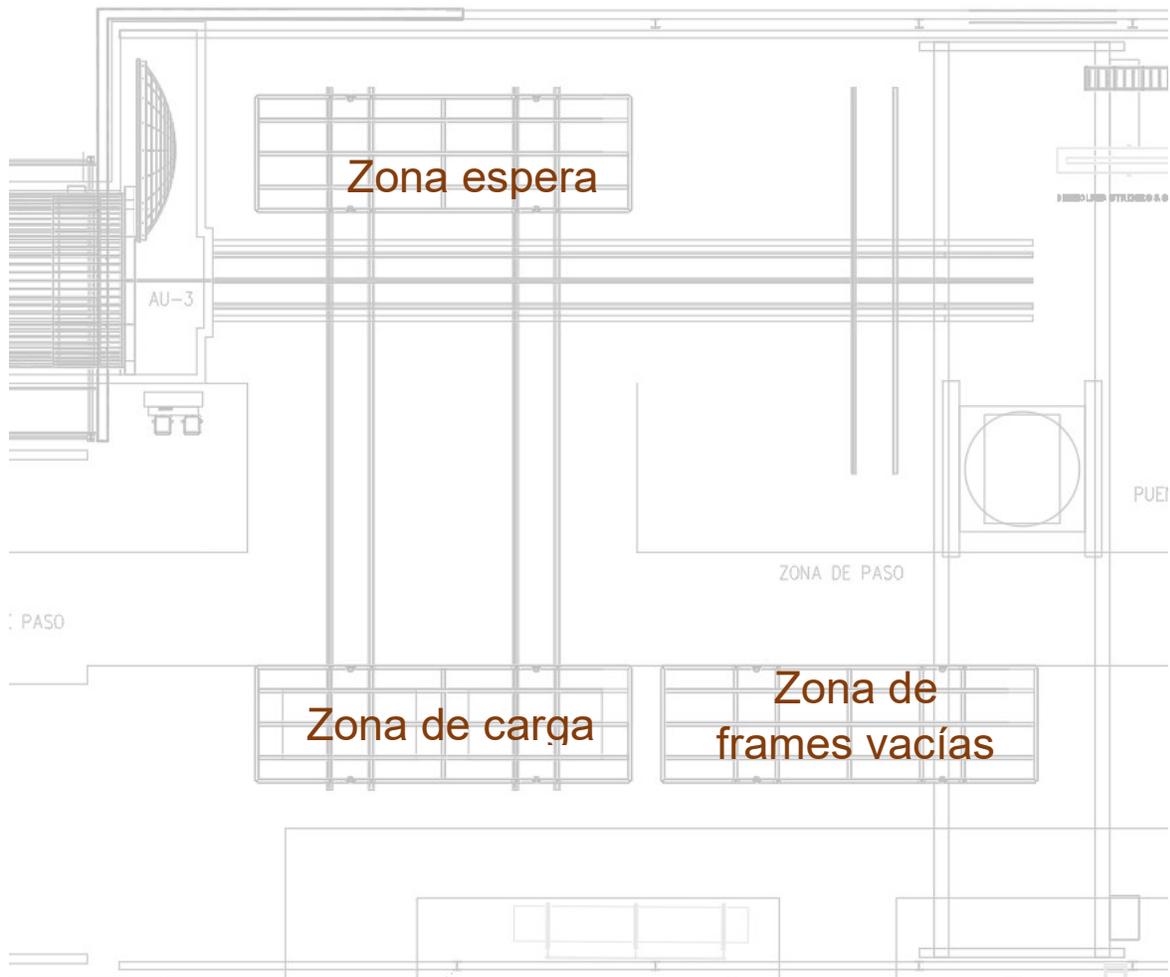


Ilustración 4. División zonas de carga original.

En esta nave se cuenta con puente grúa con capacidad para 18 toneladas y dos AGV de 30 toneladas de capacidad combinada. El primero se emplea para cargar los útiles sobre los frames y apilarlos, y los AGV desplazan el conjunto hasta el autoclave.

El proceso consiste en lo siguiente:

- 0- Situación inicial, frames vacíos.
- 1- Carga, a nivel de suelo, del frame inferior con útiles empleando el puente grúa.
- 2- Apilado de frame intermedio vacío, usando el puente grúa, sobre el frame inferior.

- 3- Carga del frame intermedio una vez apilado. Esta operación se lleva a cabo a 1.8m de altura.
- 4- Carga, a nivel de suelo, del frame superior.
- 5- Apilado del frame superior cargado, sobre los otros dos frames.
- 6- Transporte del conjunto hasta la puerta del autoclave e introducción en este empleando los AGV.

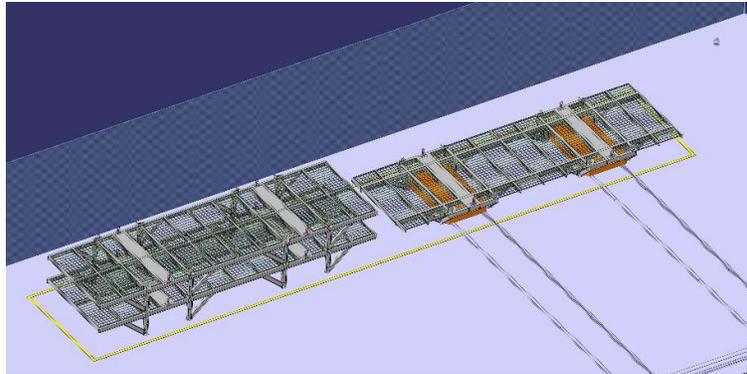


Ilustración 5. 0 -Situación inicial, frames vacíos.

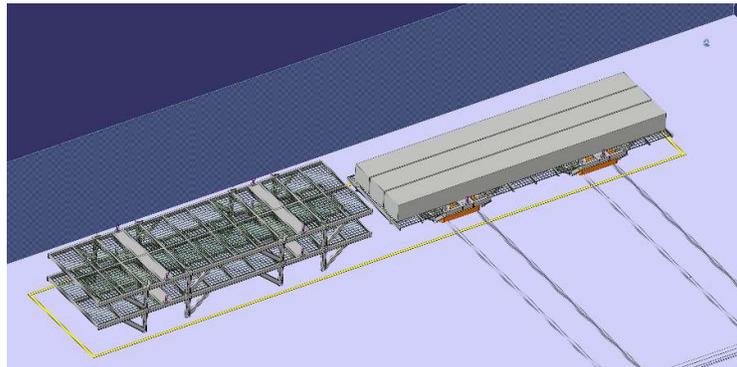


Ilustración 6. 1- Carga, a nivel de suelo, del frame inferior con útiles empleando el puente grúa.

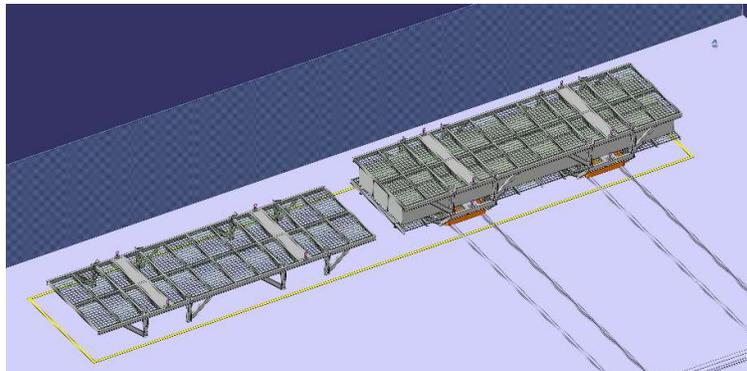


Ilustración 7. 2-Apilado de frame intermedio vacío, usando el puente grúa, sobre el frame inferior.

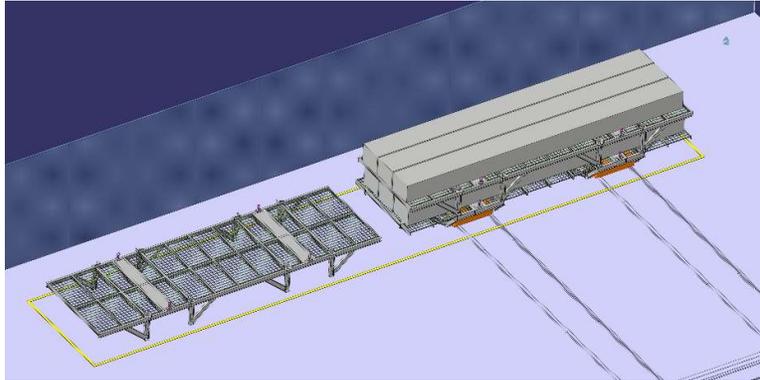


Ilustración 8. 3-Carga del frame intermedio una vez apilado..

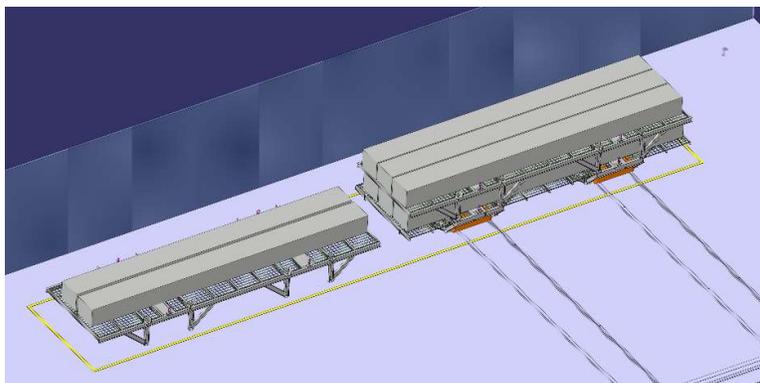


Ilustración 9. 4-Carga, a nivel de suelo, del frame superior..

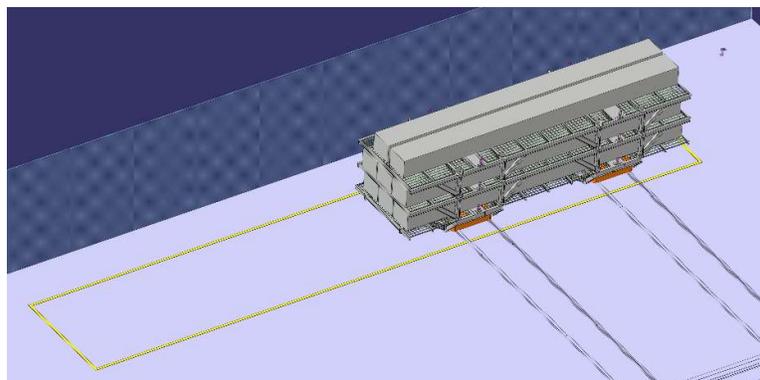


Ilustración 10. 5-Apilado del frame superior cargado, sobre los otros dos frames.

Este sistema tiene dos **problemas principales**, que impiden poder cargar todos los frames al máximo de su capacidad y por tanto provocan un uso ineficiente del espacio del autoclave:

- La carga de los útiles sobre los frames con puente grúa requiere que un operario esté encima del frame para el conexionado de tomas de vacío. Según el REAL DECRETO 2177/2004, de 12 de noviembre por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo, en materia de trabajos temporales en altura, en trabajos realizados a más de dos metros de altura las caídas suponen un riesgo para la salud de los operarios, por lo que se debe disponer de un sistema de protección. Como no se dispone de una estructura a la que anclarse y el último frame es apilado a más de dos metros, debe ser cargado a nivel de suelo. [1]
- El puente grúa no tiene la capacidad de elevar de forma estable y segura el frame superior cargado totalmente hasta su altura final. Por tanto, se apila solo parcialmente cargado.

1.3 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo, por tanto, es diseñar un nuevo proceso de carga que permita cargar todos los frames totalmente a nivel de suelo y usar así el máximo espacio disponible en el autoclave.

Con esto se pretende conseguir, por un lado, una mejora de la seguridad de los operarios evitando que tengan que subir a alturas peligrosas para la preparación de los frames. Esto es beneficioso tanto para los operarios, por razones obvias, como para la empresa, ya que al eliminar esa preocupación se pueden concentrar totalmente en realizar las tareas que tienen asignadas, siendo más efectivos y cometiendo menos errores. También se evitan lesiones y accidentes que puedan detener el proceso productivo y generar retrasos.

Por otro lado, se quiere reducir el gasto energético del autoclave. El autoclave consume grandes cantidades de electricidad para obtener las altas temperaturas y presiones necesarias, y nitrógeno para conseguir una atmósfera inerte. La optimización de su uso supondrá tanto un ahorro económico como una reducción del impacto ambiental del proceso productivo, ya que es uno de los puntos de mayor consumo de toda la fábrica.

La especificación de referencia no indica que se desee aumentar la producción, pero al aumentar la eficiencia de carga del autoclave se crea el potencial para poder fabricar más piezas realizando los mismos ciclos de curado, lo cual puede ser muy beneficioso en caso de aumentar las cadencias de producción en un futuro.

La mejora de la competitividad siempre es un objetivo en los proyectos industriales. Se busca mantener las instalaciones y procesos de fabricación actualizados, aumentando su eficiencia y eficacia de forma constante para que los resultados permitan a la empresa mantenerse a la vanguardia de la técnica en su campo.

1.4 ALCANCE

Este proyecto se limita al diseño del nuevo proceso de carga, así como el diseño y estudio estructural de un nuevo sistema de elevación y la justificación de los elementos elegidos para ser aportados por proveedores. No se realiza:

- Cálculo de resistencia de las uniones entre los elementos
- Cálculo de fatiga
- Diseño de sistemas de control
- Diseño de sistema hidráulico
- Análisis modal

2 DISEÑO

2.1 CRITERIOS DE DISEÑO

Para elegir la solución más apropiada se van a tener en cuenta los siguientes aspectos:

2.1.1 Especificaciones

Dentro de la especificación a la que se responde en este proyecto se incluyen una serie de necesidades, limitaciones y exigencias que limitan las posibilidades de diseño. Estas son:

- No se podrá modificar la solera de la nave (excepto en caso de canalizaciones para cableado), la cual está formada por hormigón HA-25.
- No se pueden modificar los apoyos de los frames al suelo, ya que están diseñados para repartir el peso en cuatro puntos específicos dentro del autoclave.
- La altura libre del puente grúa es de 6500mm.
- El recorrido de los AGV no puede ser modificado ni obstaculizado.
- Los AGV solo pueden acoplarse a los frame inferiores, por lo que no podrán mover los intermedios/superiores por separado, siempre deben estar apilados encima de uno de tipo inferior.
- La carga máxima de un frame supone la elevación de tres útiles de curado. Cada uno de ellos tiene un peso de 5 toneladas, y el peso del propio frame es de 3700kg. Por tanto, el nuevo sistema debe ser capaz de elevar 18,7 toneladas.
- Deformación máxima de 0,5% respecto al vano.

2.1.2 Seguridad

A la hora de diseñar la solución es primordial identificar los riesgos que pueden aparecer para las personas, ya sea durante el uso normal, el montaje o en las reparaciones.

El objetivo es eliminar o minimizar estos riesgos, y de no ser posible, tomar las medidas de protección necesarias. En este caso los peligros que afectan son los siguientes:

- Trabajo en altura
- Caída de cargas pesadas
- Elementos móviles
- Elevación de cargas pesadas

2.1.3 Reducción de costes

Uno de los objetivos que se pretende alcanzar con este proyecto es la disminución de gasto en electricidad e hidrógeno del autoclave, reduciendo el número de ciclos necesarios para satisfacer la producción. El coste total de la nueva instalación debe ser suficientemente bajo para que su amortización este en línea con la estrategia económica de la empresa. Esto se consigue principalmente de las siguientes formas:

- Estandarización:
A la hora de diseñar la solución se emplearán siempre que sea posible materiales de dimensiones y características estandarizadas, ya que el coste de estos es menor que materiales a medida, y su disponibilidad es mayor. Esto supone una ventaja tanto a nivel de construcción como de mantenimiento y reparación, ahorrándose tiempo y dinero.
- Aprovechamiento de recursos:
El nuevo método de carga debe maximizar el uso de medios de los que se dispone actualmente, principalmente los dispositivos empleados durante el proceso de carga como son el puente grúa y los AGV, además del espacio ocupado en la nave.
- Simplificación:
La solución buscada debe ser lo más sencilla posible, siempre cumpliendo con las especificaciones. Si durante el proceso de diseño aparecen factores que compliquen el proceso o los mecanismos necesarios, se buscará la forma de simplificarlos manteniendo las capacidades que sean necesarias. Cuanto menor sea el número de movimientos, las cargas y los riesgos, se reducirá la cantidad de motores, piezas de desgaste, gasto eléctrico, capacidad estructural y seguridades necesarias.

- Facilidad de construcción:

En el diseño se tendrá en cuenta el montaje del sistema para que sea lo más sencillo posible, evitándose piezas de grandes dimensiones difíciles de manipular, zonas de acceso impedido o limitado por piezas... Con esto se consigue que el coste de fabricación sea menor, gracias a reducir tiempos y eliminar la necesidad de trabajos especiales, y que el mantenimiento o reparación sea más sencillo.

2.1.4 Sostenibilidad

El impacto ambiental del nuevo sistema debe ser lo menos perjudicial posible, al mismo tiempo que se fomente en la medida de lo posible la industrial local. Algunas medidas son:

- Uso de materiales reciclados.
- Reutilización de los recursos ya existentes en fábrica.
- Elección de materiales y proveedores cercanos a la fábrica, para disminuir los desplazamientos y favorecer la economía de la zona.

2.1.5 Normativa de referencia

- REAL DECRETO 2177/2004, de 12 de noviembre, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo, en materia de trabajos temporales en altura.
- Siguiendo la Directiva 2006/42/CE relativa a las máquinas y por la que se modifica la Directiva 95/16/CE, el frame debe presentar **un coeficiente de seguridad de tensión de 1,5**, dado que se trata de un “accesorio de elevación”.
- DB SE-A: Seguridad estructural del acero.
- Real Decreto 1829/1995, de 10 de noviembre, por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE EA-95 «Estructuras de acero en edificación». Del anejo 2 de esta norma se toman las medidas de perfiles normalizados.
- UNE 58132-2:2005. Aparatos de elevación. Reglas de cálculo. Parte 2: Solicitaciones y casos de solicitaciones que deben intervenir en el cálculo de las estructuras y de los mecanismos.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

Se ha ideado un nuevo método de carga para abordar los problemas del procedimiento actual, teniendo en cuenta los criterios de diseño anteriormente expuestos.

Este nuevo método se basa principalmente en elevar y apilar los frames ya cargados a nivel de suelo, de forma que los operarios no tengan que trabajar en altura. Esto no es posible con el procedimiento y equipo empleados actualmente, por lo que se rediseñan ambos.

2.2.1 Procedimiento

Se redefine el espacio de trabajo en tres nuevas zonas de carga y una de espera, de forma que cada frame pueda ser cargado de forma independiente a nivel de suelo:

-Zona de carga A

-Zona de carga B

-Zona de carga C

-Zona de espera

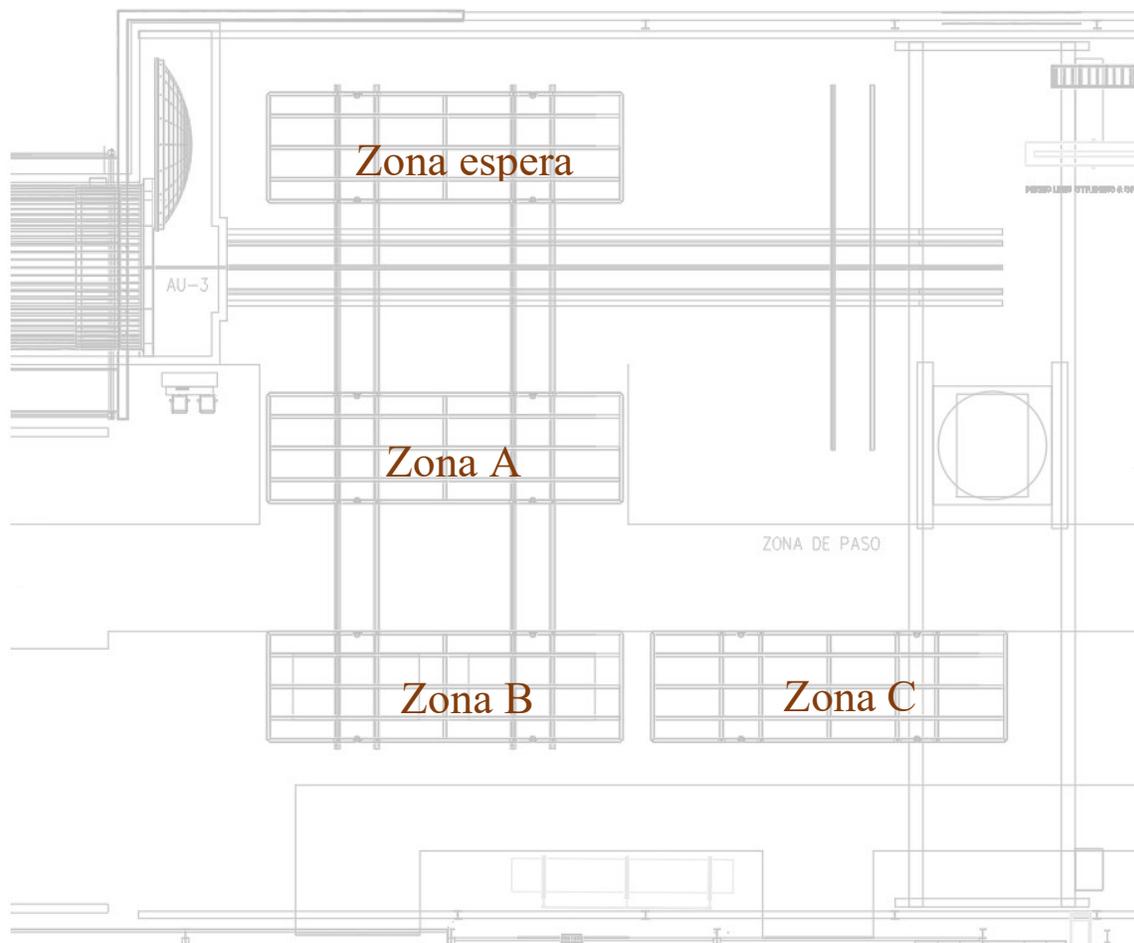


Ilustración 11. Nueva disposición de zonas.

El nuevo proceso es el siguiente:

1. Carga del frame inferior en la zona A, carga del frame intermedio en la zona B.
2. Elevación del frame intermedio cargado y posicionamiento del frame inferior debajo empleando los AGV.
3. Se deposita el frame intermedio sobre el inferior, y se trasladan ambos hasta la zona A con la ayuda de los AGV.
4. Traslado del frame superior vacío desde la zona C hasta la B mediante el puente grúa, y carga a nivel de suelo.

5. Elevación hasta el último nivel, posicionamiento del conjunto inferior-intermedio debajo con AGV y apilado del último frame.
6. Transporte de todos los frames cargados y apilados, mediante AGV, hasta el autoclave.

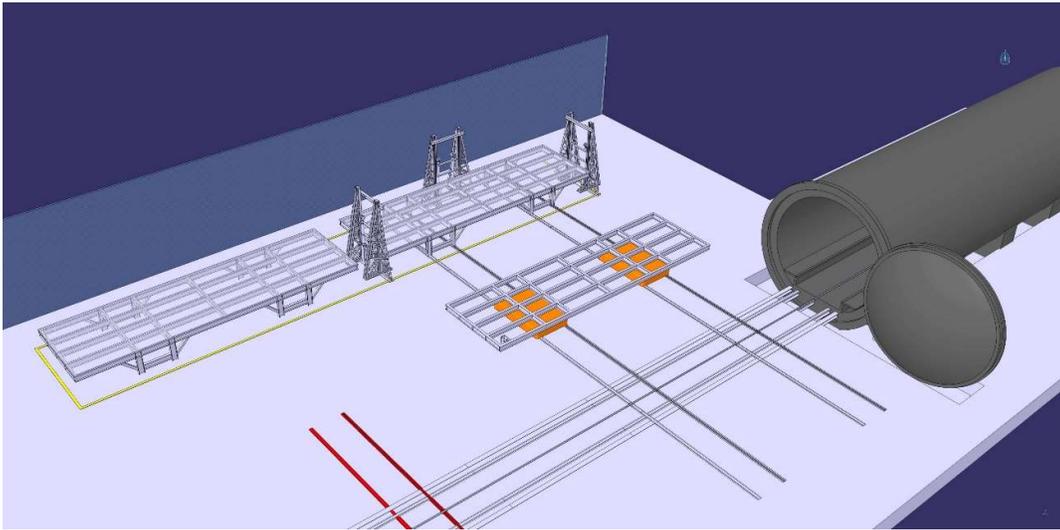


Ilustración 12. Estado inicial

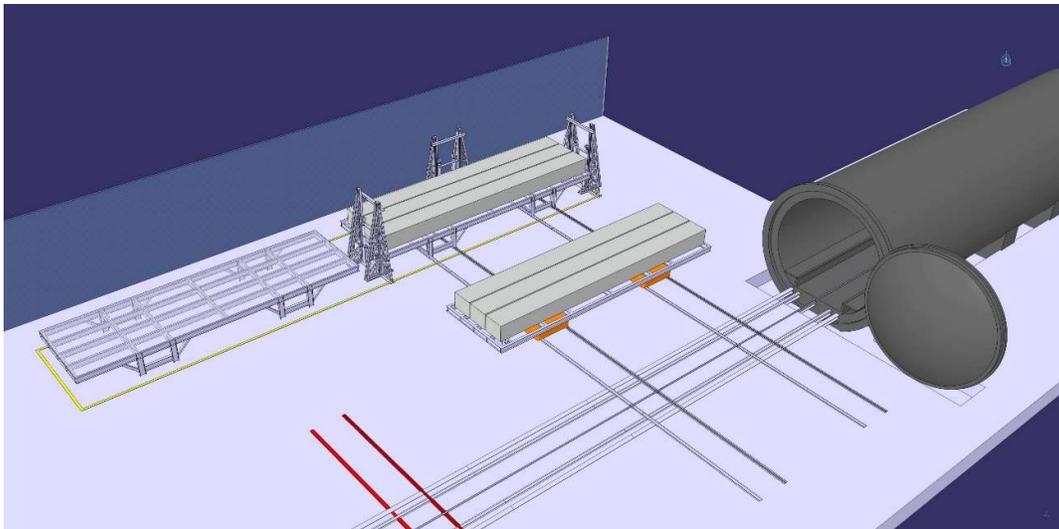


Ilustración 13. 1- Carga frame inferior e intermedio

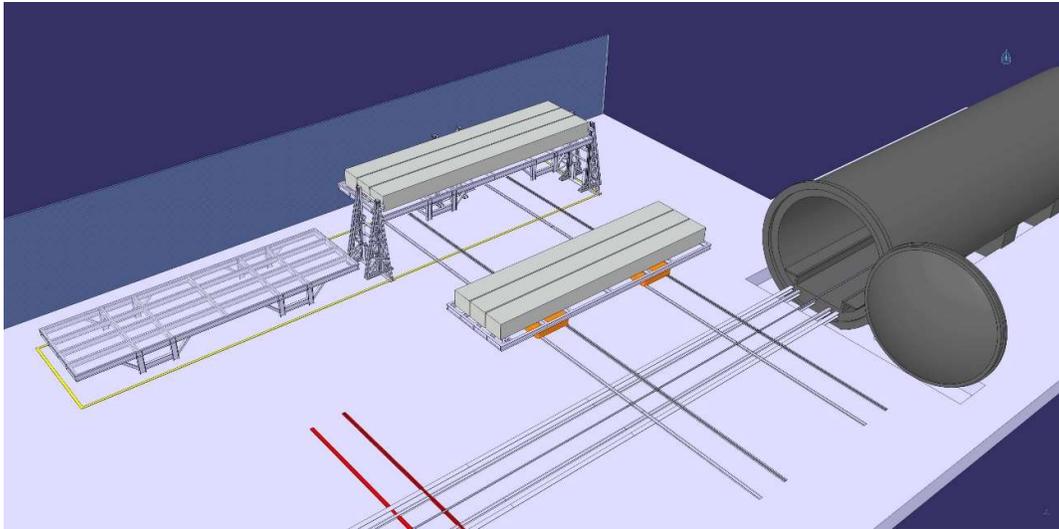


Ilustración 14. 2- Elevación frame intermedio

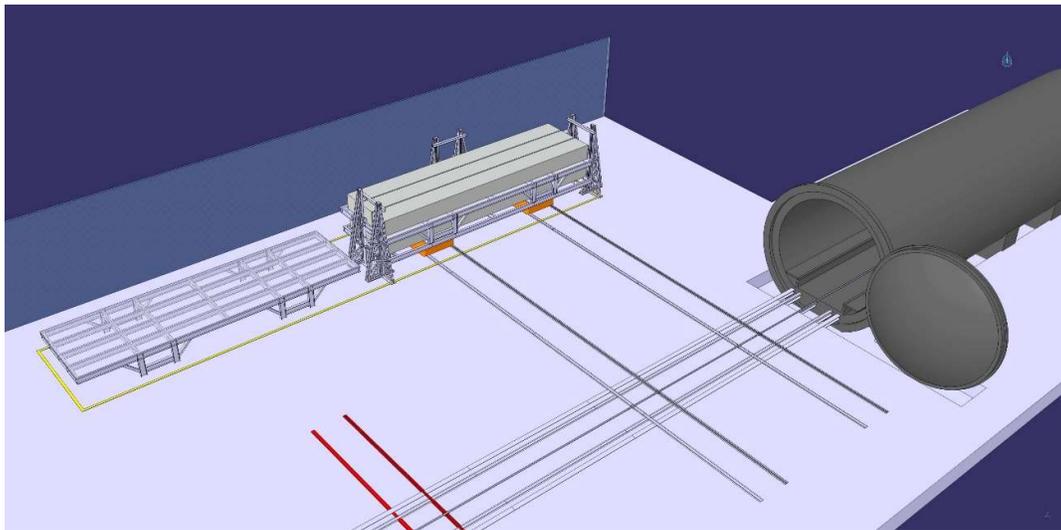


Ilustración 15. 3- Apilado frames inferior e intermedio

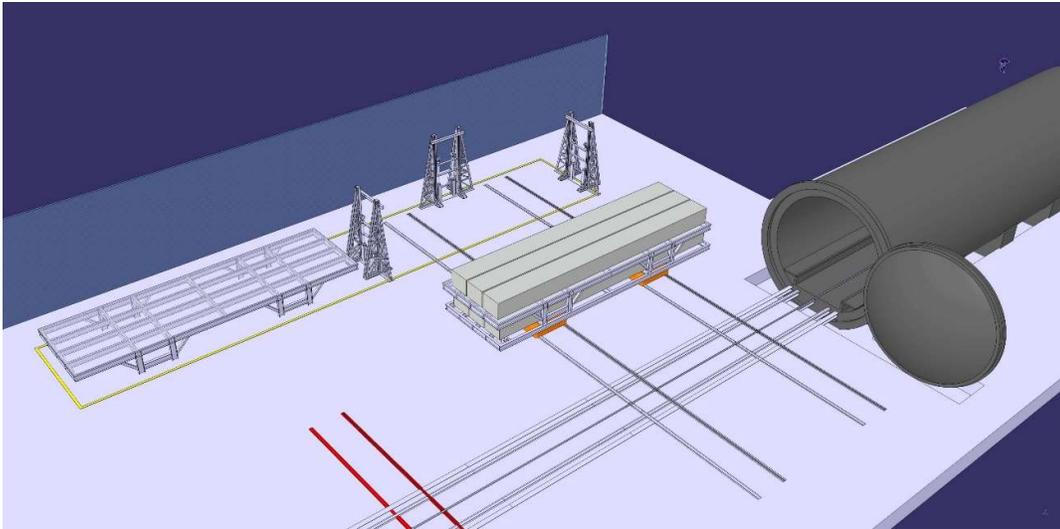


Ilustración 16. 3- Liberación de la zona de elevación

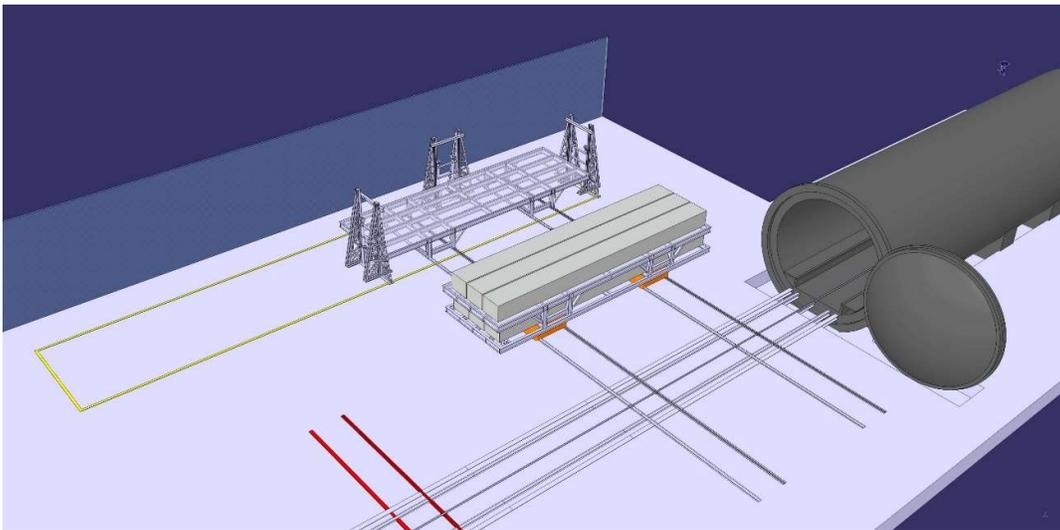


Ilustración 17. 4- Posicionado de frame superior en zona de elevación mediante puente grúa

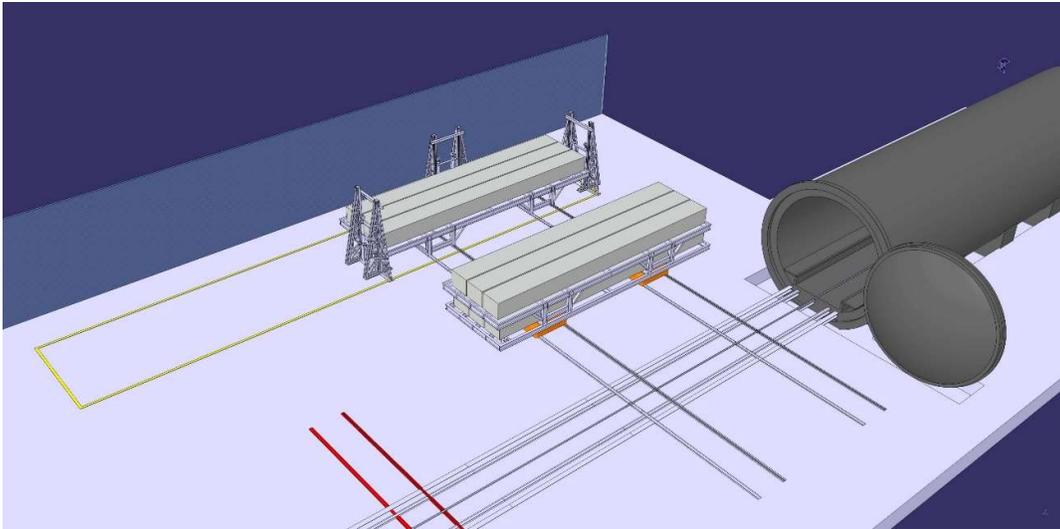


Ilustración 18. 4- Carga frame superior

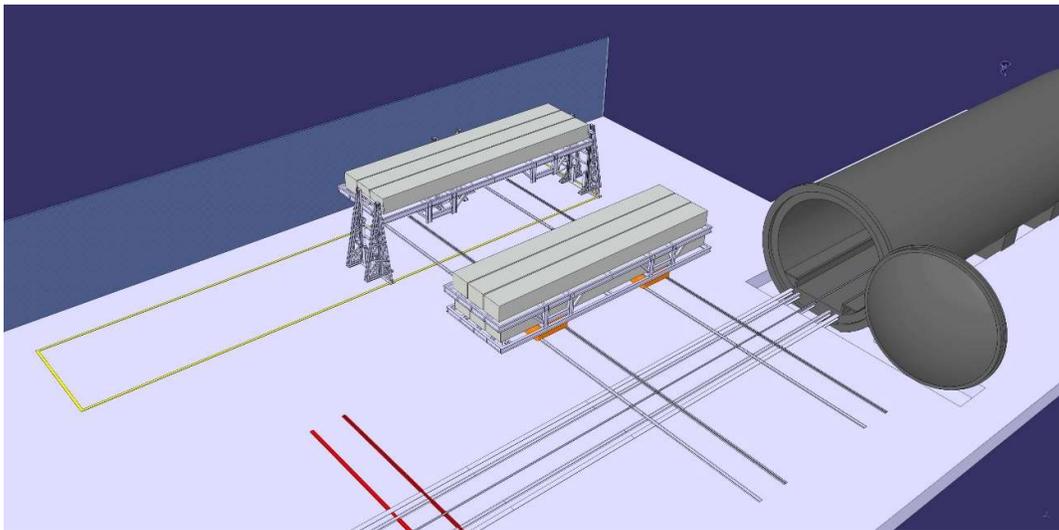


Ilustración 19. 5- Elevación frame superior

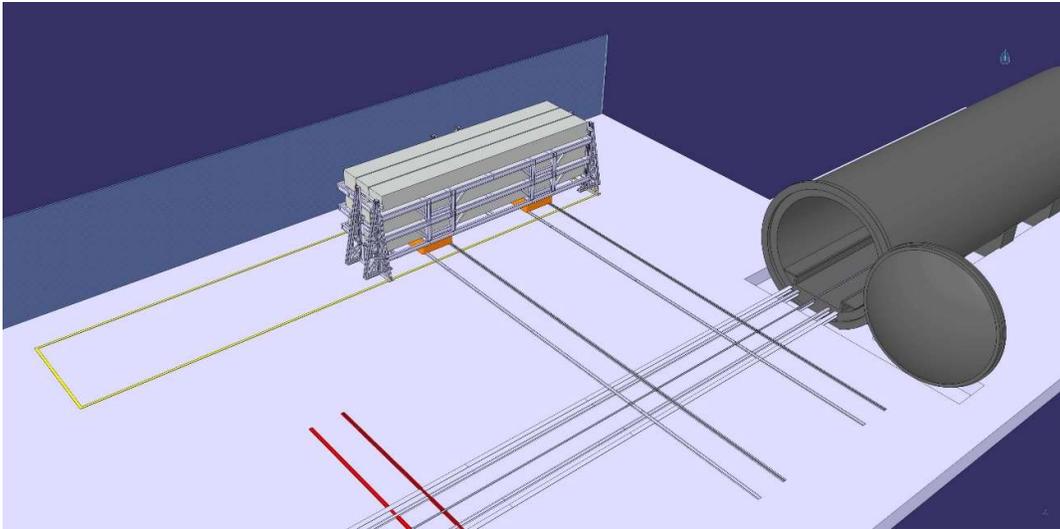


Ilustración 20. 5- Apilado de frames y carga en autoclave

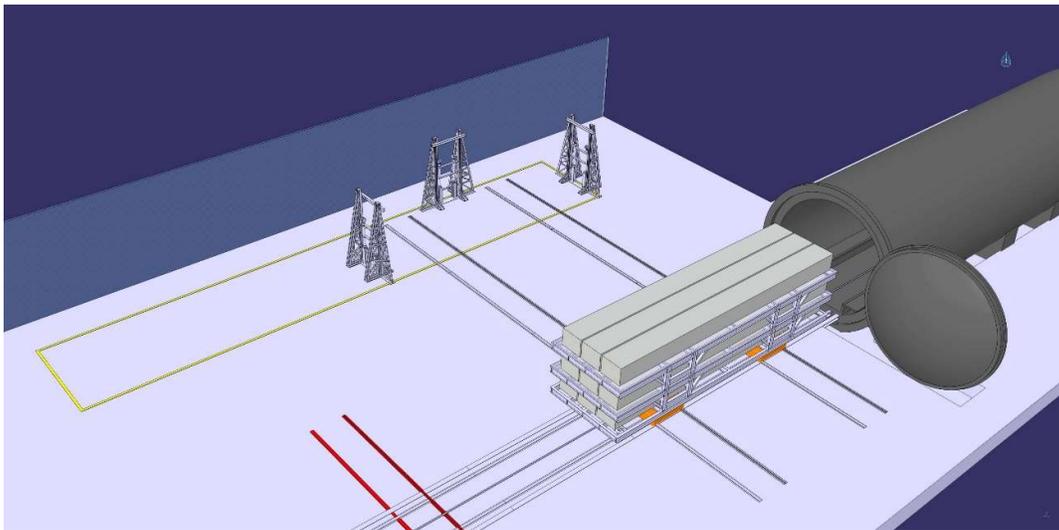


Ilustración 21. 6- Transporte mediante AGVs

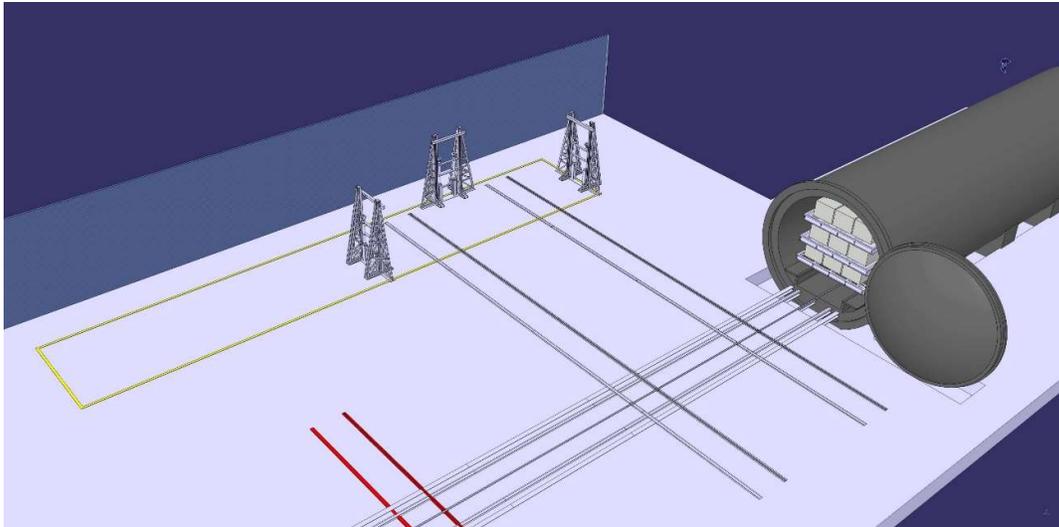


Ilustración 22. 6- Introducción en autoclave con AGVs.

2.2.2 Sistema de elevación

El nuevo proceso de carga requiere la elevación de un frame cargado hasta la última altura. Se diseña un nuevo equipo con esa capacidad, que será usado junto al puente grúa y los AGV existentes.

Existen dos tipos de sistemas empleados normalmente con este fin. Por un lado están los pórticos de elevación, que básicamente son puentes grúa apoyados sobre el suelo en vez de la estructura de la nave. Su principal ventaja es la movilidad, otorgándoles gran polivalencia. Para ello utilizan railes en la solera de la nave, cuya instalación no cumpliría las exigencias de la especificación, por lo que este tipo de sistemas se estiman no aptos. Además, al existir ya railes del sistema de AGVs resolver las intersecciones añadiría un alto grado de complejidad.



Ilustración 23. Pórtico. [2]

El otro tipo de mecanismos más usados para estas tareas son las torres de elevación, las cuales se diferencian dependiendo de la forma en la que generan y transmiten la fuerza. Es habitual el uso de husillos de grandes dimensiones con motorreductores eléctricos, que son de gran precisión y seguridad, pero tienen un mantenimiento complejo. La alternativa son los pistones hidráulicos, los cuales tienen un mantenimiento sencillo, son más baratos y de gran fiabilidad, aunque son más sucios.



Ilustración 24. Husillo. [3]

Se opta por tanto por un sistema de torres de elevación con pistones hidráulicos. Este irá anclado al suelo y no será móvil, por lo que es importante elegir correctamente el número

y posición de las torres. Los factores que se tienen en cuenta para decidirlo son consecuencia del nuevo proceso de carga y la resistencia de los frames:

- Ninguno de los movimientos en la carga de los frames debe quedar obstaculizado o impedido por las torres.
- Los frames están diseñados para ser elevados por unas orejetas colocadas en las patas. De no ser usados se debe comprobar que el frame es capaz de soportar la carga durante la elevación.
- Al apilar un frame sobre otro cargado, el espacio que queda entre la parte superior de los útiles y la parte inferior de la estructura del frame apilado es de apenas 5cm.

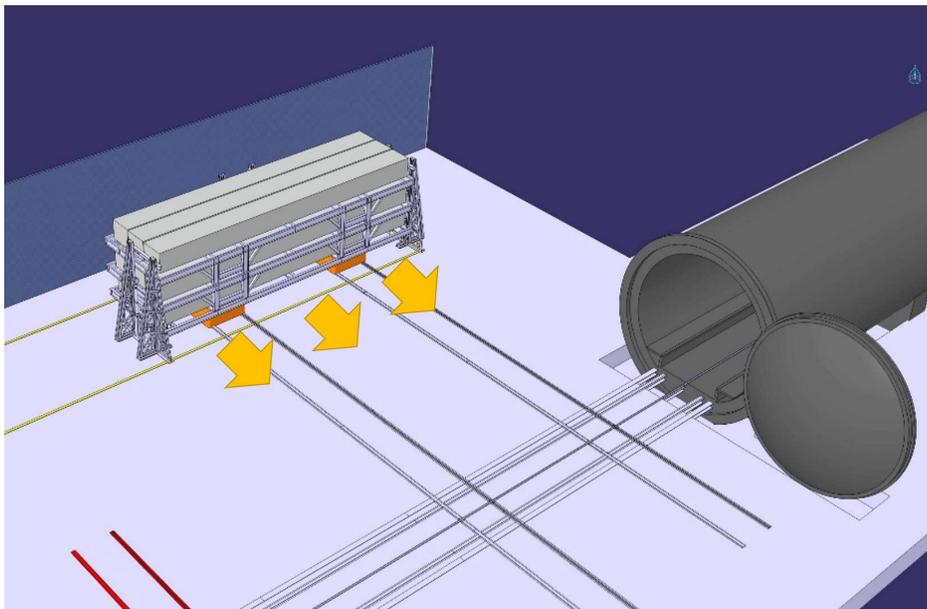


Ilustración 25. Movimiento del conjunto

El primer factor complica mucho el uso de las orejetas del frame originales, ya que el movimiento de los frames obliga a que su lateral más próximo al autlcave quede libre de obstáculos. Por tanto, se transmitirá la fuerza de elevación desde la parte inferior de los frames mediante vigas horizontales.

Como consecuencia del tercer factor no se puede introducir una estructura de lado a lado del frame o que profundicen por debajo de esta, sino que solo se pueden emplear vigas que apoyen en la estructura perimetral del frame, donde la carga no interfiere.

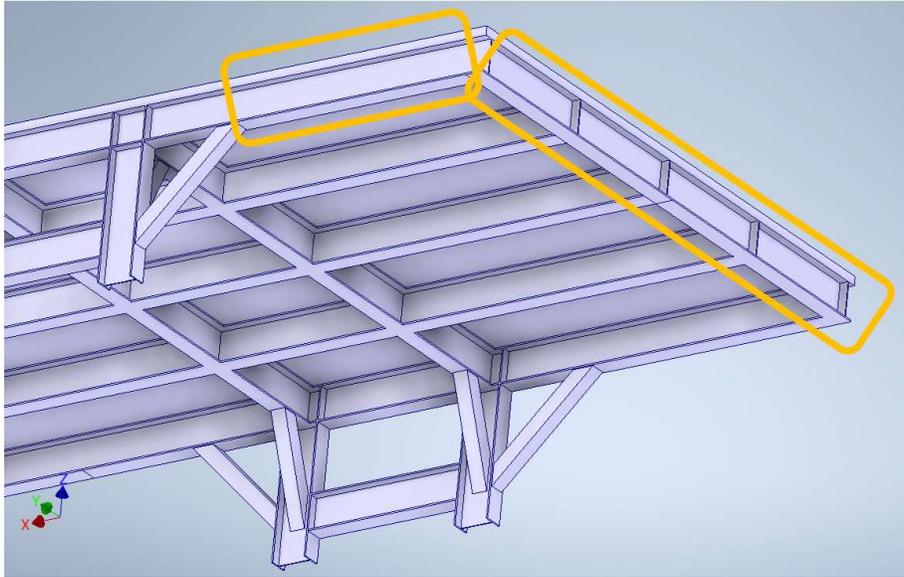


Ilustración 26. Superficie de apoyo.

Dado que uno de los laterales de mayor longitud no está disponible, se colocan torres de elevación en el otro lateral libre y en las esquinas de los lados cortos, de forma que la fuerza de empuje quede lo más distribuida posible.

En un primer momento se pretendía emplear cuatro torres, dos en las esquinas y otras dos entre las patas del frame. Sin embargo, esta idea se abandona ya que existe un refuerzo horizontal en las patas que haría necesario que las vigas de carga fueran retractiles, complicando mucho el mecanismo.

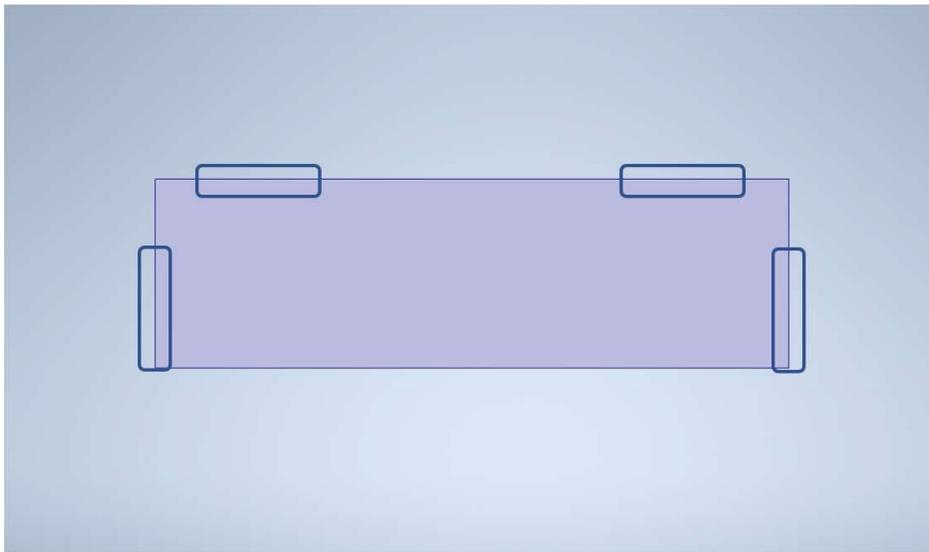


Ilustración 27. Zonas de apoyo iniciales

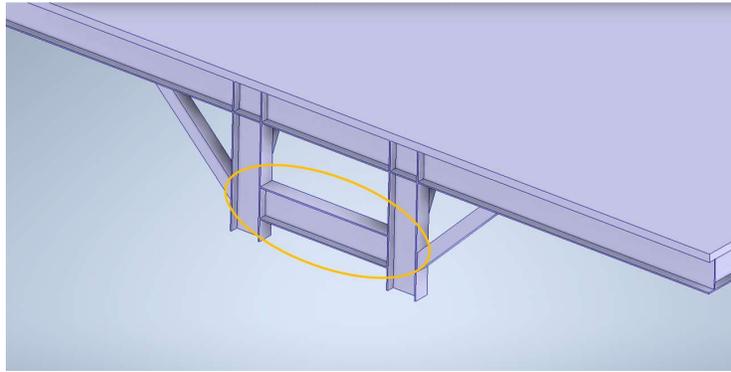


Ilustración 28. Refuerzo de patas

Se emplean por fin tres torres, dos en las esquinas y una en el centro del lateral largo. En el capítulo siguiente se demuestra que el frame es capaz de soportar la carga con esta configuración tras añadir un refuerzo.

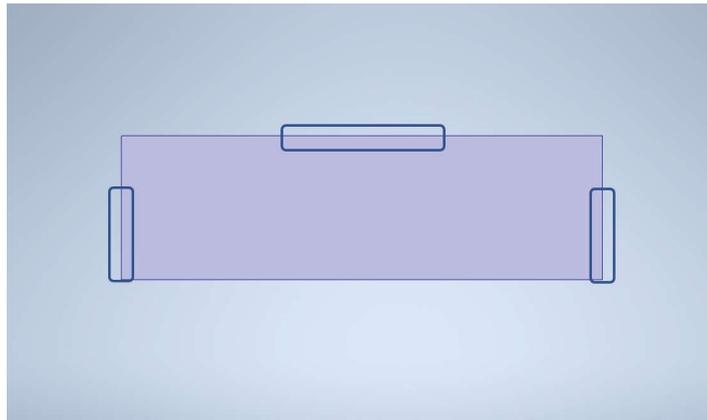


Ilustración 29. Posición final elegida.

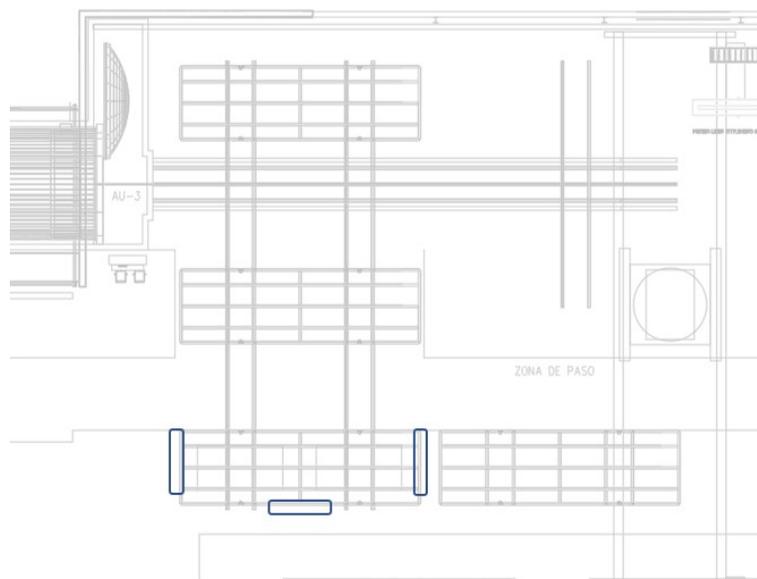


Ilustración 30. Posición en planta.

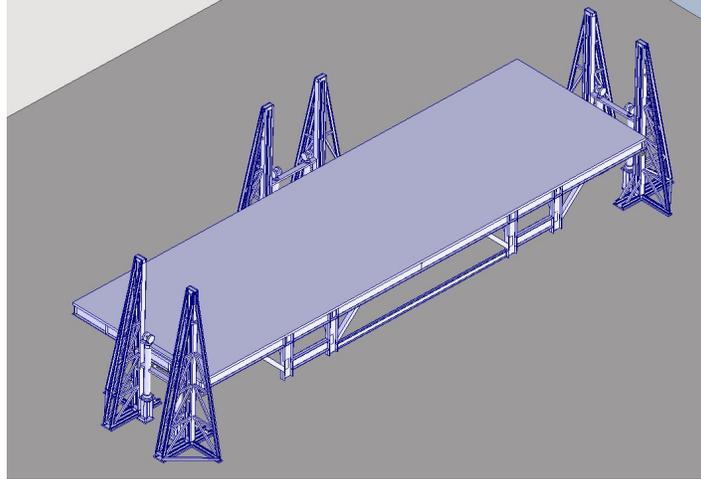


Ilustración 31. Posición torres

2.2.3 Componentes:

Las tres torres de elevación son idénticas. Cada una cuenta con dos guías verticales, una viga de apoyo, dos cilindros hidráulicos y cuatro cadenas.

- Guías verticales: formadas por dos perfiles conformados CF 120 x 3.0. Soportan dos esfuerzos, un momento frontal debido a la posición de la carga respecto al eje central de las guías, y uno lateral debido a la flexión de la viga horizontal de carga.

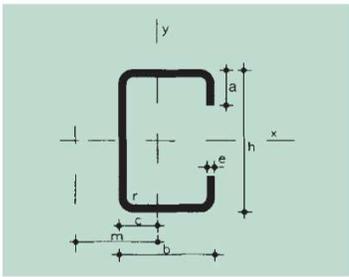
Para ayudar con el primer esfuerzo se emplea una celosía tirante a lo largo de toda la parte trasera, y un apoyo en la parte delantera trabajando a compresión, pero solo en la parte inferior para no interferir con los frames.

Para controlar el momento lateral se emplean tirantes horizontales que unen ambas guías, y una celosía trabajando a compresión.

Las guías son simétricas, siendo las celosías, refuerzos y perfiles idénticos. Esto ayuda con la estandarización tanto de partes que las componen como de construcción.

Las celosías están construidas con tubo estructural 45x45x6 y tubo estructural 40x40x6, no normalizados pero de uso común y fácil obtención.

Tabla 2.A3.4. Perfiles conformados C



u = Perímetro	W_x = Módulo resistente, respecto a x
c = Posición del eje Y	W_y = Módulo resistente, respecto a y
m = Distancia al centro de esfuerzos cortantes	i_x = Radio de giro, respecto a x
A = Área de la sección	i_y = Radio de giro, respecto a y
I_x = Momento de inercia de la sección, respecto a x	
I_y = Momento de inercia de la sección, respecto a y	
I_t = Momento de torsión de la sección	
I_a = Módulo de alabeo de la sección	

Perfil	Dimensiones						Términos de sección										Peso		
	h mm	b mm	a mm	e mm	r mm	u mm	c cm	m cm	A cm ²	I_x cm ⁴	I_y cm ⁴	I_t cm ⁴	I_a cm ³	W_x cm ³	W_y cm ³	i_x cm	i_y cm	p kp/m	
CF 120,3,0	120	50	20	3,0	3,0	487	1,72	4,02	7,20	156,0	25,00	0,2160	808,0	25,90	7,61	4,65	1,86	5,65	C

Tabla 1. Dimensiones perfil CF. [4]

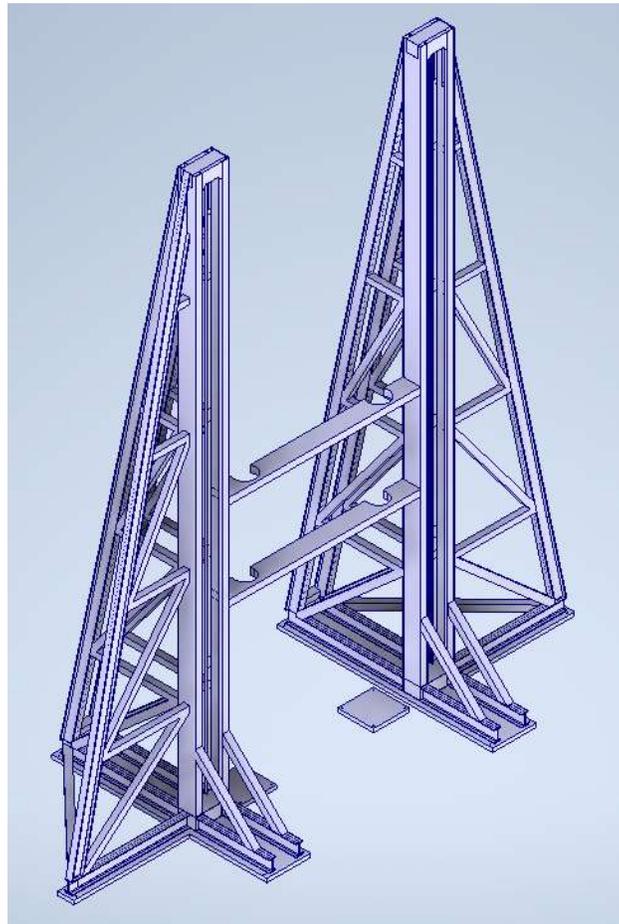


Ilustración 32. Torre de elevación, vista frontal.



Ilustración 33. Torre de elevación, vista posterior.

Las dimensiones básicas son:

- Altura: 3665mm
 - Distancia entre guías: 1298mm
 - Distancia entre perfiles CF: 130mm
 - Longitud total: 3488mm
 - Ancho total: 1550mm
- Viga de apoyo: esta pieza transmite la fuerza de los pistones al frame por medio de una viga horizontal HEB 120. El punto de aplicación de esa fuerza de elevación no corresponde con el del peso de la carga, generándose un momento que es transmitido a las guías verticales por medio de unas subestructuras metálicas, denominadas palancas.
- Hay dos palancas por viga, cada una de ellas con dos juegos de rodamientos de cilindros, típicamente usados en carretillas elevadoras, para transmitir el momento frontal, y un rodamiento en la parte superior y otro en la inferior para contrarrestar el momento lateral. La distancia entre los rodamientos de apoyo en dirección vertical

es grande para que la fuerza necesaria se minimice, ya que el momento es producto de fuerza por distancia.

Las palancas no se encuentran en los extremos, sino más centradas, para reducir el espacio ocupado por todo el conjunto de las torres.

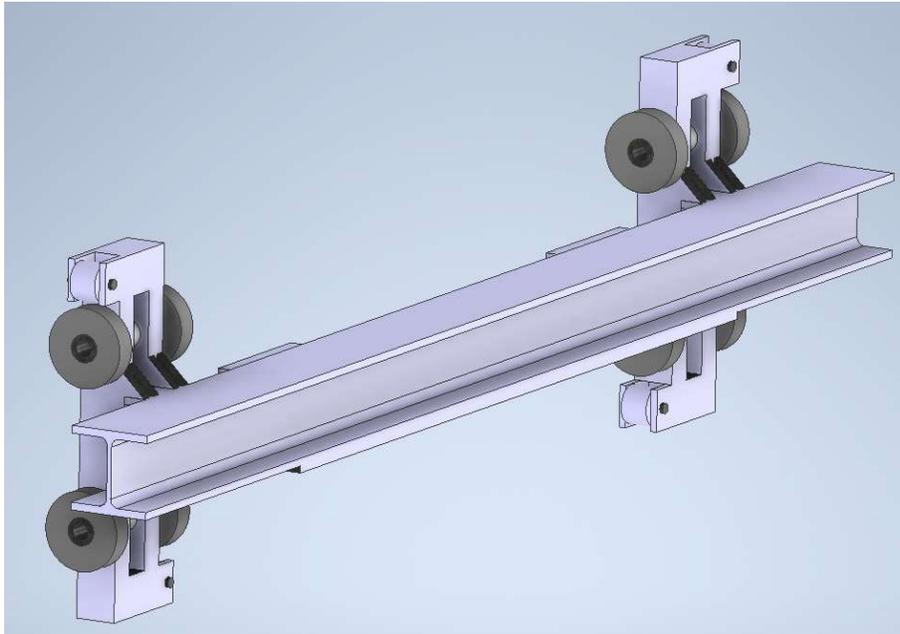


Ilustración 34. Viga de apoyo, vista frontal.

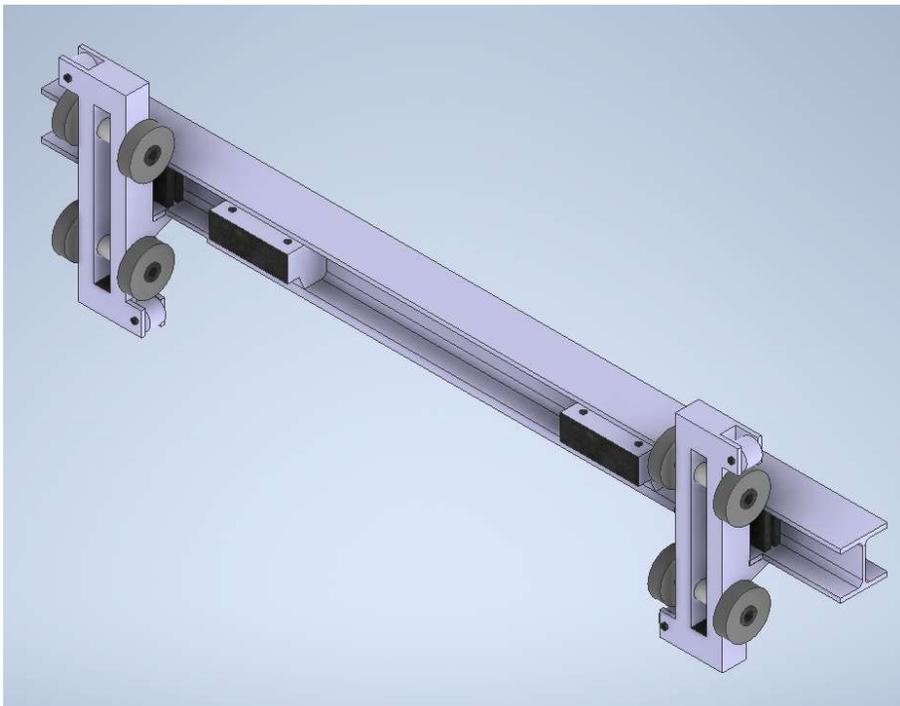
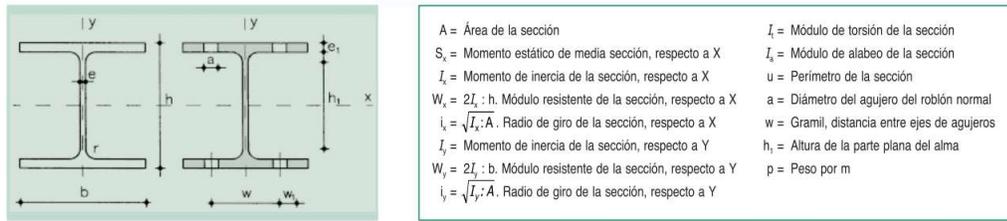


Ilustración 35. Viga de apoyo, vista posterior.

Tabla 2.A1.3. Perfiles HEB, HEA y HEM



A = Área de la sección
 S_x = Momento estático de media sección, respecto a X
 I_x = Momento de inercia de la sección, respecto a X
 $W_x = 2I_x : h$: Módulo resistente de la sección, respecto a X
 $i_x = \sqrt{I_x : A}$: Radio de giro de la sección, respecto a X
 I_y = Momento de inercia de la sección, respecto a Y
 $W_y = 2I_y : b$: Módulo resistente de la sección, respecto a Y
 $i_y = \sqrt{I_y : A}$: Radio de giro de la sección, respecto a Y
 I_t = Módulo de torsión de la sección
 I_a = Módulo de alabeo de la sección
 u = Perímetro de la sección
 a = Diámetro del agujero del roblón normal
 w = Gramil, distancia entre ejes de agujeros
 h_1 = Altura de la parte plana del alma
 p = Peso por m

Perfil	Dimensiones							Términos de sección										Agujeros			Peso	
	h mm	b mm	e mm	e ₁ mm	r ₁ mm	h ₁ mm	u mm	A cm ²	S _x cm ³	I _x cm ⁴	W _x cm ³	i _x cm	I _y cm ⁴	W _y cm ³	i _y cm	I _t cm ⁴	I _a cm ⁶	w mm	w ₁ mm	a mm	p kp/m	
HEB 100	100	100	6,0	10,0	12	56	567	26,0	52,1	450	90	4,16	167	33	2,53	9,34	3.375	55	—	13	20,4	P
HEB 120	120	120	6,5	11,0	12	74	686	34,0	82,6	864	144	5,04	318	53	3,06	14,90	9.410	65	—	17	26,7	P
HEB 140	140	140	7,0	12,0	12	92	805	43,0	123,0	1.509	216	5,93	550	79	3,58	22,50	22.480	75	—	21	33,7	P
HEB 160	160	160	8,0	13,0	15	104	918	54,3	177,0	2.492	311	6,78	889	111	4,05	33,20	47.940	85	—	23	42,6	P
HEB 180	180	180	8,5	14,0	15	122	1.040	65,3	241,0	3.831	426	7,66	1.363	151	4,57	46,50	93.750	100	—	25	51,2	P
HEB 200	200	200	9,0	15,0	18	134	1.150	78,1	321,0	5.696	570	8,54	2.003	200	5,07	63,40	171.100	110	—	25	61,3	P
HEB 220	220	220	9,5	16,0	18	152	1.270	91,0	414,0	8.091	736	9,43	2.843	258	5,59	84,40	295.400	120	—	25	71,5	P
HEB 240	240	240	10,0	17,0	21	164	1.380	106,0	527,0	11.259	938	10,30	3.923	327	6,08	110,00	486.900	90	35	25	83,2	P

Tabla 2. Dimensiones perfiles HEB.[4]

En la parte posterior de la viga se sueldan dos salientes, con dos taladros de métrica M18 cada uno donde se atornillan cáncamos de alta resistencia, que permitirán regular la tensión de la cadena. A cada uno de estos se engancha una de las cuatro cadenas de elevación mediante grilletes.



Ilustración 36. Cáncamo y grillete. Representativos, no los empleados.[5]

Sus dimensiones básicas son:

- Longitud de la viga: 2050mm
- Distancia entre puntos de anclaje de cadenas: 900mm
- Distancia entre palancas: 1530mm
- Distancia entre rodamientos laterales: 505mm

- Distancia entre rodamientos frontales: 260mm
- Cilindros hidráulicos: su función es soportar el peso de los frames y generar la fuerza necesaria para elevarlos. Se eligen cilindros de simple efecto, los cuales solo pueden ejercer fuerza en un sentido y son más baratos y sencillos, suficiente en este caso ya que solo trabajan en el sentido de elevación.
- Al emplearse un sistema de polea y cadena, y como se demuestra en el capítulo 4, la carrera del pistón necesaria es la mitad del recorrido de elevación del frame. Esto supone una gran ventaja ya que permite usar un cilindro más pequeño y sencillo.
- Los cilindros se instalan sobre un pedestal, anclados por cuatro tornillos de M10x50 y tuercas. En la parte posterior de la base de dicho pedestal se añade un saliente en el cual se ancla el extremo fijo de las cadenas mediante cáncamos. Al final del cilindro se instalan dos poleas, albergando una cadena cada una.

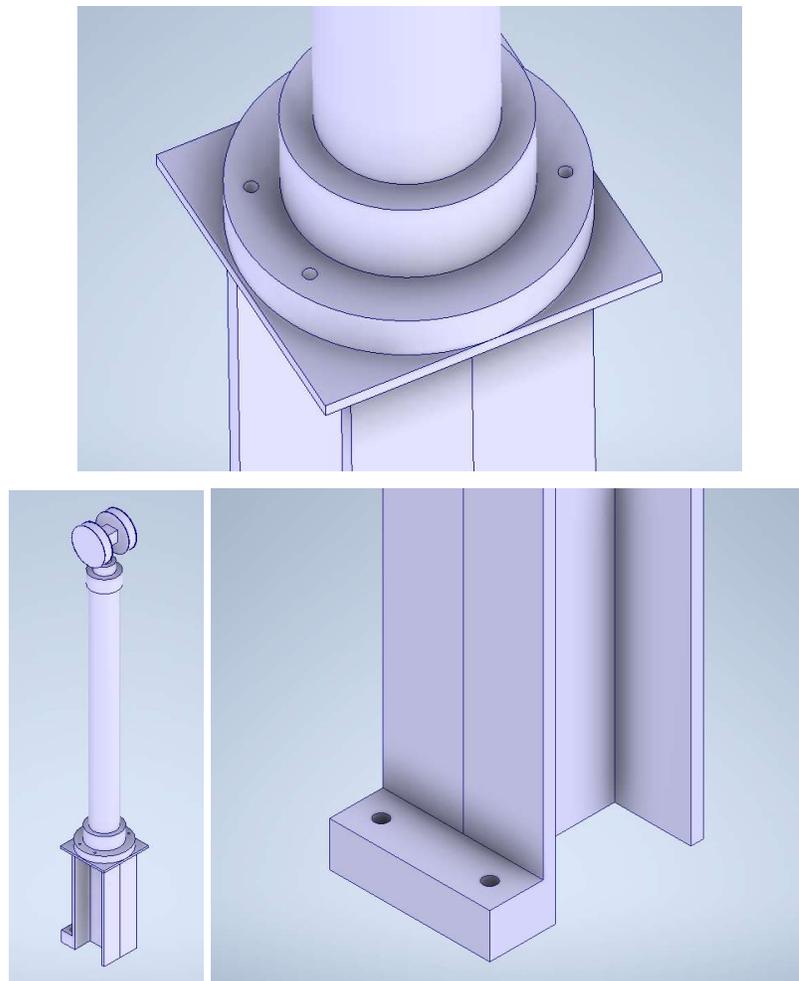


Ilustración 37. Conjunto de cilindro y detalle de pedestal.

- Cadenas: transmiten la fuerza de elevación entre el pistón y la viga de apoyo. Se emplean cadenas en vez de cables por varias razones: requieren menor mantenimiento, las tensiones que deben soportar son pequeñas en comparación a sus capacidades máximas y proporcionan ‘elevación vertical verdadera’, de forma que no introducen movimientos laterales en la carga elevada haciéndolas más precisas. [6]

La estructura de las guías verticales, las vigas de apoyo y los añadidos de los cilindros hidráulicos se construirán y ensamblarán en las instalaciones del fabricante del sistema de elevación, de forma que en fábrica solo se requiera hacer el montaje y la unión a la solera de la nave. Esto supondrá un menor coste económico y minimizará el impacto sobre la actividad de la fábrica.

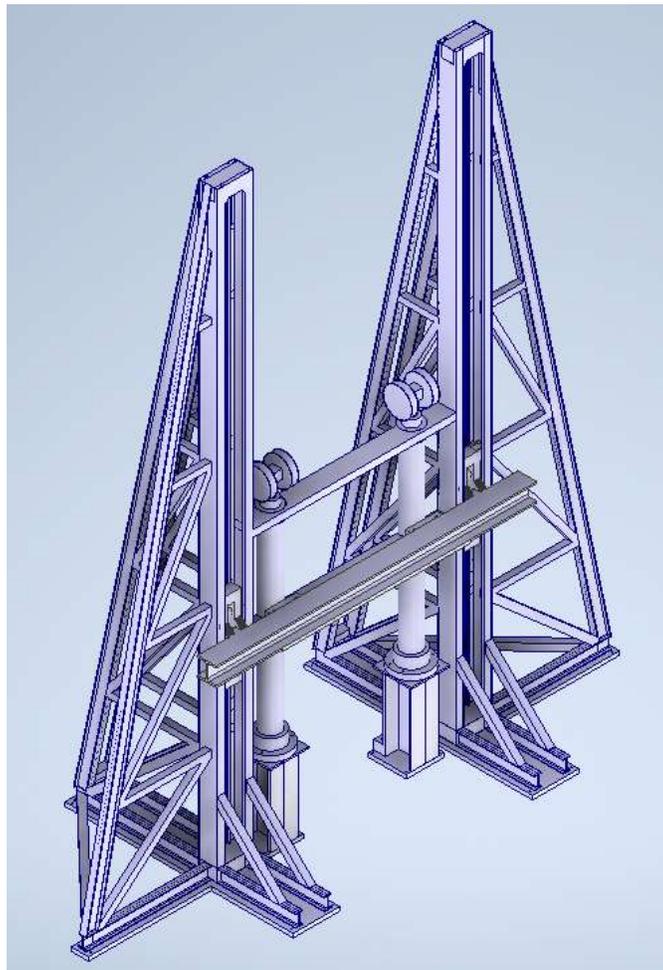


Ilustración 38. Conjunto completo de torres de elevación.

2.2.4 Iteraciones previas

Hasta llegar a este diseño final se ha seguido un proceso de diseño iterativo, en el cual se partió de una modelo inicial simplificado. Este se fue desarrollando y adaptando para reducir el espacio ocupado y evitar incompatibilidades con los frame. También se fue reforzando a medida que se calculaban los esfuerzos y se realizaban ensayos de resistencia.

- Primera iteración: el diseño básico consistía en una única estructura que rodeaba los frames uniendo las diversas torres, las cuales contaban con uñas largas. No es necesario unir todas las torres ya que tienen suficiente estabilidad por si solas, y al unirlas se dificulta la posibilidad de cambiar su posición o disposición. Nótese que las uñas o vigas de carga son alargadas y se introducen considerablemente debajo del área del frame. Aun no se había decidido la forma de generar la fuerza de elevación.

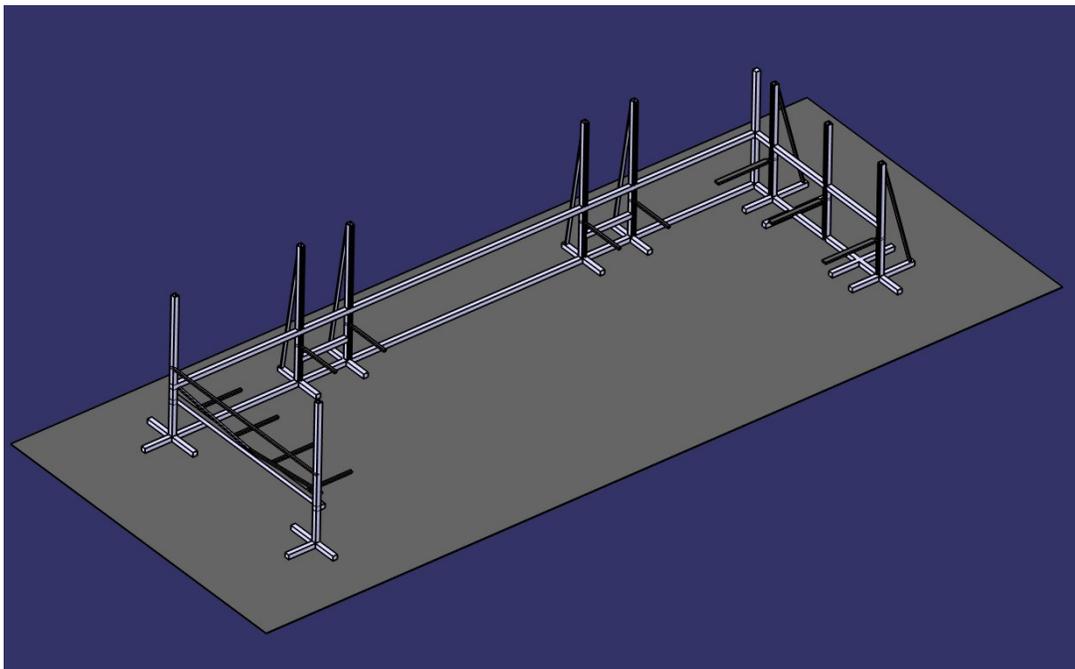


Ilustración 39. Primera iteración de diseño

- Segunda iteración: En esta fase se eligió el sistema de cilindros con polea y cadena para generar y transmitir la fuerza de elevación. Se individualizaron los elevadores, separándolos del resto. Las viga de carga con uñas se modificó para apoyar la mayor superficie posible de la estructura inferior del frame.

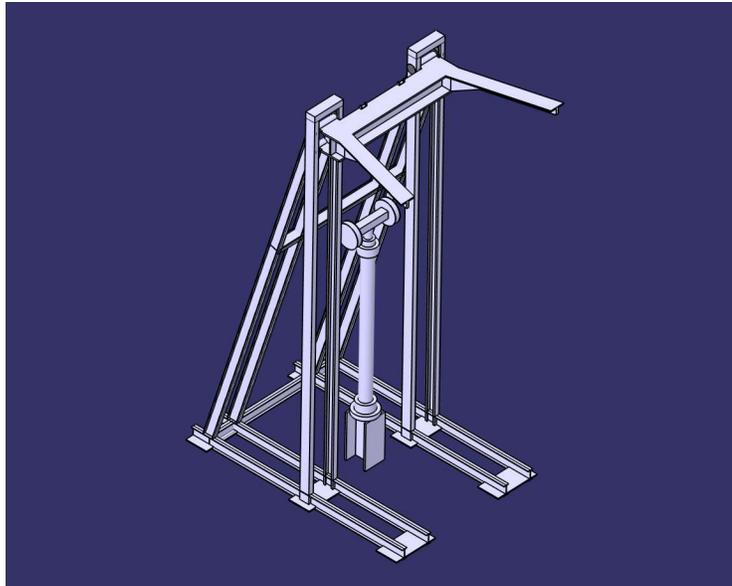


Ilustración 40. Segunda iteración de diseño.

- Tercera iteración: fue en esta etapa donde se comprendió que la viga de carga con uñas impactaría con los útiles cargados, por lo que se eliminaron las uñas y se aumentó la longitud de la viga. Se añadieron refuerzos entre las guías verticales para aumentar la estabilidad de la estructura y se añadieron las cuñas inferiores para repartir los esfuerzos en la base.

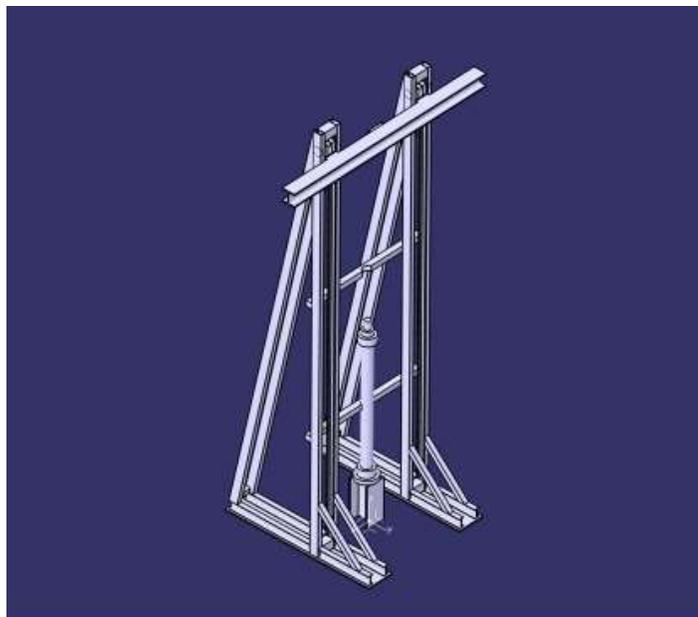


Ilustración 41. Tercera iteración de diseño.

- Cuarta iteración: se estudió la posibilidad de dotar de cierta capacidad de movimiento a las torres de elevación, para poder adaptar su disposición a otro tipo de cargas. Dada la imposibilidad de crear carriles por especificación, se pensó en aumentar ligeramente el tamaño de las basas de las torres e incluir un pequeño set de ruedas sobre un rail de corta longitud. Esto permitiría un recorrido aproximado de entre 30 y 50cm, pero aumentaría notablemente el coste del sistema ya que requiere un set de motorreductores y sistema de control adicional. Se estimó que la ganancia con relación al aumento de coste no estaba justificada, por lo que se optó por un sistema fijo.

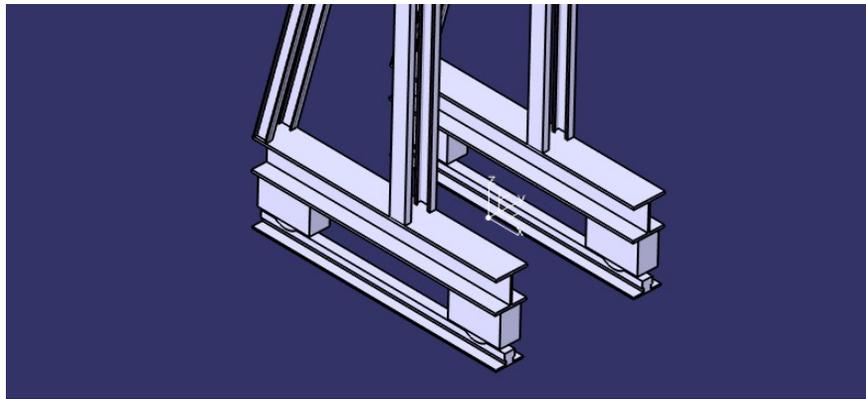


Ilustración 42. Cuarta iteración de diseño.

- Quinta iteración: siguiendo con el diseño estático de torres de elevación se añadieron celosías en los laterales para contrarrestar los esfuerzos en esa dirección. También se añadió un segundo sistema de cilindro con polea para mejorar la seguridad del conjunto. La principal diferencia con el diseño final es la complejidad de las celosías, que se redujo ya que se comprobó que no era necesario un sistema tan intrincado, disminuyendo los costes sin afectar a la seguridad. También se calculó el tamaño apropiado de las basas y la posición de los pernos de anclaje.

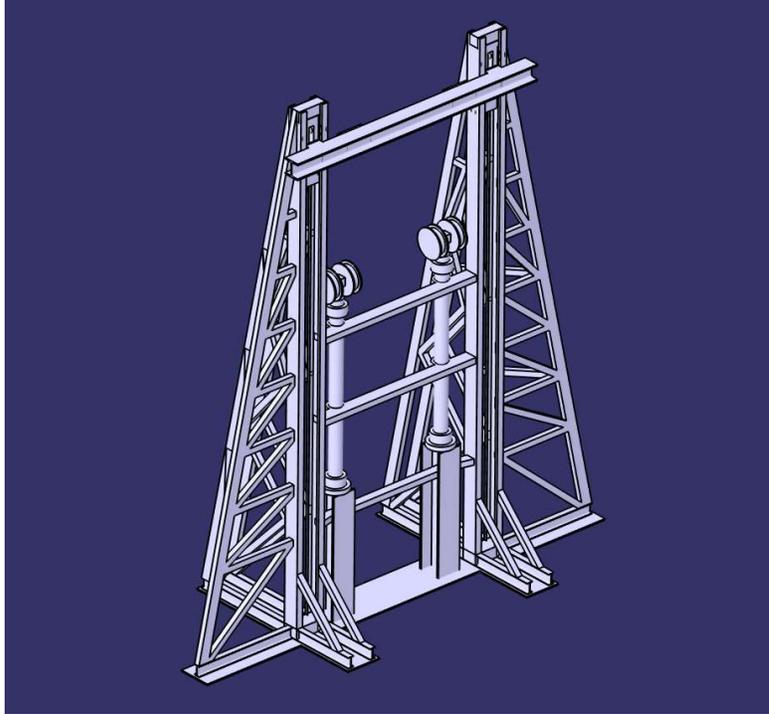


Ilustración 43. Quinta iteración de diseño.

2.3 SISTEMA DE CONTROL:

Se empleará un PLC para controlar el sistema hidráulico y las seguridades de las torres de elevación. El operador cuenta con un mando remoto para enviar las órdenes al PLC. Se hace así para que pueda tener movilidad, mejorando su visión de proceso. Se programan las dos alturas a las que tiene que ser elevado cada frame para dejar paso durante el proceso de carga, de forma que el operador tendrá tres opciones en el mando: descenso, altura 1 y altura 2. También cuenta con un botón de parada de emergencia y el botón de presencia que se explica a en el apartado siguiente. El diseño de las conexiones y controladores no entra dentro del alcance de este proyecto.

2.4 SEGURIDADES:

Uno de los objetivos más importantes de este proyecto es conseguir que el proceso de carga sea lo más seguro posible para los operarios de la planta. Con este fin se incorporan las siguientes medidas:

- **Barrera de seguridad:** para evitar que haya personal u objetos extraños dentro de la zona de carga durante el proceso de elevación o de descenso, se instala un sistema de sensores fotoeléctricos infrarrojos en torno al perímetro de la zona. Si estos

sensores detectan que se traspasa la barrera, el circuito manda una señal al PLC de control general y al operador y se detienen todos los movimientos.

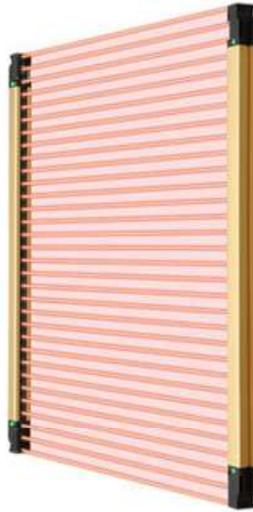


Ilustración 44. Barrera de seguridad. [7]

- **Dispositivo de presencia:** el mando de control cuenta con un botón que debe ser presionado constantemente por el operador durante las operaciones. En caso de no ser presionado estas se detienen. Este dispositivo previene accidentes en caso de que el operario que controla la operación se desvanezca o se encuentre incapacitado.
- **Control de altura:** para evitar una elevación excesiva y que la viga de apoyo pueda salir de los carriles de guiado, se instala un encoder de cable (o sensor de posición lineal) en cada torre. Este consiste en un cable enrollador en un tambor giratorio, que se desenrolla al tirar de él. De esta forma el sistema de control puede reconocer cuando se ha superado la altura máxima segura y detener los cilindros hidráulicos.
- **Redundancia:** Durante la fase de diseño, para los elementos que son considerados críticos, es decir, aquellos que si fallan pueden suponer un alto riesgo de accidente, se decide instalar varios. Ejemplo de esto son los cilindros hidráulicos y las cadenas de elevación. Con la redundancia se consigue aumentar la seguridad al repartir los esfuerzos, al tiempo que se aumenta la capacidad máxima del sistema de elevación y se reduce el deterioro de las piezas.
- **Aviso de sobrecarga:** el sistema hidráulico irá equipado con un control de presión. Si se detecta que la presión demandada es mayor que la necesaria para elevar 16 toneladas, el sistema quedará bloqueado y se enviará una señal al operador para evitar elevar una carga que supere la capacidad de la estructura.

- **Ayuda de posicionamiento:** Se identifica como una acción de riesgo el movimiento de los frames vacíos hasta la zona de carga con el puente grúa, ya que el espacio sobrante entre las torres de elevación y los bordes del frame es de solo unos cm. Para ayudar en esta tarea y evitar colisiones, se instalará un sistema de dos sensores fotoeléctricos y dos luces. Cada uno de los sensores se instala en una de las torres laterales. Estos detectan cuando el frame está entre las dos torres, y las luces se lo hacen saber al operador poniéndose en verde. Esquemáticamente:

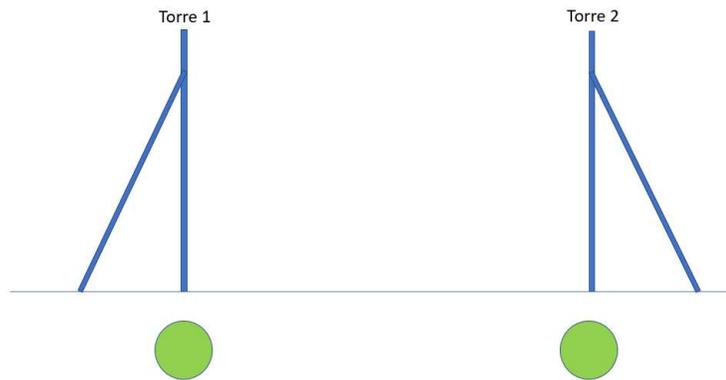


Ilustración 45. Estado inicial.

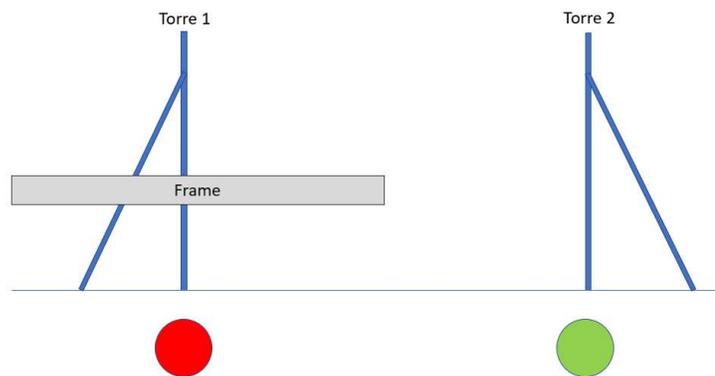


Ilustración 46. Frame en movimiento.

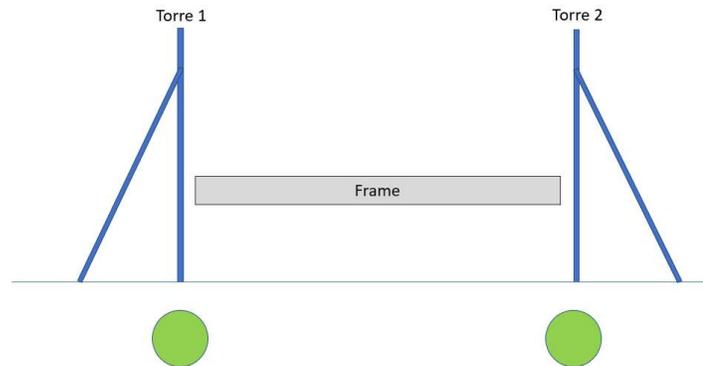


Ilustración 47. Frame en posición correcta.

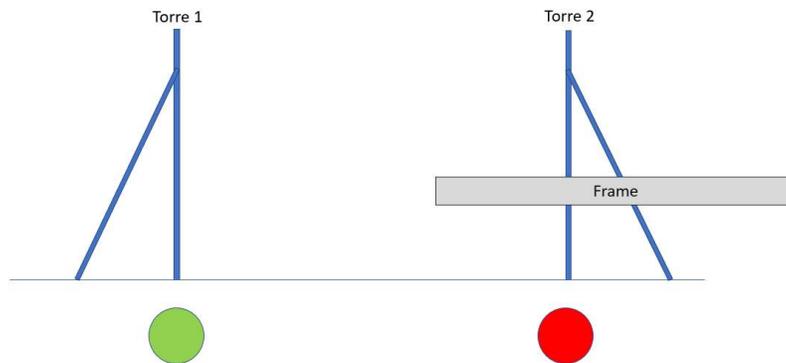


Ilustración 48. Frame en posición incorrecta.

Para la tercera torre de elevación se instalará un sistema similar, con otro control de proximidad y otra luz para evitar golpes en el movimiento de aproximación.

2.5 SISTEMA HIDRÁULICO:

El sistema hidráulico se encarga de controlar los cilindros y proporcionar la presión necesaria. El PLC del sistema de control envía las órdenes a un distribuidor (válvula de cuatro vías) común para las tres torres, el cual envía el fluido a presión hasta cada uno de los cilindros. Este sistema centralizado permite tener un control simultaneo de cada torre y en caso de que en alguno de los circuitos la presión demandada sea menor o mayor que en el resto el sistema detiene las operaciones. Además del distribuidor y las líneas de distribución se necesitará un depósito para almacenar el fluido, una bomba y sistema de filtrado. El cálculo y diseño de estos elementos no entra en el alcance de este proyecto.

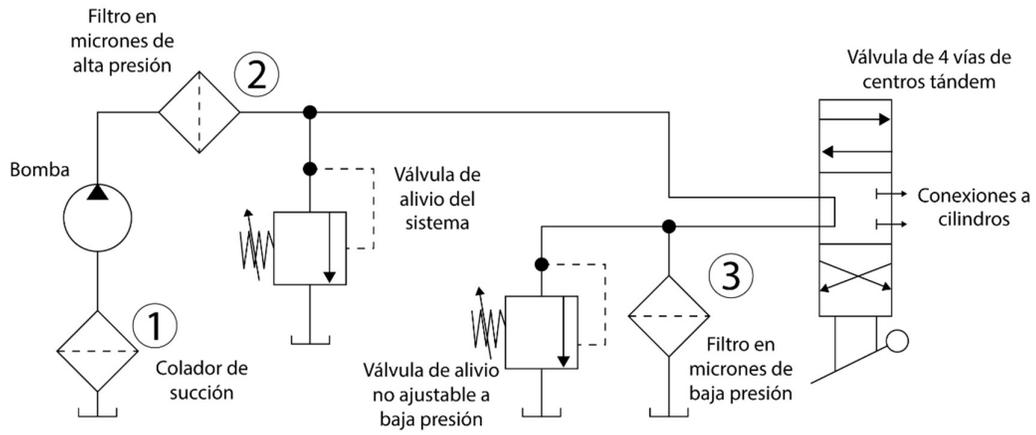


Ilustración 49. Esquema hidráulico.[8]

3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

3.1 INTRODUCCIÓN

La *Teoría de la Elasticidad* es la rama de la mecánica que estudia el comportamiento elástico de sólidos deformables. La formulación matemática de estas teorías es de gran complejidad, haciendo que la obtención de soluciones exactas quede restringido a casos concretos sencillos.

En el caso de algunos cuerpos, debido a su geometría y carga, es posible introducir hipótesis simplificadoras que faciliten la obtención de resultados aproximados. La *Resistencia de materiales* se encarga del estudio de dichos cuerpos.

El objetivo de estas disciplinas no es el mero conocimiento científico, sino técnico. Conocer el comportamiento de los cuerpos sólidos nos permite diseñar elementos constructivos de máquinas y edificios. [9]

La *Teoría de la energía de distorsión* de Von Mises “expresa que el estado límite de un punto de un sólido en el que existe un estado tensional cualquiera comienza cuando la energía de distorsión por unidad de volumen en un entorno de dicho punto es igual a la energía de distorsión absorbida por unidad de volumen cuando el material alcanza la tensión límite en el ensayo de tracción.” [9] Esta teoría es muy efectiva en el estudio de resistencia de materiales dúctiles.

Dada la complejidad del sistema a estudiar se emplea el software Autodesk Inventor, cuyo módulo de análisis de tensiones emplea un *Método de Elementos Finitos* (como la mayoría de estos softwares). Estos métodos son procedimientos numéricos basados en la división del sistema en subsistemas de menor tamaño y menor complejidad (mallado), y la idealización del problema físico a un modelo matemático. Gracias al poder computacional de los ordenadores modernos se resuelve ese modelo para cada uno de los subsistemas y se interpreta la solución global. El resultado es una aproximación a la realidad, cuya precisión depende del modelo matemático empleado y de la forma y tamaño elegida para las subdivisiones. [10]

Se emplea Autodesk Inventor ya que es el software al que se tiene acceso como estudiante de la UVa de forma gratuita, siendo Autodesk una compañía referente en el diseño de

softwares de uso ingenieril. Los parámetros empleados para el mallado de las estructuras se mantienen dentro de los valores recomendados por el proveedor.

El módulo de cálculo de resistencia de Inventor obtiene las tensiones de Von Mises para comprobar que estas no superan la resistencia de cálculo como se establece en el Documento Básico de Seguridad estructural del acero. [11]

3.2 HIPÓTESIS

- Los valores de resistencia de los aceros empleados son los dados por la norma UNE EN 10025:

Tabla 4.1 Características mecánicas mínimas de los aceros UNE EN 10025

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)			Tensión de rotura f_u (N/mm ²)	
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100	
S235JR					20
S235J0	235	225	215	360	0
S235J2					-20
S275JR					20
S275J0	275	265	255	410	0
S275J2					-20
S355JR					20
S355J0	355	345	335	470	0
S355J2					-20
S355K2					-20 ⁽¹⁾
S450J0	450	430	410	550	0

⁽¹⁾ Se le exige una energía mínima de 40J.

3 Las siguientes son características comunes a todos los aceros:

- módulo de Elasticidad: E 210.000 N/mm²
- módulo de Rigidez: G 81.000 N/mm²
- coeficiente de Poisson: ν 0,3
- coeficiente de dilatación térmica: α $1,2 \cdot 10^{-5}$ (°C)⁻¹
- densidad: ρ 7.850 kg/m³

Tabla 3. Características mecánicas mínimas de los aceros. [11]

- Dado que las velocidades de elevación van a ser muy reducidas, del orden de los 1m/min, se puede considerar el sistema como estacionario.
- No se consideran efectos del viento por estar el sistema dentro de una nave cerrada.[12]
- No se tienen en cuenta los efectos sísmicos.[12]
- El peso de la carga está repartido de forma uniforme por toda la superficie superior del frame.

- Las uniones de soldadura entre los diversos componentes de los aparatos se consideran perfectas y no debilitan la estructura.
- Se emplean los siguientes valores para el mallado de los modelos en Inventor, acordes a los recomendados por Autodesk. [13]

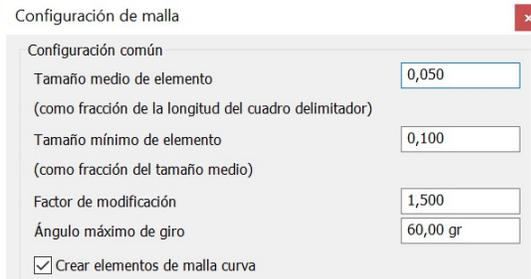


Ilustración 50. Configuración de malla.

- La configuración del módulo de análisis de Invento se mantiene en los valores predeterminados:

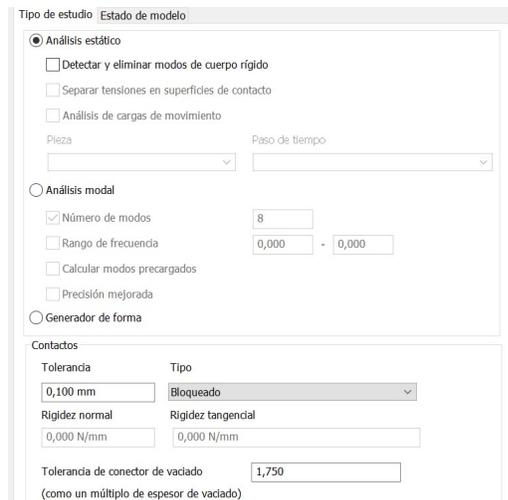


Ilustración 51. Configuración Inventor.

3.3 CÁLCULO DE FUERZAS

El estudio de resistencia requiere conocer las fuerzas que se ejercen sobre cada uno de los cuerpos que van a ser analizados. Se procede a calcularlas.

La única carga que hay en el sistema es el peso del frame (3700kg) más los útiles (15 toneladas como indica la especificación). El total es repartido entre las tres torres de elevación, pasando a cada una de sus vigas de apoyo y de ahí a los cilindros hidráulicos por medio de las cadenas. El peso que soporta cada torre es:

Carga	15.000 kg = 147.000N
Frame	3.700kg = 36.260N
Número de torres	3
Peso total	183.260 N
Peso por torre	61.086 N

Tabla 4. Peso de carga.

Dado que las vigas de apoyo empujan los frames con toda su superficie superior y las cadenas solo trabajan a tracción, es evidente que el punto de aplicación de ambas fuerzas no puede estar sobre la misma vertical. Es por ello que las cadenas se unen a la viga por un saliente, de forma que al existir una distancia entre el eje de aplicación de las fuerzas se genera un momento que tiende a rotar la viga.

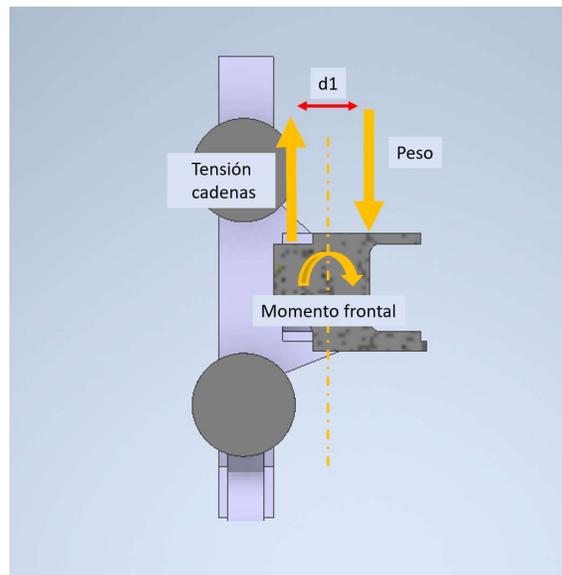


Ilustración 52. Momento frontal sobre viga horizontal.

El valor de ese momento es:

$$M_1 = \text{Peso} * d_1$$

Ecuación 1

Distancia entre fuerzas d₁	60 mm
Momento frontal M₁	3.665.160 Nmm

Tabla 5. Momento frontal.

Este momento se transmite por medio de las palancas a las guías, generando una fuerza en cada uno de los rodamientos de apoyo. Esta fuerza será de misma magnitud y dirección para cada apoyo, pero en los rodamientos superiores tiene sentido opuesto a las inferiores.

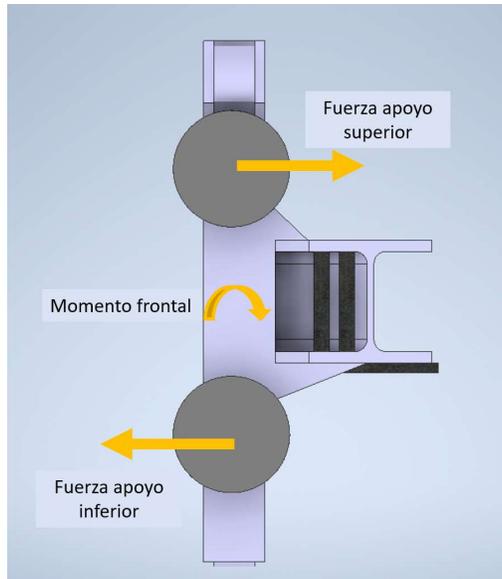


Ilustración 53. Fuerzas sobre apoyos.

Quedan por tanto equilibradas, y se calculan:

$$F_{apoyos\ frontal} = \frac{M_1}{d_2 * N^{\circ}_{apoyos\ frontales}}$$

Ecuación 2

Distancia entre apoyos d₂	130 mm
Número de guías	4
Número de apoyos frontales (2 por guía)	8
Fuerza por apoyo frontal	3.524,19 N

Tabla 6. Fuerzas apoyos frontales.

La carga se reparte por la superficie superior de la viga de apoyo, generándose momentos en los voladizos de los extremos. Para cada uno de los extremos:

$$M_2 = \frac{1}{2} * L_2 * (L_2 * \frac{Peso}{L_1})$$

Ecuación 3

Longitud de la viga L₁	2050 mm
Longitud del voladizo L₂	263,25 mm
Momento lateral M₂	1.032.510,77 Nmm

Tabla 7. Momento lateral.

Ese momento se transfiere a las guías por medio de dos rodamientos laterales al final de las palancas, generándose una fuerza en los puntos de apoyo:

$$F_{\text{apoyos laterales}} = \frac{M_2}{d_3 * N^{\circ}_{\text{apoyos laterales}}}$$

Ecuación 4

Distancia entre apoyos laterales d₃	222,50 mm
Número apoyos laterales	2
Fuerza apoyos laterales	2.320,25 N

Tabla 8. Furezas apoyos laterales.

3.4 ANÁLISIS

Conocidos los esfuerzos que actúan sobre cada elemento de la estructura se procede a realizar un análisis estructural de cada uno. Los resultados se presentan de forma gráfica en Inventor, diferenciando mediante colores como varían los valores en cada zona y señalando donde se encuentra el valor máximo o mínimo.

Se muestran las tensiones de Von Mises, las deformaciones y el factor de seguridad, ya que son los tres datos necesarios para valorar si la estructura cumple con la normativa y las especificaciones exigidas. Se recuerda que estas son:

- Factor de seguridad mínimo de 1,5 según la Directiva 2006/42/CE. [14]
- Deformación máxima de 0,5% respecto a la longitud del vano, según especificación.

En algunos elementos el diseño original no satisface estas exigencias, por lo que se refuerza la estructura para mejorar la respuesta.

3.4.1 Frame

Se comprueba que el frame, fabricado con acero S275, sea capaz de soportar el peso de la carga con la nueva configuración de apoyos. Las acciones aplicadas en Inventor son:

- Peso de la carga: 176.400 N, correspondiente a 15 toneladas con un factor de aumento de 1,2 para mayor seguridad. Repartido en toda la superficie superior.
- Aceleración de la gravedad sobre todo el cuerpo, para que el programa tenga en cuenta el peso del propio frame al hacer los cálculos

Para el frame en su forma original los resultados son los siguientes:

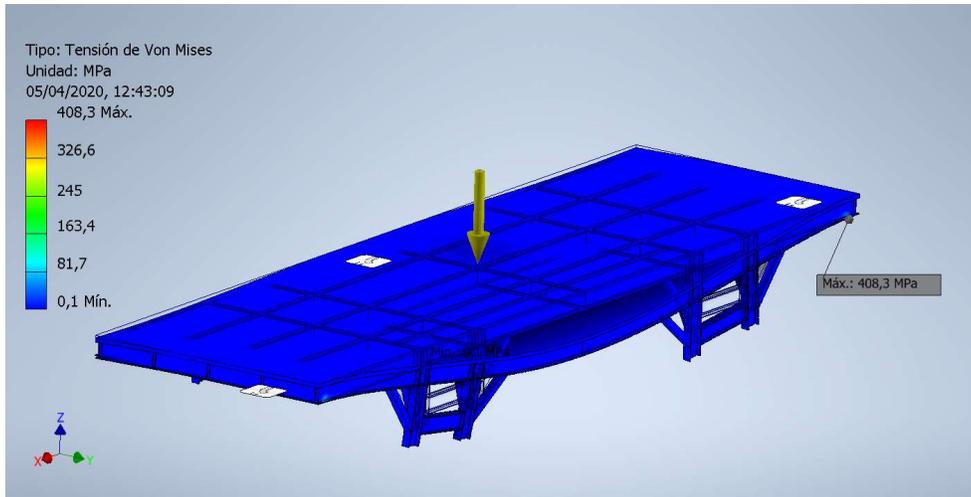


Ilustración 54. Tensión de Von Mises para frame sin refuerzo

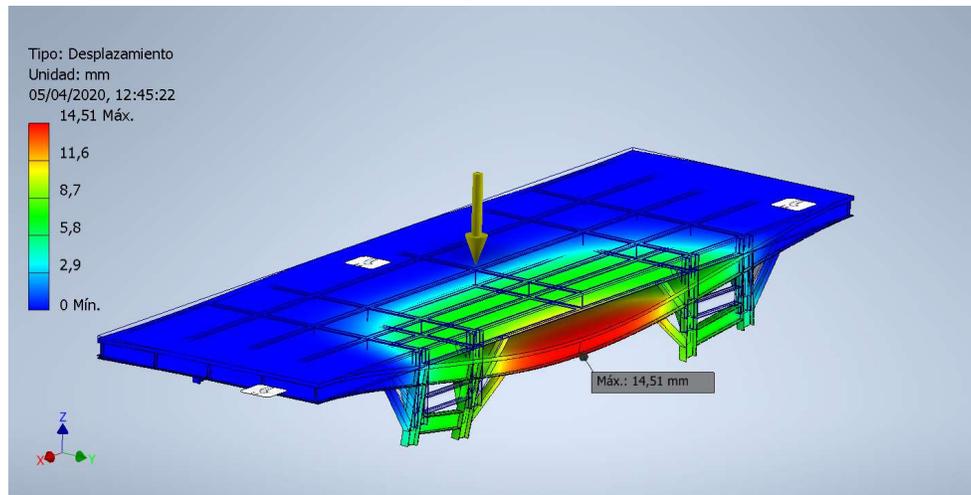


Ilustración 55. Desplazamiento para frame sin refuerzo

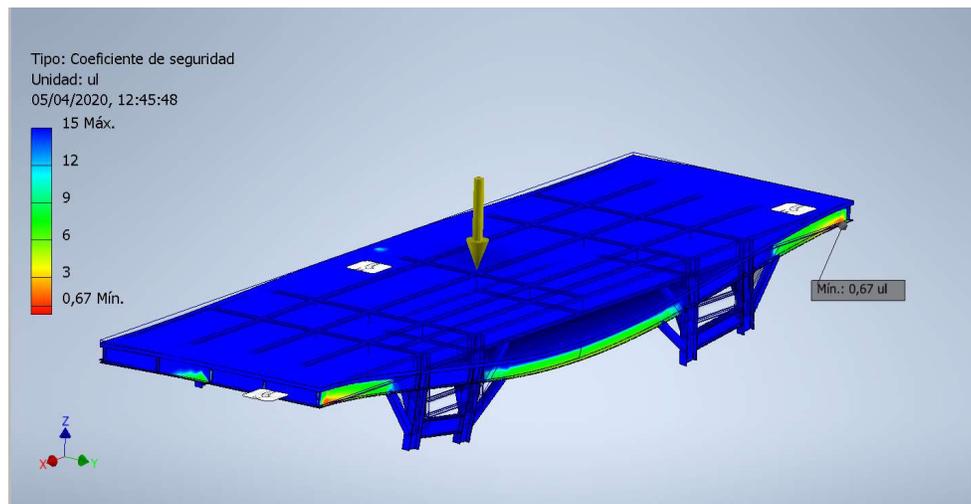


Ilustración 56. Coeficiente de seguridad para frame sin refuerzo

Se obtiene un coeficiente de seguridad de 0,67, el cual es inaceptable. Observando las deformaciones y las tensiones se puede ver que al no tener ningún apoyo a lo largo del lateral derecho esta es la zona del frame que más sufre. Por ello se propone una modificación al frame que refuerce ese área, añadiendo una viga IPE 140 S275 entre las patas trabajando a compresión.

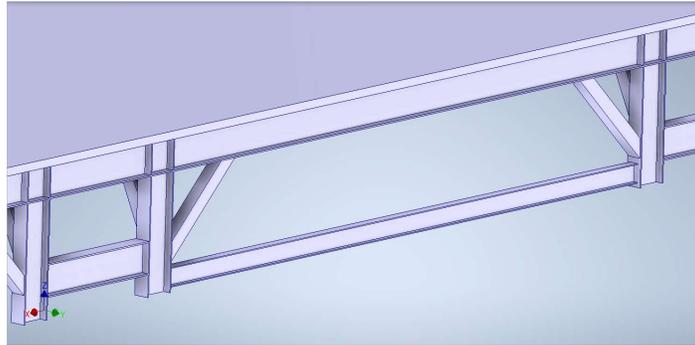
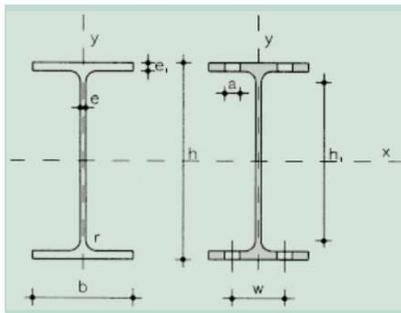


Ilustración 57. Refuerzo de frame.

Tabla 2.A1.2. Perfiles IPE



- A = Área de la sección
- S_x = Momento estático de media sección, respecto a X
- I_x = Momento de inercia de la sección, respecto a X
- $W_x = 2I_x : h$. Módulo resistente de la sección, respecto a X
- $i_x = \sqrt{I_x : A}$. Radio de giro de la sección, respecto a X
- I_y = Momento de inercia de la sección, respecto a Y
- $W_y = 2I_y : b$. Módulo resistente de la sección, respecto a Y
- $i_y = \sqrt{I_y : A}$. Radio de giro de la sección, respecto a Y
- I_t = Módulo de torsión de la sección
- I_a = Módulo de alabeo de la sección
- u = Perímetro de la sección
- a = Diámetro del agujero del roblón normal
- w = Gramil, distancia entre ejes de agujeros
- h_1 = Altura de la parte plana del alma
- p = Peso por m

Perfil	Dimensiones							Términos de sección								Agujeros			Peso		
	h mm	b mm	e mm	e ₁ mm	r ₁ mm	h ₁ mm	u mm	A cm ²	S_x cm ³	I_x cm ⁴	W_x cm ³	i_x cm	I_y cm ⁴	W_y cm ³	i_y cm	I_t cm ⁴	I_a cm ⁶	w mm	a mm	e ₂ mm	p kp/m
IPE 80	80	46	3,8	5,2	5	60	328	7,64	11,6	80,1	20,0	3,24	8,49	3,69	1,05	0,721	118	—	—	3,8	6,00 C
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7	75	400	10,30	19,7	171,0	34,2	4,07	15,90	5,79	1,24	1,140	351	—	—	4,1	8,10 C
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7	93	475	13,20	30,4	318,0	53,0	4,90	27,70	8,65	1,45	1,770	890	35	—	4,4	10,40 C
IPE 140	140	73	4,7	6,9	7	112	551	16,40	44,2	541,0	77,3	5,74	44,90	12,30	1,65	2,630	1.981	40	11	4,7	12,90 C

Tabla 9. Dimensiones perfiles IPE. [4]

Se realiza de nuevo el estudio con este refuerzo:

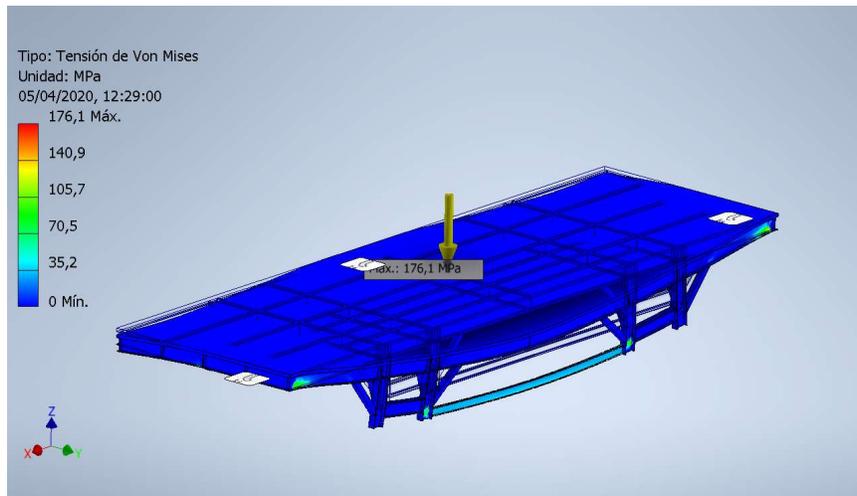


Ilustración 58. Tensión de Von Mises para frame con refuerzo

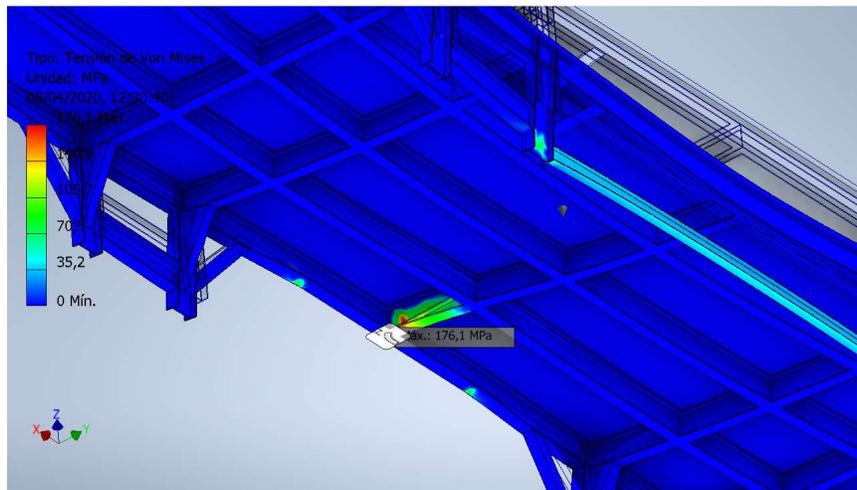


Ilustración 59. Tensión de Von Mises para frame con refuerzo

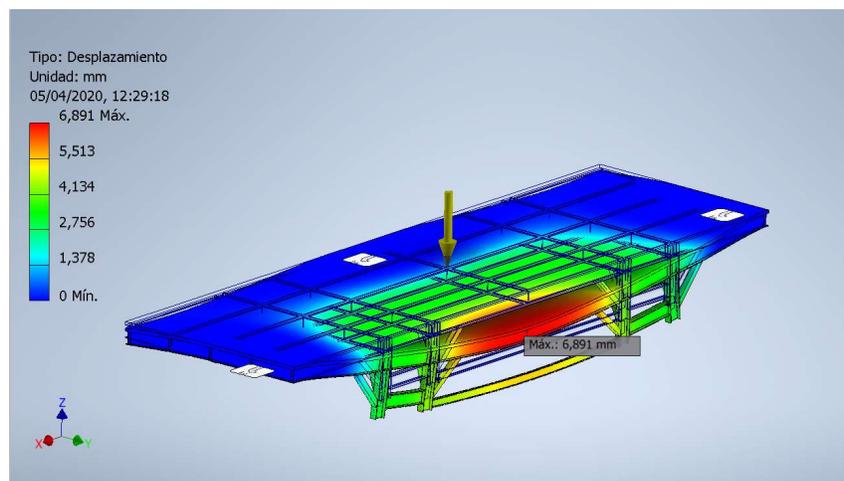


Ilustración 60. Desplazamiento para frame con refuerzo

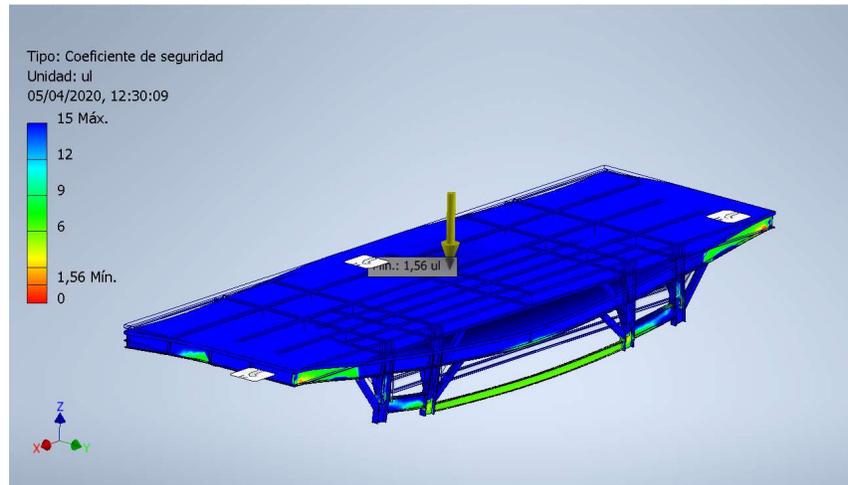


Ilustración 61. Coeficiente de seguridad para frame con refuerzo

El factor de seguridad de 1,56 es aceptable, ya que está por encima del mínimo exigido y la carga ha sido mayorada. Al mismo tiempo se reduce la proporción de la flecha máxima de un 0,28% a un 0,14%, la mitad. Por tanto, la modificación planteada es efectiva y permitirá usar los tres puntos de apoyo elegidos de forma segura. Para los próximos estudios habrá que tener en cuenta el ligero aumento de masa del frame, 63kg más.

3.4.2 Torres de elevación

Toda la estructura se fabrica con acero s275. Dado que el peso del frame ha sido modificado, las fuerzas que actúan sobre los raíles de las torres de elevación cambian ligeramente. Esto son los valores recalculados de igual forma para una carga de 15 toneladas y un peso de frame de 3763kg:

Fuerza por apoyo frontal	3.536,11 N
Fuerza apoyos laterales	2.328,10 N

Tabla 10. Fuerzas generadas por frame reforzado.

Las tensiones que debe soportar la estructura dependen en gran medida de los puntos de aplicación de esas fuerzas. Dado que se ha tomado la hipótesis de un sistema estacionario, se pueden diferenciar tres casos, que corresponden con tres alturas características del proceso de carga:

- a) Altura máxima: 3570mm

Posición de espera a la que se eleva el frame superior cargado para dejar paso al movimiento de los otros dos por debajo. Para esta altura los apoyos quedan en las siguientes posiciones:

Posición fuerzas	frontal	lateral
superior	3640	3732
inferior	3380	3279

Tabla 11. Posición superior fuerzas torres de elevación.

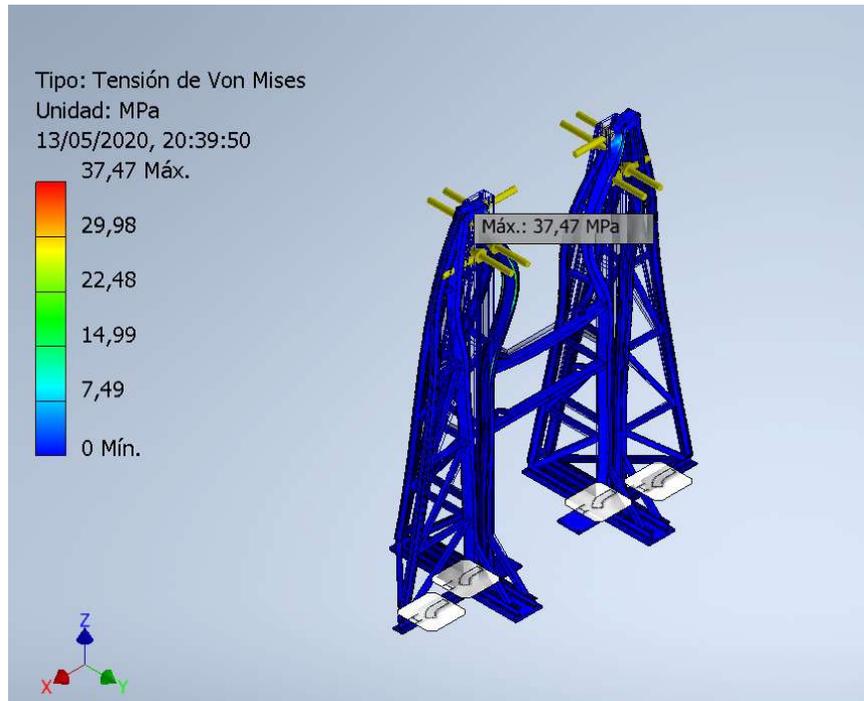


Ilustración 62 Tensión de Von Mises altura máxima.

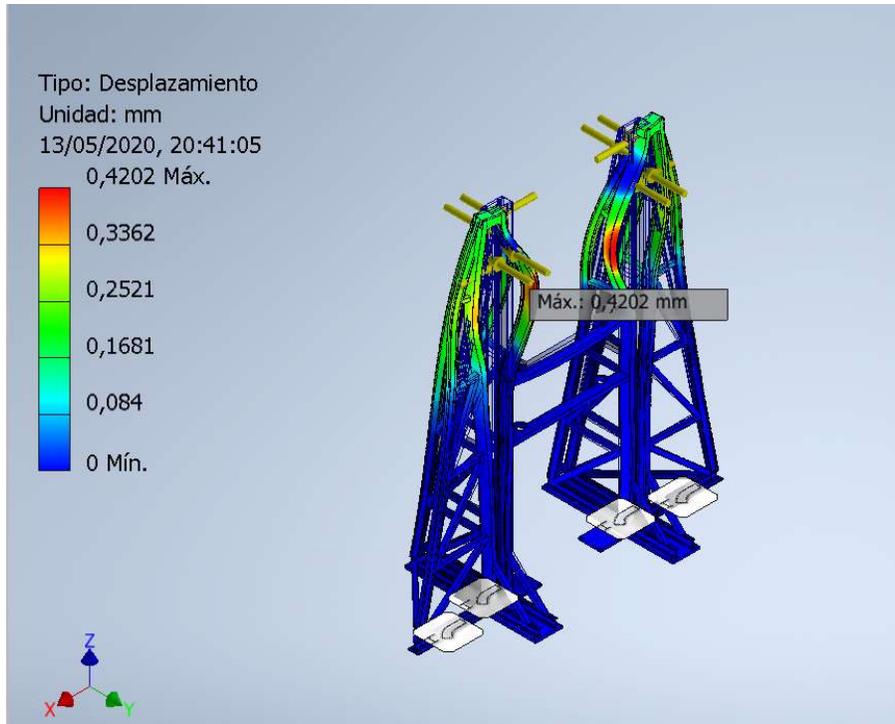


Ilustración 63 Desplazamiento altura máxima.

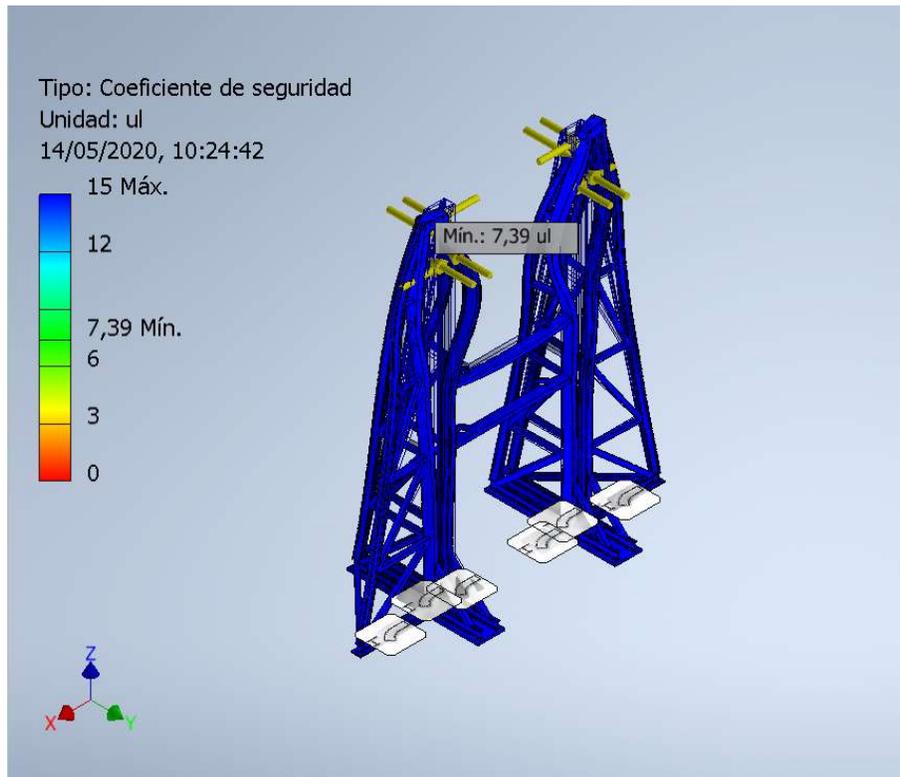


Ilustración 64. Coeficiente de seguridad altura máxima

b) Altura intermedia: 2405mm

Punto de espera para el frame intermedio, antes de deslizar debajo el frame inferior y apilarlo sobre él.

INTERMEDIO	frontal	lateral
superior	2475	2567
inferior	2215	2114

Tabla 12. Posición intermedia fuerzas torres de elevación

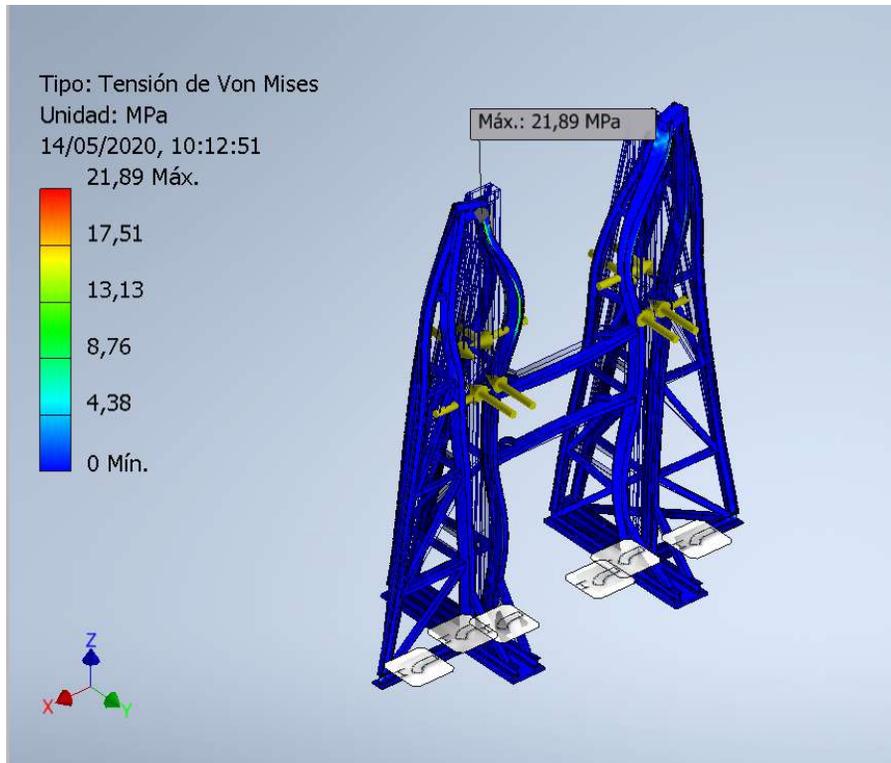
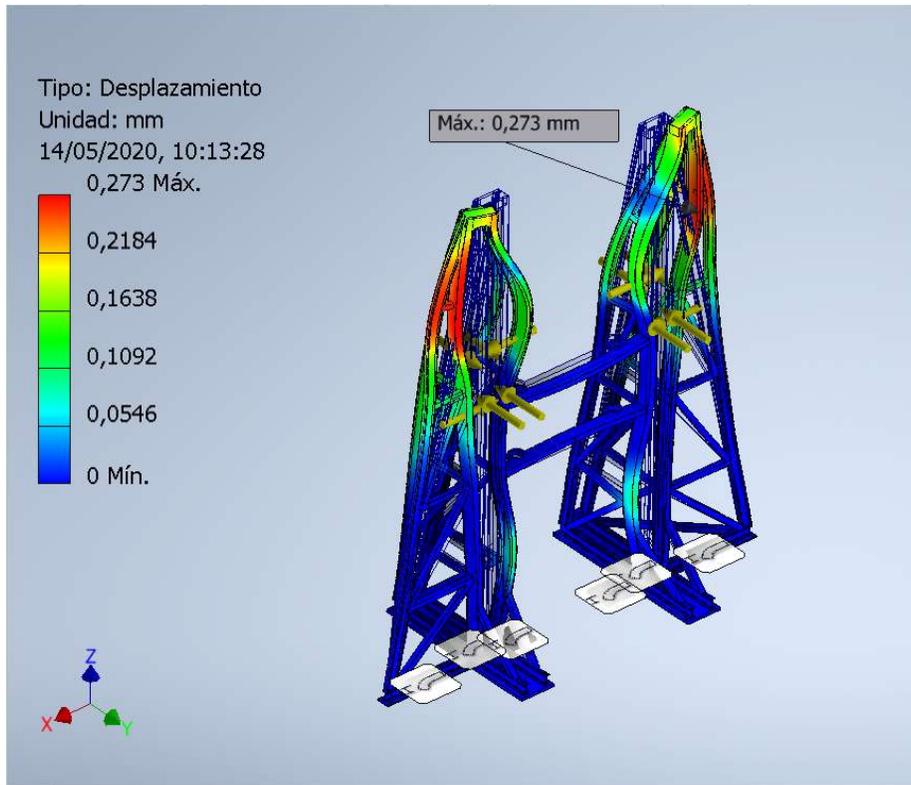
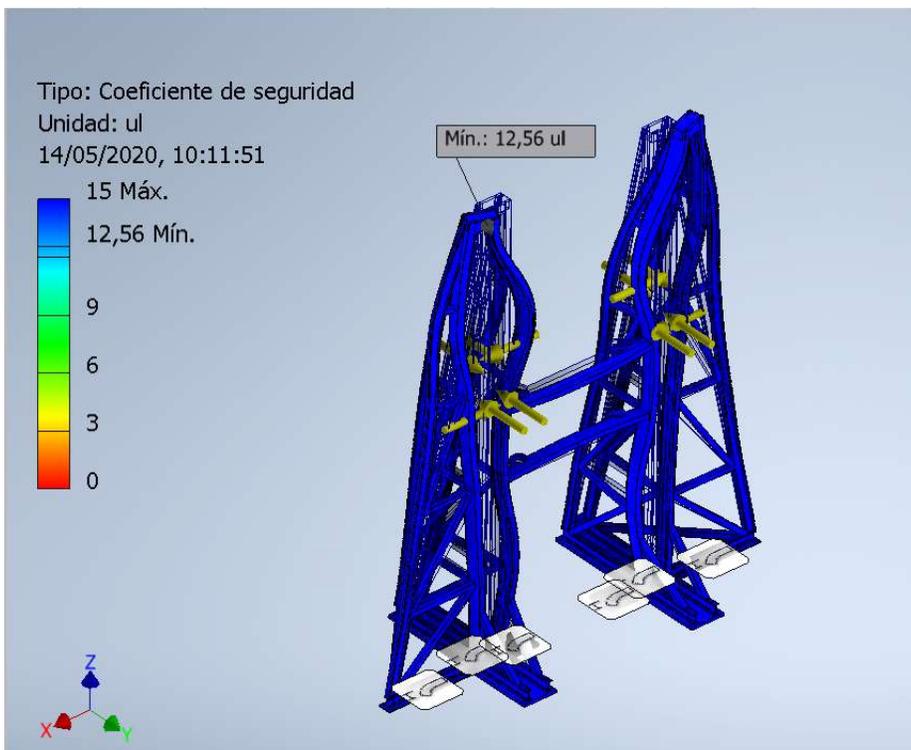


Ilustración 65 Tensión de Von Mises altura media.



Ilustracion 66 Desplazamiento altura media.



Ilustracion 67 Factor seguridad altura media.

c) Altura inferior: 875mm

Altura a la que se recogen los frames intermedio y superior después de ser cargados a nivel de suelo.

INFERIOR	frontal	lateral
superior	945	1037
inferior	685	584

Tabla 13. Posición intermedia fuerzas torres de elevación

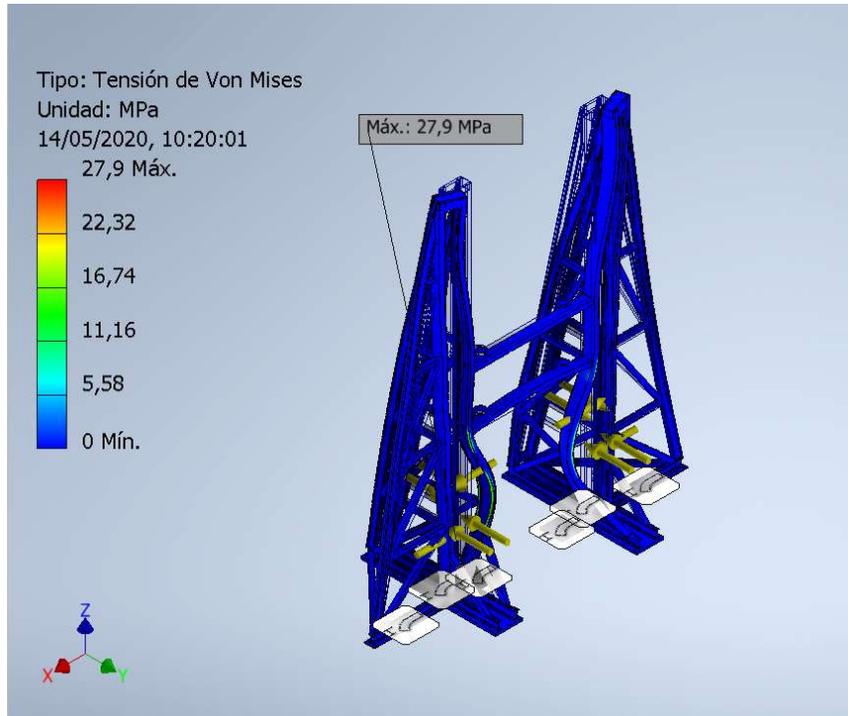
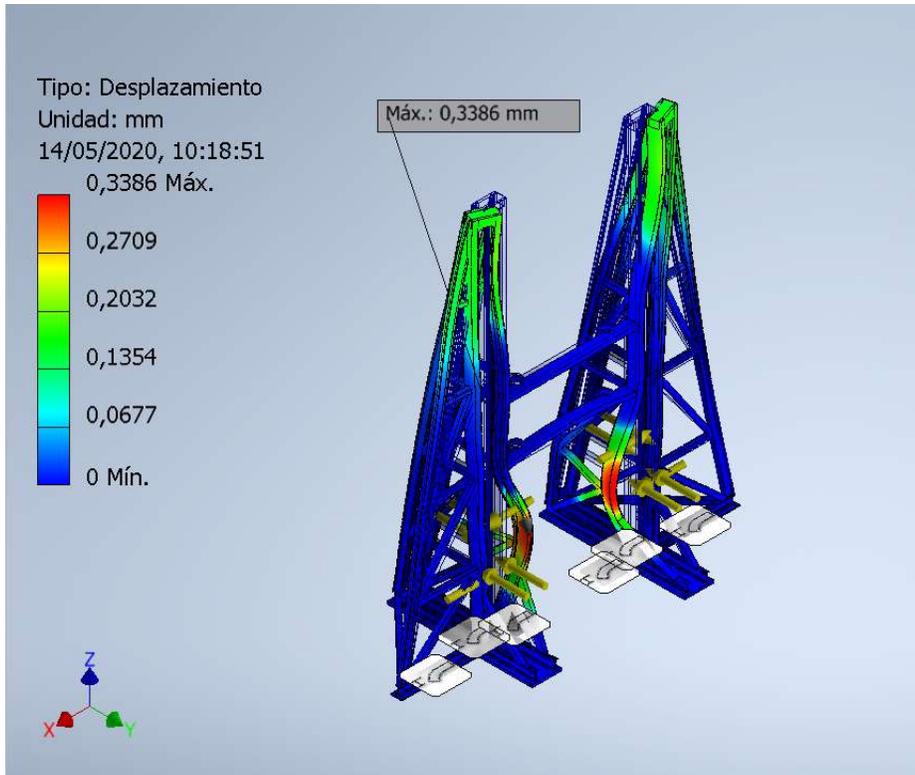
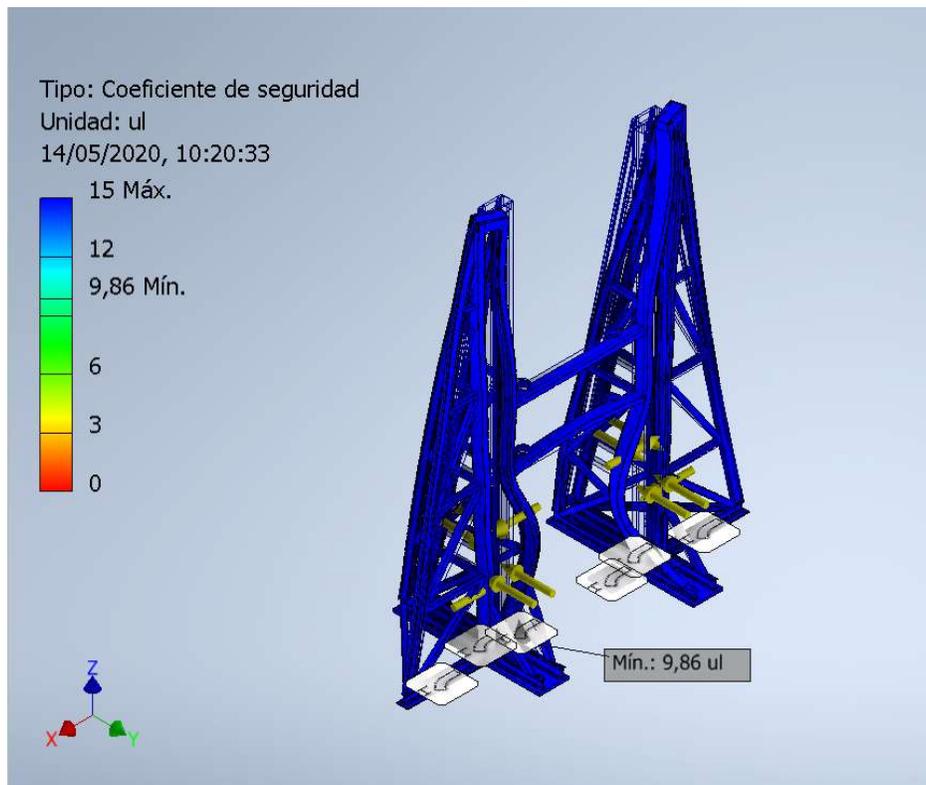


Ilustración 68 Tensión Von Mises altura inferior.



Ilustracion 69. Desplazamiento altura inferior.



Ilustracion 70. Factor de seguridad altura inferior.

Analizando y comparando los tres casos se puede ver que el punto que mayores tensiones produce es el más alto. Esto era de esperar, por lo que durante el diseño se extendieron las celosías de refuerzo hasta el final de las guías.

Los factores de seguridad entre 7,39 y 12,56 y la proporción de las flechas en relación al vano entre 0,02% y 0,007% revelan la gran resistencia y seguridad de la estructura.

Como se puede observar el extremo superior de las guías es una zona donde se generan las tensiones más altas, por lo que se refuerza mediante escuadras de acero por ambos lados:

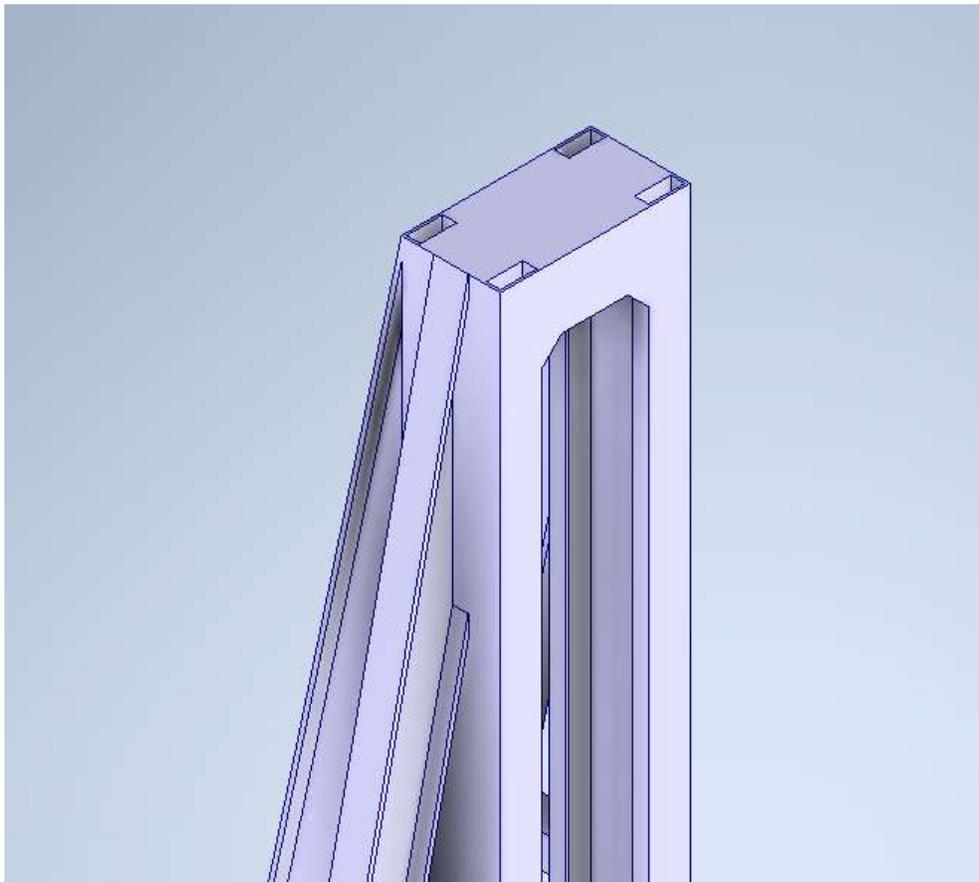


Ilustración 71. Escuadras de refuerzo en guías.

3.4.3 Viga de carga

Construida con acero S275. Durante el diseño de este elemento se prestó gran atención a la unión entre las palancas y la viga, ya que claramente era la zona que mayores tensiones iba a soportar. Por ello se incorporaron los siguientes refuerzos:

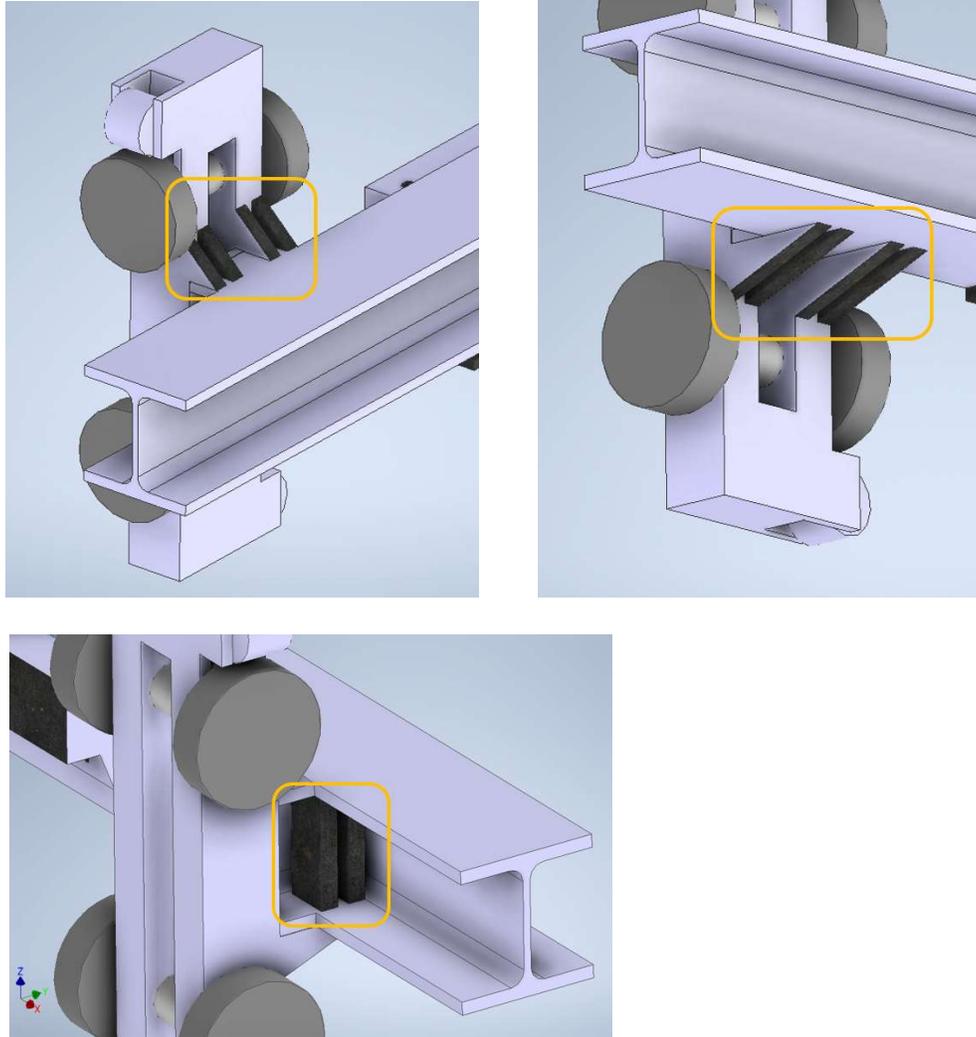


Ilustración 72. Refuerzos viga de elevación.

Además, se añade una platabanda de 10mm en la parte inferior de la viga para disminuir la flecha máxima.

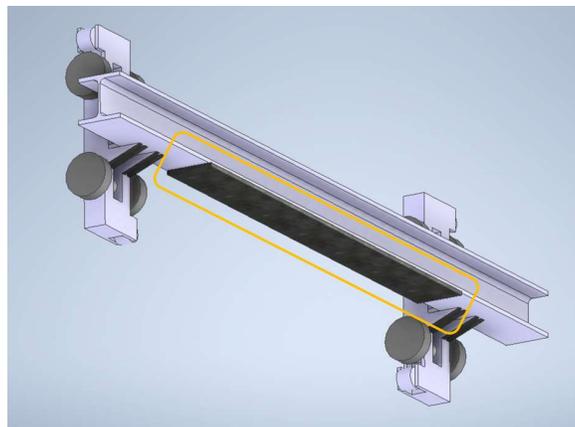


Ilustración 73. Platabanda viga elevación.

Las fuerzas que actúan son el peso de la carga, que se aplica sobre toda la superficie superior de la viga, y la tracción de las cadenas, que actúa en los salientes donde van empalmadas. El movimiento queda restringido por los apoyos de los rodamientos con las guías.

Peso	61.292 N
Tracción por cadena (Peso/2)	30.646 N

Tabla 14. Tracción de cadenas.

Los resultados del estudio son los siguientes:

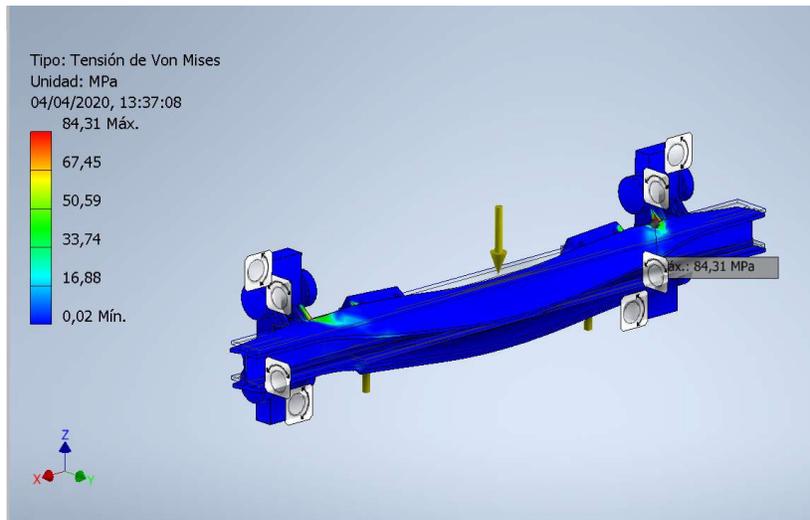


Ilustración 74. Tensiones de Von Mises viga de apoyo.

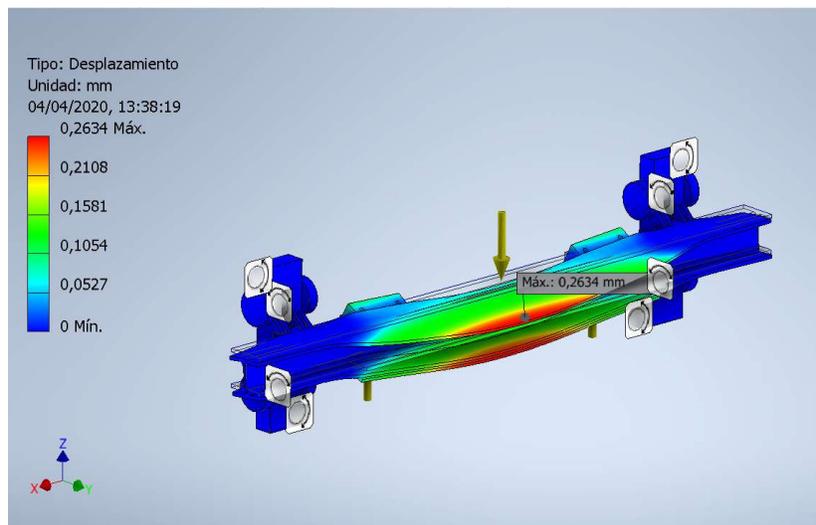
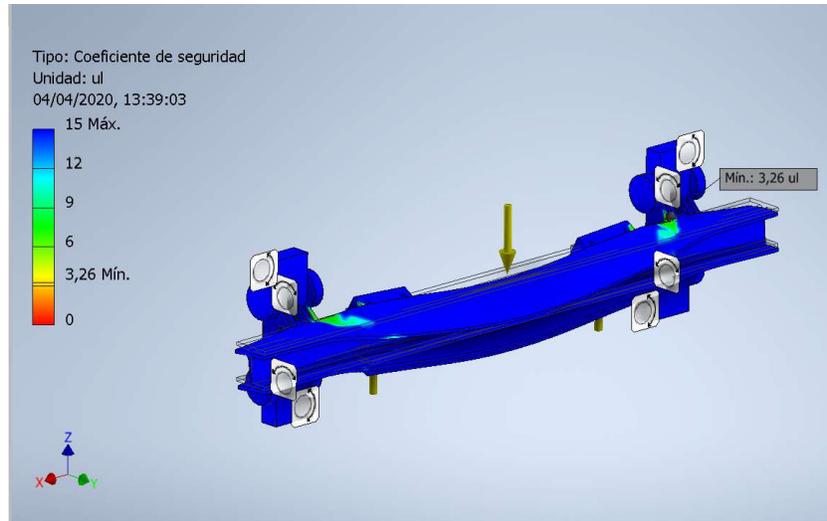


Ilustración 75. Desplazamiento viga de apoyo.



Ilustracin 76. Coeficiente de seguridad viga de apoyo.

Se cumplen los requisitos tanto de factor de seguridad como de flecha mxima, por lo que el diseo es aceptable.

4 DIMENSIONADO DE COMPONENTES

En este capítulo se justifica la elección de los distintos componentes empleados en el sistema de carga.

4.1 CADENAS

Las cadenas son un componente crítico ya que mantienen la carga elevada, en caso de romperse los daños generados serían muy costosos y podría provocar lesiones. Existen doce cadenas en total, cuatro por elevador, y para su elección adecuada se plantea un caso desfavorable y poco probable en que tres de ellas fallen al mismo tiempo (una por elevador). La carga por tanto se repartiría entre nueve cadenas:

Carga total (útiles + frame + viga de apoyo)	185.563,56 N
Número de cadenas	9
Carga por cadena	20.618,17 N

Tabla 15. Carga por cadena.

Se elige el proveedor YUK por ser español y facilitar una gran cantidad de datos en su catálogo. El tipo de cadena que se busca es de mallas juntas, por ser compactas y tener gran capacidad de carga. Dentro de su serie LH se elige el modelo LH0822 que cumple con las características necesarias:

CADENAS DE MALLAS JUNTAS SERIE BL (LH)

Leaf chains BL (LH) series
Chaînes à mailles jointives série BL (LH)



Referencia	Peso	Combinación	Ancho malla	Espesor malla	Ø Eje	Longitud eje	Carga de rotura	Peso por metro
Referencia	Pitch	mailla	Plate width	Plate thickness	Pin	Pin length	Breaking load	Weight per meter
Referencia	Pitch	mailla	Largeur plaques	Epaisseur plaques	Axe	Longueur axe	Charge rupture	Poids par mètre
	P	Plates lacing	H max	T max	D max	L max	Q min	q
	mm	Combinaison	mm	mm	mm	mm	KN	Kg/m
		plaques						
LH0822	BL422	2 X 2				11,05	22,2	0,64
LH0823	BL423	2 X 3				13,16	22,2	0,80

Tabla 16. Dimensiones cadena. [15]

Para calcular longitud de las cadenas se necesitan conocer la carrera y dimensiones del cilindro, obtenidos en el siguiente punto.

4.2 CILINDROS HIDRÁULICOS

Para la elección de los cilindros hidráulicos se atiende a dos factores principales:

- Capacidad de carga: Al emplearse una polea, si se considera un caso ideal (sin rozamientos ni inercias), la tensión de la cadena a ambos lados debe ser igual. Por equilibrio de fuerzas, la polea está sometida a la suma de esas dos tensiones. [16] Al mismo tiempo cada cilindro soporta dos poleas, por lo que la tensión que debe soportar es cuatro veces la tensión de cada cadena.

Volviendo a considerar el caso desfavorable antes empleado, en el que tres cadenas fallan, se calcula la fuerza de cada cilindro:

$$F_{cilindro} = T_{cadena} * 4$$

Ecuación 5

Tensión por cadena	T_{cadena}	20.618,17 N
Fuerza por cilindro	$F_{cilindro}$	82.472,69 N

Tabla 17. Fuerza por cadena y cilindro.

- Longitud de carrera: El usar una polea tiene también el efecto de duplicar la distancia recorrida por la carga con relación a la extensión del pistón. Se demuestra:

Sean:

- L= longitud total de la cadena
- L' = longitud de la cadena entre la polea y la carga
- x = extensión del pistón
- y = altura de la carga respecto a la base del pistón
- r = radio de la polea

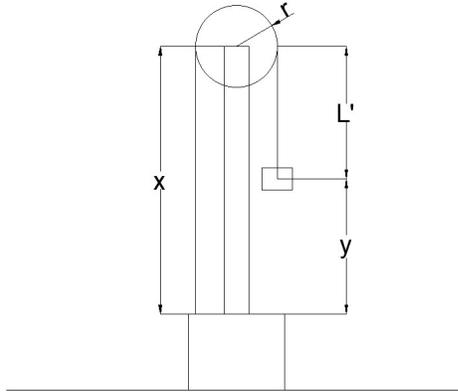


Ilustración 77. Esquema longitud cadena.

La longitud de la cadena, que es constante, se puede descomponer de la siguiente forma:

$$L = x + \pi * r + L' = cte$$

Ecuación 6

Como

$$L' = x - y$$

Ecuación 7

se despeja x en función de y :

$$L = x + \pi * r + x - y$$

$$L = 2x + \pi * r - y$$

$$x = \frac{y + L - \pi * r}{2}$$

Ecuación 8

Derivando respecto al tiempo para obtener las velocidades de elevación, teniendo en cuenta que el radio de la polea (r) y la longitud de la cadena (L) son valores constantes:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dy}{dt}$$

Ecuación 9

Como la velocidad de elevación de la carga es el doble que la de extensión del pistón, para un mismo intervalo de tiempo recorre el doble de distancia.

Por tanto, la carrera del pistón será la mitad de la diferencia entre la altura mínima a la que se recogen los frames y la altura máxima de punto de espera superior (ambos se expresan en relación con el suelo de la fábrica):

Altura mínima del frame	875 mm
Altura máxima del frame	3570 mm
Diferencia	2695 mm
Carrera del pistón (diferencia*0,5)	1348 mm

Tabla 18. Carrera de pistón.

Si no se emplease un sistema de polea la carrera sería el doble de larga, lo que implica un cilindro dos veces más grande o telescópico. Además, el sistema se complicaría porque el pistón tendría que ir instalado justo debajo de la viga de apoyo para ejercer la fuerza de elevación.

Esta viga tiene que bajar hasta una altura mínima de 875mm sobre el suelo, teniendo el pistón una longitud por lo menos igual a la carrera. La base del pistón tendría que estar debajo de la solera de la nave para poder ser instalado en esa posición.

Por tanto el uso de poleas queda justificado, sacrificando la necesidad de un pistón con el doble de capacidad en favor de la sencillez del sistema.

Tras buscar entre varios proveedores, se encuentra que la marca Rexroth cuenta con el cilindro más apropiado. Se trata del modelo CHD1 MF4 100/70, el cual cuenta con una base plana para poder trabajar en vertical apoyado sobre el pedestal anteriormente mencionado. En la siguiente figura se muestra la fuerza máxima para pistón de simple efecto F_2 , las dimensiones básicas y la longitud máxima de carrera de la que se podría dotar al cilindro. En todos los aspectos se guarda un gran margen de seguridad.

Diameters, areas, forces, flow

Piston	Piston rod	Area ratio	Areas			Force at 250 bar ¹⁾			Flow at 0.1 m/s ²⁾			max. available stroke length
			Piston	Rod	Ring	Pressure	Diff.	Pulling	Off	Diff.	On	
$\varnothing AL$ mm	$\varnothing MM$ mm	φ A_1/A_3	A_1 cm ²	A_2 cm ²	A_3 cm ²	F_1 kN	F_2 kN	F_3 kN	q_{V1} l/min	q_{V2} l/min	q_{V3} l/min	mm
100	56 70	1.46 1.96	78.54	24.63 38.48	53.91 40.06	196.35	61.55 96.20	134.80 100.15	47.1	14.8 23.1	32.3 24.0	3000

Tabla 19. Datos de pistón elegido.[17]

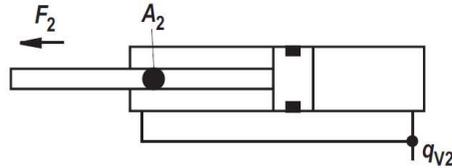


Ilustración 78. Esquema fuerzas pistón. [17]

La serie MF4 cuenta con una base cilíndrica, la cual se soldará al pedestal. En el catálogo se pueden encontrar todas las medidas del cilindro, siendo la longitud total del cilindro:

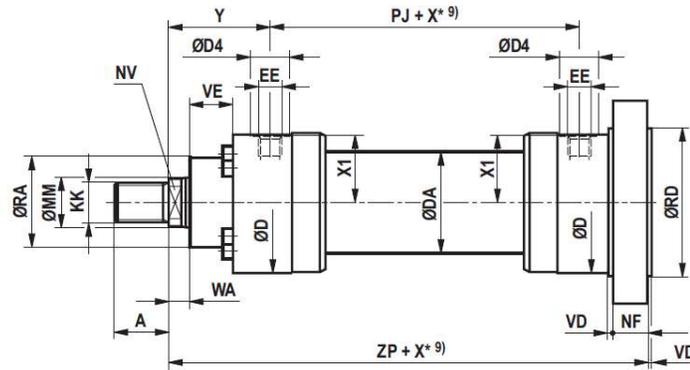


Ilustración 79 Dimensiones pistón[17]

ZP (cilindro 100/70)	375mm
X (carrera)	1348mm
Longitud cilindro ZP+X	1723mm

Tabla 20. Dimensiones pistón.

Conocida esta longitud se puede calcular la longitud del pedestal necesaria. La necesidad de este componente viene de la diferencia en velocidades de subida entre

las poleas y la carga. Dado que las cadena necesitan trabajar siempre a tracción, las poleas (y por tanto el extremo superior del pistón) deben encontrarse por encima de la carga en todo momento. Para que esto sea posible la altura mínima de las poleas debe ser la mitad de carrera de la carga. Además, la posición de recogida de los frames está a 875mm de altura, distancia que también hay que salvar con el pedestal. Su longitud se calcula:

Mitad de carrera de la carga	1348mm
Altura de inicio de carrera	875mm
Altura mínima de poleas H_p (suma de anteriores)	2223mm
Longitud cilindro L_c	1723mm
Longitud pedestal ($H_p - L_c$)	500mm

Tabla 21. Longitud pedestal.

La suma de la carrera del pistón, más su longitud, más el pedestal es 3571mm, que como se indicó en el capítulo de análisis estructural es la máxima altura a la que asciende la carga.

Se puede calcular ahora la **longitud aproximada de la cadena**, que será la altura máxima a la que ascienden las poleas (10 cm por encima del final del pistón), más la cadena dentro de la polea y otros 10 cm hasta la carga, con un total de unos **4m**. Esta medida es aproximada, ya que durante la instalación se usará la rosca de los cáncamos en las que van empalmadas para tensionarlas.

4.3 BASAS Y ANCLAJES A HORMIGÓN

El contacto entre las torres de elevación y el hormigón de la solera de la nave se realiza mediante basas de acero, cuya función es repartir las tensiones entre materiales de resistencias tan distintas: acero S275 (275MPa) para las basas y hormigón HA-25 (25MPa), resistencia 11 veces mayor para el acero)[18].

Se realiza el dimensionado de acuerdo al método CTE-DB-SE-A, indicado en el Código Técnico de Edificación. Este método define un área eficaz en torno al perfil de contacto de la estructura y establece una dimensión c máxima para esa área, la cual se calcula mediante la ecuación 10.

$$c \leq t \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{3 \cdot f_{jd}}}$$

Ecuación 10

Donde t es el espesor de la basa, f_{yd} la resistencia elástica del acero y f_{jd} la resistencia a compresión del hormigón, ambas resistencias minoradas con unos factores especificados. El valor es:

c	55,90 mm
t	25,00 mm
f_{yd} (275 con factor de reducción 1,1)	250,00 MPa
f_{jd} (25 con factor de reducción 1,4)	16,67 MPa

Tabla 22. Valores para cálculo de c .

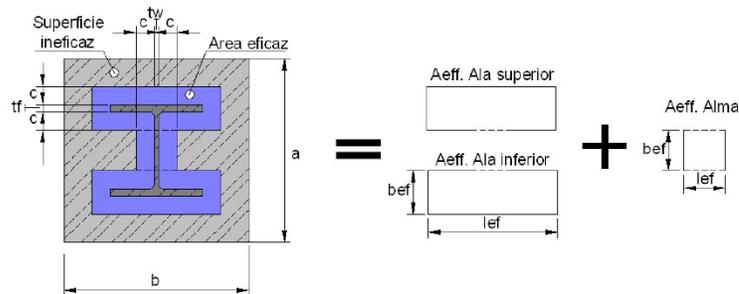


Ilustración 80. Esquema basas[18]

Dado que se van a instalar pernos de anclaje en torno a las basas, el valor mínimo de c será tal que el centro de los pernos se encuentre a una distancia $1,5 \cdot d_0$ de cualquiera de los bordes, siendo d_0 su diámetro. Se necesita por tanto conocer que pernos se van a emplear antes de poder dimensionar las basas.

Los pernos tienen la función principal de fijar en una posición concreta las torres y, además, los colocados en los soportes traseros deberán soportar un esfuerzo de tracción generado por el momento frontal que sufren las guías verticales. Ese momento también se reparte por los apoyos frontales en forma de fuerza de compresión sobre el hormigón.

Existen dos basas delanteras y dos traseras por torre, y para simplificar el problema se toma que las fuerzas solo se aplican en los extremos, aunque realmente están

repartidas por toda la basa. Por equilibrio ambas fuerzas deberán ser de mismo módulo.

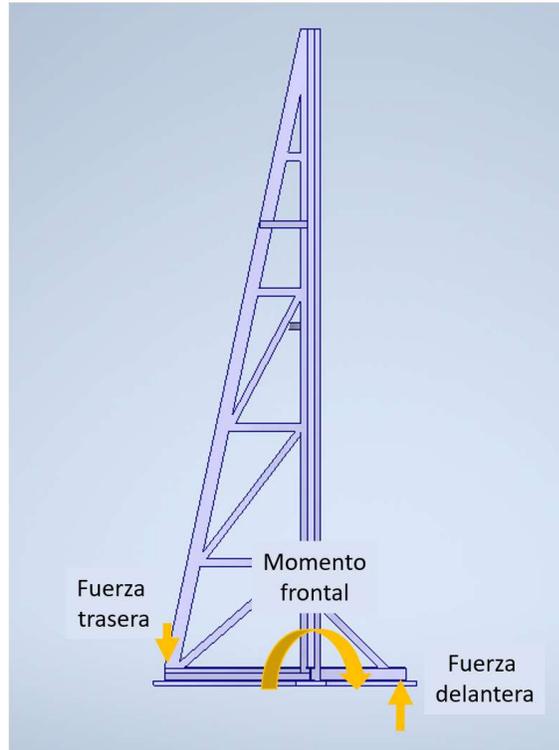


Ilustración 81. Momento sobre base

$$M_{\text{frontal}} = F_{\text{delantera}} * d_{\text{delantera}} + F_{\text{trasera}} * d_{\text{trasera}}$$

$$F_{\text{delantera}} = F_{\text{trasera}}$$

$$M_{\text{frontal}} = F * (d_{\text{delantera}} + d_{\text{trasera}})$$

Ecuación 11

Momento frontal	3.677.559,14	Nmm
Basas	6	
Momento por apoyo	612.926,52	Nmm
Longitud apoyos	1.300,00	mm
$d_{\text{delantera}} + d_{\text{trasera}}$		
Fuerza apoyo (comp y tracc)	471,48	N

Tabla 23. Fuerza sobre apoyos.

Conocidas las fuerzas que deben soportar se procede a elegir los pernos adecuados. El fabricante Spit proporciona en su catálogo un método de cálculo muy exhaustivo

basado en la guía ETAG 001 (European Technical Approval Guidelines). Para el cálculo de resistencia a tracción, estudia tres casos de rotura: rotura por arranque/deslizamiento, rotura del cono de hormigón y rotura del acero. Se calculan las tres resistencias y se compara la menor con el esfuerzo al que van a estar sometidos los pernos, mayorados con un coeficiente de 1,4. [19]

Para la obtención de dichas resistencias se aplican las siguientes fórmulas, cuyos datos están tabulados en función del perno y materiales elegidos:

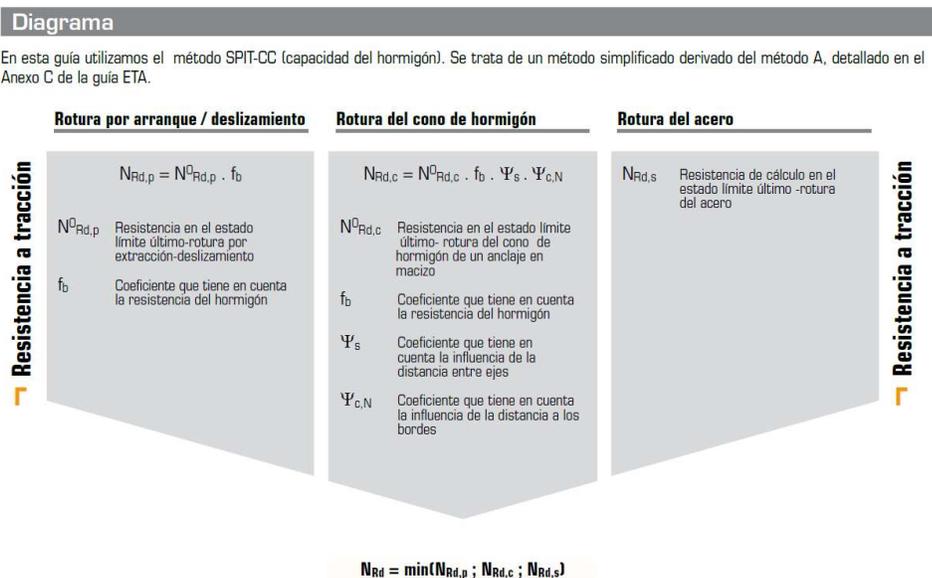


Ilustración 82 Determinación fuerza pernos.[19]

Se elige el modelo **FIX II de métrica M8** ya que es su modelo de perno con menor tamaño y se adapta a las necesidades de este diseño.



Ilustración 83. Perno FIX II. [19]

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Nrd,p	3.630,00 kN
N0Rd,p	3.300,00 kN
fb	1,10
Nrd,c	5.167,80 kN
N0rd,c	5.800,00 kN
fb	1,10

psi s (65mm)	0,81
psi c,N	1,00
Nrd,s	9.300,00 kN

Tabla 24. Resistencia pernos.

SPIT Método CC

TRACCIÓN en kN



Resistencia por arranque / deslizamiento

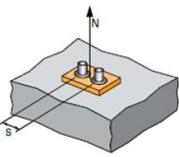
$$N_{Rd,p} = N_{Rd,p} \cdot f_b$$

		Resistencia de diseño por arranque			
Dimensiones	M8	M10	M12	M16	
Profundidad mín. de anclaje	35	42	50	64	
$N_{Rd,p}$ (C20/25)	3,3	5,0	8,9	13,9	
Profundidad máx. de anclaje	48	52	68	86	
$N_{Rd,p}$ (C20/25)	5,0	6,7	11,1	22,2	

$\gamma_{Mc} = 1,8$

SPIT Método CC

Ψ_s INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE EJES DE CARGA A TRA



$$\Psi_s = 0,5 + \frac{s}{6 \cdot h_{ef}}$$

$s_{min} < s < s_{cr,N}$
 $s_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef}$

Ψ_s debe utilizarse para cualquier distancia a los bordes que influya en el grupo de anclajes

DISTANCIA S	Coeficiente de reducción Ψ_s Profundidad mín. de anclaje			
	M8	M10	M12	M16
45	0,71			
65	0,81	0,76		
100	0,96	0,90	0,83	0,76
110	1,00	0,94	0,87	0,79
125		1,00	0,92	0,83
150			1,00	0,89
180				0,97
192				1,00

Resistencia por cono de hormigón

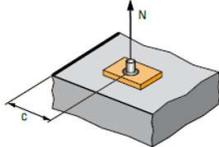


$$N_{Rd,c} = N_{Rd,c} \cdot f_b \cdot \Psi_s \cdot \Psi_{c,N}$$

		Resistencia de diseño por cono de hormigón			
Dimensiones	M8	M10	M12	M16	
Profundidad mín. de anclaje	35	42	50	64	
$N_{Rd,c}$ (C20/25)	5,8	7,6	9,9	14,3	
Profundidad máx. de anclaje	48	52	68	86	
$N_{Rd,c}$ (C20/25)	9,3	10,5	15,7	22,3	

$\gamma_{Mc} = 1,8$

$\Psi_{c,N}$ INFLUENCIA DE LA DISTANCIA A LOS BORDES SOBRE LA CARGA /



$$\Psi_{c,N} = 0,23 + 0,51 \cdot \frac{c}{h_{ef}}$$

$c_{min} < c < c_{cr,N}$
 $c_{cr,N} = 1,5 \cdot h_{ef}$

$\Psi_{c,N}$ debe utilizarse para cualquier distancia a los bordes que influya en el grupo de anclajes.

BORDES C	Coeficiente de reducción $\Psi_{c,N}$ Profundidad mín. de anclaje			
	M8	M10	M12	M16
55	1,00			
65		1,00		
100			1,00	
100				1,00

Resistencia del acero



		Resistencia de diseño del acero a tracción			
Dimensiones	M8	M10	M12	M16	
$V_{Rd,s}$	9,3	16	22	34	

$\gamma_{Ms} = 1,5$

Tabla 25. Datos pernos.[19]

La menor resistencia es la de arranque (3630 kN) y comparada con la fuerza de tracción de 471kN, la cual se divide por dos ya que se instalan dos pernos en el extremo, se ratifica que los pernos elegidos son adecuados. Cabe recordar que los esfuerzos calculados se obtienen de un caso simplificado, por lo que se tiende al lado de la seguridad.

Ahora que se conoce el tamaño de los pernos, la distancia c mínima será:

$$c_{mínima} = 1,5 \cdot d_0 + d_0 + 1,5 \cdot d_0 = 4 \cdot d_0 = 4 \cdot 8 = 32mm$$

Ecuación 12

No se supera la c máxima, por lo que se mantiene coherencia en el proceso de diseño seguido.

El último factor limitante es la resistencia a compresión del hormigón, que debe ser superior al esfuerzo que soporta. Este será el peso de las torres de elevación, despreciándose el efecto de los momentos por ser mucho menores. Se calcula el área de las basas, que al multiplicarlo por la resistencia del hormigón da la fuerza máxima que podría soportar:

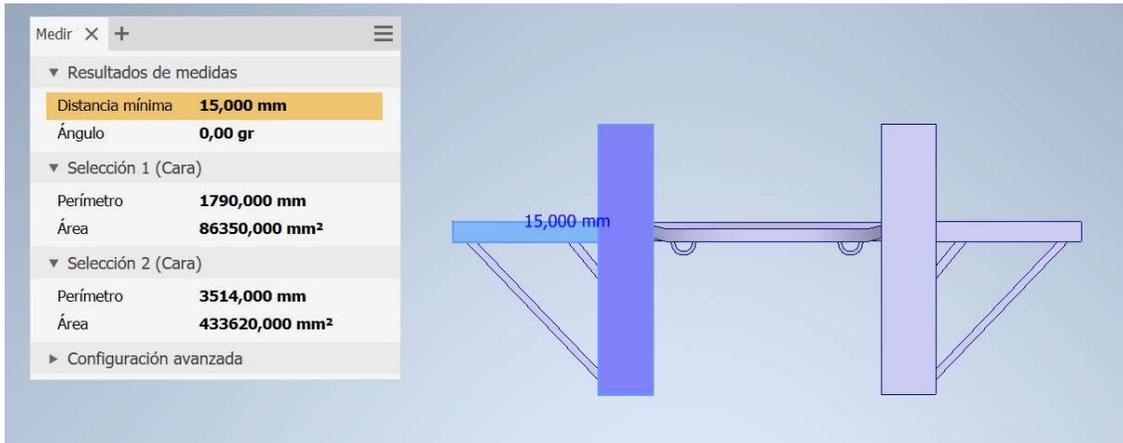


Ilustración 84. Dimensiones basas.

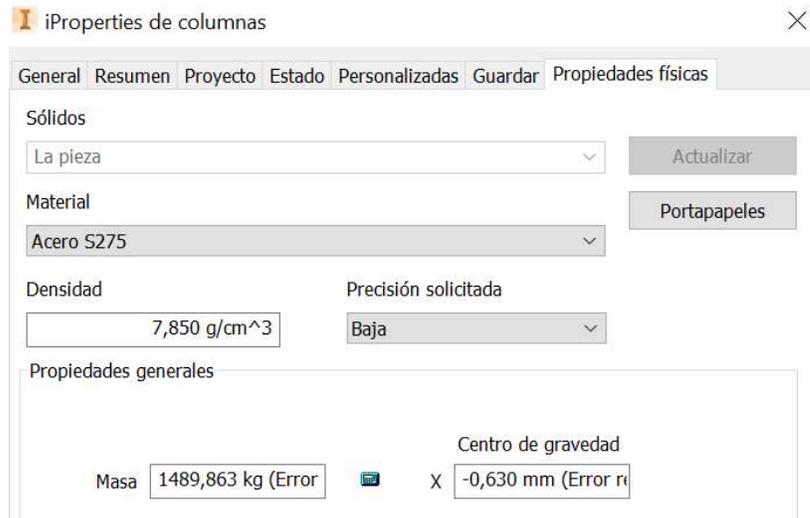


Ilustración 85. Masa estructura.

$$\text{Área apoyo} = 2 * (\text{Área selección 1} + \text{Área selección 2})$$

Ecuación 13

$$\text{Peso estructura} = \text{masa} * 9,8$$

Área de apoyo	1.039.940,00 mm ²
Resistencia del hormigón	25.998.500,00 N
Peso de estructura	14.601,00 N

Tabla 26. Resistencia hormigón bajo basas de torres.

La resistencia del hormigón es mucho mayor, por lo que las basas son adecuadas. Se realiza el mismo cálculo para dimensionar las basas de los cilindros hidráulicos, en las cuales se van a emplear los mismos pernos de anclaje ya que son vendidos en grandes cantidades, por lo que su c mínima es la misma (32mm). El esfuerzo a soportar será la suma de la fuerza que ejerce cada cilindro (se desprecia su peso).

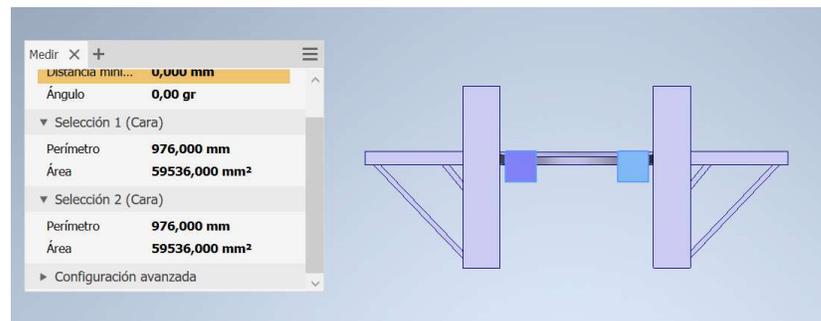


Ilustración 86. Área basas cilindros.

Área de apoyo	119.072,00 mm ²
Resistencia del hormigón	2.976.800,00 N
Esfuerzo	82.472,69 N

Tabla 27. Resistencia hormigón bajo basas de cilindros.

De nuevo la resistencia es varios ordenes de magnitud superior, por lo que esas basas también son aptas.

5 CONCLUSIONES

El nuevo sistema de carga propuesto cumple todos los requisitos y exigencias de la especificación técnica a la que se responde en este trabajo, así como las normativas de aplicación. Su incorporación supondría una mejora considerable en el rendimiento de uso del autoclave y en la seguridad de la operación, con un periodo de amortización dentro de los estándares típicos del sector aeronáutico (menos de dos años).

Durante el proceso de diseño se observó que los coeficientes de seguridad de las torres de elevación son muy superiores a los conseguidos para el frame. Esto podría interpretarse como un sobredimensionamiento innecesario, pero esa gran robustez abre la posibilidad a elevar cargas más desfavorables, otorgando cierta flexibilidad al sistema.

Esta flexibilidad puede ser importante en un futuro. Es común que en una fábrica del sector aeronáutico los programas y piezas a fabricar vayan cambiando, siendo necesario adaptar las naves y reubicar y modificar equipos para poder trabajar con útiles de distintas dimensiones y pesos. Ante esto el sistema propuesto presenta ciertas ventajas:

- La facilidad de montaje y la naturaleza independiente de las torres hace que se puedan desplazar a otras zonas de la fábrica y reorganizar entre sí de distintas formas sin necesidad de realizar obras.
- La robustez de la estructura de las torres antes comentada, así como el gran reparto de fuerzas de las basas sobre la solera de la nave, permite afrontar cargas mayores a la presentadas actualmente, siendo los cilindros y cadenas fácilmente sustituibles por otros de mayor capacidad.
- Las vigas de carga permiten cierto grado de modificación, alargándolas o acortándolas en función de las dimensiones y forma de las posibles nuevas cargas.

Sin embargo, esta flexibilidad de la que se ha dotado al sistema de elevación propuesto solo es válida cuando solo se eleva un tipo de carga con unas dimensiones concretas. Si se deseara elevar varios útiles de dimensiones distintas este sistema no sería apto.

Esto es para el proyectista una gran desventaja de cara al futuro desarrollo de la actividad productiva de la fábrica. Es por ello que se propone reevaluar la posibilidad de modificar la solera, no aceptada en la especificación inicial, ya que eso permitiría instalar railes para crear un sistema móvil.

Un sistema móvil tipo pórtico, comentado anteriormente en este documento, con dos pórticos independientes trabajando en tándem, sería una opción más costosa de implementar en la situación actual de la zona, pero más versátil. Esto se debe a que los puntos de izado en estos sistemas no son fijos, pudiendo ser adaptados fácilmente a cargas de dimensiones bastante diferentes entre una elevación y la siguiente con solo cambiar la distancia entre pórticos. Además, el espacio ocupado dentro de la nave cuando no está siendo operado se reduce considerablemente.

Otra desventaja observada del diseño presentado es el pequeño margen entre los frames y las torres, que aun contando con el sistema de ayuda supondrá una dificultad durante el posicionamiento de los frames vacíos. Un sistema de pórtico sobre raíles también solucionaría este problema.

Como nota final se quiere recordar que la especificación a la que se responde es real, y se ha podido mostrar la solución diseñada a los responsables de la empresa emisora, siendo su respuesta muy positiva.

6 BIBLIOGRAFÍA

6.1 Referencias

- [2] “Tipos De Grúas Pórtico - AICRANE Grúas Pórticos.” [Online]. Available: <https://gruaportico.cl/tipos-de-gruas-portico/>. [Accessed: 28-May-2020].
- [3] “WINKEL Elevador con husillo.” [Online]. Available: <https://www.winkel.de/es/sistemas-de-elevacion/elevador-con-husillo>. [Accessed: 28-May-2020].
- [5] “ANI-M-M10 Cancamo macho - Cancamos - Cable de Acero y Accesorios - Consumibles Diversos - Productos.” [Online]. Available: <https://www.gayner.es/productos/consumibles-diversos/cable-de-acero-y-accesorios/cancamos/ani-m-m10-cancamo-macho.html>. [Accessed: 28-May-2020].
- [6] “Chain and Wire Rope Hoists: Knowing the Differences.” [Online]. Available: <https://www.americancrane.com/chain-and-wire-rope-hoist-differences>. [Accessed: 02-Apr-2020].
- [7] “Barrera fotoeléctrica de seguridad para ambientes industriales severos | Panasonic.” [Online]. Available: <https://www.panasonic-electric-works.com/es/sf4d-barreras-fotoelectricas-de-seguridad.htm>. [Accessed: 28-May-2020].
- [8] “Localización de los filtros en un circuito hidráulico | Aceros y Sistemas Hidráulicos de México S. A. de C. V.” [Online]. Available: <http://www.ashm.mx/blog/localizacion-de-los-filtros-en-un-circuito-hidraulico/>. [Accessed: 28-May-2020].
- [9] L. Ortiz Berrocal, “Elasticidad.” S.A. MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 1998.
- [10] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*. Massachusetts Institute of Technology 1996.
- [13] “Configuración de malla | Inventor | Autodesk Knowledge Network.” [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ESP/Inventor/files/GUID-10291E2B-03E4-4A5E-AB23-BC6083B6538A-htm.html>. [Accessed: 16-Jun-2020].
- [15] Catálogo Industrias YUK S.A. 2015.
- [16] T. R. de Oliveira and N. A. Lemos, “Force and torque of a string on a pulley,” *Am. J. Phys.*, vol. 86, no. 4, pp. 275–279, 2018.
- [17] “Media-Directory | Bosch Rexroth AG.” [Online]. Available: https://www.boschrexroth.com/en/xc/myrexroth/mediadirectory?language=en-GB&publication=NET&filterMediatype=1584&search_query=17332&search_action=submit&edition_enum=re17332. [Accessed: 28-May-2020].
- [18] M. S. D. Rodriguez, “Artículo : Diseño de basas y placas de anclaje en estructura metálica de acuerdo al CTE. Autor : D. Sergio Rodríguez Morales, Arquitecto Técnico, Master en Estructuras de la Edificación por la Universidad Politécnica de

Madrid y la Fundación Escuela de la,” *Artículo*, no. 1, pp. 12–13, 2008.

[19] S. U. Sipit France, “Guía técnica de Fijaciones,” 2016.

6.2 Normativa

[1] Ministerio de la Presidencia de España, “Real Decreto 2177/2004, de 12 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo, en ma,” *Boletín Of. del Estado*, pp. 37486–37489, 2004.

[4] Real Decreto 1829/1995, de 10 de noviembre, por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE EA-95 «Estructuras de acero en edificación». Anejo 2.A1,

[11] “CTE: Documento básico SE-A,” 2008.

[12] AENOR, “Aparatos de elevación, Reglas de cálculo, Parte 2: Solicitaciones y casos de sollicitaciones que deben intervenir en el cálculo de las estructuras y mecanismos, UNE_58132-2,” 2005.

[14] DIRECTIVA 2006/42/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 17 de mayo de 2006 relativa a las máquinas y por la que se modifica la Directiva 95/16/CE.

Documento 2: Presupuesto

En este documento se proporciona una estimación del coste del suministro de tres torres completas de elevación, tres refuerzos de frame, un sistema hidráulico y las seguridades según lo estimado en el Documento 1. No se incluye el coste de transporte ni el coste del sistema de control.

1 Presupuesto parcial primero: Refuerzos frames

Coste de materiales correspondiente a tres refuerzos de frame:

Referencia	Unidades	Descripción	Cantidad	Precio Ud.	TOTAL (€)
TRES REFUERZOS FRAME					
1.1	m	IPE 140 S275	12,9	12,77	164,63

2 Presupuesto parcial segundo: Estructura torres de elevación

Coste de materiales para fabricación de tres estructuras para torres del elevación:

Referencia	Unidades	Descripción	Cantidad	Precio Ud.	TOTAL (€)
ESTRUCTURA TORRE DE ELEVACIÓN					
2.1	m	CF 120 x 3.0	15,4	15,38	236,85
2.2	m	IPE 80 S275	3,4	5,94	40,39
2.3	m	IPN 80 s275	23,1	5,86	135,37
2.4	m	Tubo estructural 40x40x6	350,28	9,8	3.432,74
2.5	m	Tubo estructural 45x45x6	10,12	10,3	208,44
2.6	m	Tubo estructural 120x80x4	0,52	13,8	7,18
2.7	kg	Refuerzo intermedio 1300mm S275	92,00	3	276,00
2.8	m2	Chapa acero 25mm	4	22,4	89,6
2.9	ud	Pernos anclaje SPIT FIX II M8	12	0,16	1,92
					4.428,49
Total tres torres					13.285,48

3 Presupuesto parcial tercero: Vigas de apoyo

Coste de materiales para fabricación de tres vigas de apoyo:

Referencia	Unidades	Descripción	Cantidad	Precio Ud.	TOTAL (€)
VIGA DE APOYO					
3.1	m	HEB 120 S275	2,05	28,64	58,71
3.2	m	Tubo 60x40x8	2,4	24,3	58,32
3.3	m	Macizo cuadrado 100x100 acero S275	0,4	83,17	33,26
3.4	m2	Placa acero platabanda 10mm	0,144	10,2	1,46
3.5	m2	Placa acero 15mm refuerzos	0,06272	13,2	0,82
3.6	m	Tubo acero Ø40,8	0,544	30,06	16,35
3.7	ud	Rodamiento guía Ø114	8	61,5	492
3.8	ud	Rodamiento lateral Ø55	4	33,7	134,8
3.9	ud	Cáncamo M18	8	4,67	37,36
3.10	m	Macizo 60x60 S275	0,644	17,19	11,07
3.11	m	Barra Ø15 S275	0,28	10,3	2,88
					847,063704
Total tres vigas					2541,19

4 Presupuesto parcial cuarto: Sistema hidráulico

Referencia	Unidades	Descripción	Cantidad	Precio Ud.	TOTAL (€)
SISTEMA HIDRAÚLICO					
4.1	ud	BOSCH-REXROTH CHD1 MF4 100/70	6	2000	12000
4.2	ud	Grupo hidráulico	1	3000	2000
4.3	m2	Chapa acero 10mm	1,5	10,2	15,3
4.4	m	HEB 180 S275	3	54,92	164,76
4.5	m	Barra 60x60 S275	0,6	29,95	17,97
4.6	m	Cadena LH0822	48	12,62	605,76
4.7	ud	Tornillo M8x50	24	0,62	14,86
4.8	ud	Polea Ø180	12	46,81	561,72
					15380,37

5 Presupuesto parcial quinto: Seguridades

Referencia	Unidades	Descripción	Cantidad	Precio Ud.	TOTAL (€)
SISTEMAS DE SEGURIDAD					
5.1	ud	barrera fotoeléctrica SICK	4	930	3720
5.2	ud	encoder de de cable	3	41,5	124,5
5.3	uf	sensor fotoeléctrico	2	16,99	33,98

3878,48

6 Presupuesto parcial sexto: Costes de diseño y fabricación

Referencia	Unidades	Descripción	Cantidad	Precio Ud.	TOTAL (€)
COSTES DE FABRICACIÓN					
6.1	h	Diseño de ingeniero	250	45	11250
6.2	h	Montaje e instalación (2 operarios)	240	30	7200
					18450

7 Presupuesto total

La suma de todos los costes, sin tener en cuenta transporte y sistema de control.

SUBTOTAL	53.535,52
Beneficio industrial 5%	2.676,78
TOTAL	56.212,29
Total Iva 21%	68.016,88

Documento 3: Pliego de condiciones técnicas

El presente pliego de condiciones técnicas regula la ejecución de este proyecto para su funcionamiento correcto y seguro tal y como ha sido diseñado. Se recogen los materiales que se deben emplear, las instrucciones a seguir durante la construcción y montaje, el mantenimiento necesario para evitar su deterioro y las condiciones a respetar para su correcto funcionamiento.

1.1. Prescripciones sobre los materiales

Los productos, equipos y sistemas suministrados cumplirán las condiciones que sobre ellos se especifican en los distintos documentos que componen el trabajo. Asimismo, sus calidades serán acordes con las distintas normas que sobre ellos estén publicadas y que tendrán un carácter de complementariedad a este apartado. Tendrán preferencia en cuanto a su aceptabilidad aquellos materiales que estén en posesión de Documento de Idoneidad Técnica que avale sus cualidades, emitido por Organismos Técnicos reconocidos.

Todos los suministros contarán con la garantía de calidad del **mercado CE**, el cual indica:

- Que éste cumple con unas determinadas especificaciones técnicas relacionadas con los requisitos esenciales contenidos en las Normas Armonizadas (EN) y en las Guías DITE (Guías para el Documento de Idoneidad Técnica Europeo).
- Que se ha cumplido el sistema de evaluación y verificación de la constancia de las prestaciones indicado en los mandatos relativos a las normas armonizadas y en las especificaciones técnicas armonizadas.

En cuanto al acero:

- Los aceros empleados serán los indicados en este proyecto, o de propiedades idénticas o superiores, según se recoge en la EAE: Instrucción del acero estructural. Capítulo VI, Materiales.
- Todos los perfiles empleados tendrán las dimensiones y características determinadas en este proyecto, y serán acordes al Real Decreto 1829/1995,

de 10 de noviembre, por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE EA-95 «Estructuras de acero en edificación».

- Las chapas de acero estructural empleadas serán de las dimensiones y características indicadas en este proyecto, siguiendo la normativa europea UNE 36526:1994. Productos de acero laminados en caliente. Perfiles IPE. Medidas.
- Aportación de material en soldadura. Las características mecánicas de los materiales de aportación serán superiores a las del material base. Las calidades de los materiales de aportación ajustadas a la norma UNE-EN ISO 14555:1999 se consideran aceptables.

1.2.Montaje e instalación

El montaje de los distintos componentes del sistema de elevación se realizará de la siguiente forma:

- Todas las piezas serán cortadas y preparadas en las instalaciones del fabricante.
- Las guías de elevación, las celosías, apoyos, basas, vigas de elevación y pedestales serán construidas y ensambladas de forma independiente en las instalaciones del fabricante, a excepción de los perfiles cuadrados que unen las guías por la parte superior y las torres entre ellas, los cuales serán preparados, pero no montados aún.

Los materiales preparados se transportarán a la planta para su instalación siguiendo las indicaciones:

- Se deberán instalar las torres de elevación en la posición exacta indicada por los planos, la cual asegura que no se obstaculiza el paso de AGVs y un correcto apoyo de los frames sobre las vigas.
- La colocación de los pernos de anclaje se hará conforme a las indicaciones del fabricante.
- Una vez colocadas las torres en sus posiciones y aseguradas, se unirán entre ellas mediante los refuerzos de perfil rectangular. Además, se introducirán

los rodamientos de las vigas de apoyo por el interior de las guías y se instalarán los perfiles de cerramiento superiores.

- Después de esto se podrán instalar el sistema hidráulico, cadenas y sistemas de control varios.

1.3. Condiciones de uso

El sistema ha sido diseñado para ser empleado bajo las siguientes condiciones:

- Carga máxima de 183.260 N, repartida uniformemente entre las tres torres de elevación.
- Carga de dimensiones idénticas a las del frame: 12758mm x 3802 mm
- Altura máxima de elevación de 3570mm
- Movimientos suaves y velocidades de elevación muy reducidas
- Ninguna persona o cuerpo extraño debe estar

1.4. Mantenimiento

Es necesario un mantenimiento preventivo rutinario del sistema para alargar su correcto y seguro funcionamiento, alargándose además la vida útil de las distintas piezas y reduciendo la necesidad de realizar acciones correctivas costosas.

Antes de cada uso:

El/los operarios que emplean el sistema de elevación deben realizar las siguientes comprobaciones visuales antes de elevaciones:

- Deformación de la estructura metálica, golpes o fisuras.
- Deformación en el sistema de los cilindros.
- Identificar posibles cuerpos extraños dentro de las guías.
- Escuchar ruidos que indiquen un posible desgaste de las guías o mala lubricación.

Ante cualquier incidencia el operario detendrá la operación e informará al personal de mantenimiento.

Partes móviles:

- Cada 3 meses (operario de mantenimiento): comprobación del estado de rodamientos de todos los componentes.

- Cada 3 meses (operario de mantenimiento): comprobación de los niveles de lubricante en las guías.

Estructura metálica:

- Una vez al año (operario de mantenimiento): Deberá inspeccionar visualmente fisuras y humedades que puedan deteriorar la estructura metálica.
- Una vez al año (profesional cualificado): Dará una protección a la estructura metálica con antioxidantes y esmaltes o similares, en las zonas deterioradas.

Sistema hidráulico

- Una vez al año (profesional cualificado): Revisión y subsanación de los problemas que surjan en el sistema hidráulico al menos en los siguientes elementos:
 - Circuito hidráulico
 - Puertas de acceso y su enclavamiento
 - Circuitos eléctricos de seguridad, señalización y maniobras que afectan a la seguridad
 - Topes elásticos y amortiguadores
 - Alarma y parada de emergencia
 - Grupo tractor
- El mantenimiento e inspección de los cilindros será periódico, según los plazos indicados por el fabricante y será realizado por uno de sus técnicos.