



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNA GRÚA APILADORA DE CONTENEDORES SOBRE RAÍLES EN EL PUERTO DE BARCELONA

AUTOR: MARC PASCUAL GOMAR

TUTOR: JOSÉ MIGUEL MOLINES CANO

COTUTOR: ANTONIO JOSÉ JIMÉNEZ MOCHOLÍ

Curso Académico: 2020-21

RESUMEN

El objeto del presente proyecto es el diseño y el cálculo de la estructura de una grúa apiladora de contenedores sobre raíles. Se trata de una grúa pensada para el transporte de contenedores de hasta 40 toneladas. Su finalidad es tanto facilitar la distribución y el almacenamiento de los contenedores en el puerto como descargar y cargar los mismos en camiones y en ferrocarriles.

El conjunto se compone de una estructura espacial cuyo elemento principal es una cercha tridimensional de 66,5 m apoyada lateralmente en dos subestructuras porticadas perpendiculares al plano de la cercha. La distancia entre los apoyos de los pórticos es de 30 m, la altura de la estructura es de 23 m, y consta de dos voladizos en los laterales de 12 y 15,5 m.

Se aplica la normativa del Código Técnico de la Edificación y de Grúas y Aparatos de Elevación. El proyecto incluye la documentación gráfica que define la solución adoptada y una valoración económica del coste del proyecto.

En este proyecto se aplican conocimientos adquiridos en asignaturas como Tecnología de la Construcción, Estructuras, Expresión gráfica o Proyectos del grado en Tecnologías Industriales y se desarrollan competencias del mismo.

Palabras clave: Diseño estructural, cálculo estructural, estructura metálica, grúa apiladora.

RESUM

L'objecte del present projecte és el disseny i el càlcul de l'estructura d'una grua apiladora de contenidors sobre rails. Es tracta d'una grua pensada per al transport de contenidors fins a 40 tones. La seua finalitat és tant facilitar la distribució i l'emmagatzematge dels contenidors en el port com descarregar i carregar-los en camions i en ferrocarrils.

El conjunt es compon d'una estructura espacial amb una encavallada tridimensional de 66,6 m com a element principal. Aquest, està recolzat lateralment en dues subestructures porticades perpendiculars al pla de l'encavallada. La distància entre recolzaments es de 30 m, l'altura de l'estructura es de 23 m i consta de dos voladissos als laterals de 12 i 15,5 m.

S'aplica la normativa del Codi Tècnic de l'Edificació o de Grues i Aparells d'Elevació. El projecte inclou la documentació gràfica que defineix la solució adoptada i una valoració econòmica del cost del projecte.

En aquest projecte s'apliquen coneixements adquirits en assignatures com Tecnologia de la Construcció, Estructures, Expressió Gràfica o Projectes del grau en Tecnologies Industrials i es desenvolupen competències del mateix.

Paraules clau: Disseny estructural, càlcul estructural, estructura metàl·lica.

ABSTRACT

The present project's object is to design and calculate the structure of a rail-mounted container stacking crane. It is a crane designed to transport containers up to 40 tons. Its purpose is both to facilitate the distribution and the storage of containers in the port and to load and unload them on trucks and railways.

It is a spatial structure whose main element is a 66,5 m three-dimensional truss laterally supported on two porticoed substructures placed perpendicular to the truss' plane. The distance between the supports is 30 m, the structure is 23 m high, and it has two cantilevers of 12 and 15,5 m.

The regulations of Technical Code and Cranes and Lifting Devices apply. The project includes graphic documentation which defines the solution adopted and an economic valuation of the project's cost.

In this project knowledge acquired in subjects such as Construction Technology, Structures, Graphic Expression or Projects of the Degree in Industrial Technology are applied, and skills developed on that degree are used too.

Key words: Structural design, structural calculation, metallic structure, stacker crane.

INDICE DE LA MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	12
	Antecedentes	12
1.1	Objetivo del proyecto.....	12
1.2	Justificación.	12
1.3	Motivación del proyecto.	12
	Estado del arte.....	13
1.4	Distribución y almacenamiento en una terminal marítima de contenedores.	13
1.5	Tipos de grúas utilizadas principalmente en una terminal marítima de contenedores.	14
1.6	Diseño elegido para la grúa objeto de estudio.	16
1.7	Ubicación del proyecto.....	17
1.8	Normativa aplicada.	18
2.	CÁLCULO ESTRUCTURAL.....	19
2.1	Materiales empleados.....	19
2.2	Perfiles Utilizados.	19
	2.2.1 Viga de Celosía.....	19
	2.2.2 Pórticos.....	20
2.3	Clasificación de la grúa.	20
2.4	Acciones.....	21
	2.4.1 Solicitaciones principales.	22
	2.4.2 Solicitaciones debidas a movimientos verticales.	23
	2.4.3 Solicitaciones debidas a movimientos horizontales (S_H).....	24
	2.4.3.1 Cargas de oblicuidad en las ruedas (S_{HO}).....	24
	2.4.3.2 Cargas debidas al efecto de choques (S_T).....	29
	2.4.3.3 Cargas debidas al movimiento horizontal de la estructura (S_{HT}).....	29
	2.4.3.4 Cargas debidas al movimiento horizontal del carro (S_{HC}).....	31
	2.4.4 Solicitaciones debidas al viento (S_w).....	32
	2.4.4.1 Viento en servicio sobre la estructura.....	34
	2.4.4.1.1 Viento sobre la viga.	36

2.4.4.1.2	Viento sobre el pórtico 1.....	38
2.4.4.1.2	Viento sobre el pórtico 2.....	39
2.4.4.2	Viento sobre la carga móvil en servicio.....	40
2.4.4.1	Viento fuera de servicio sobre la estructura (S_{Wmax}).....	41
2.5	Combinaciones de acciones.....	43
2.5.1	Estados Límite de Servicio (ELS).....	43
2.5.2	Estados Límite Últimos.....	43
2.6	Comprobaciones.....	49
2.6.1	Procedimiento de cálculo.....	49
2.6.2	Estados Límite Últimos.....	51
2.6.2.1	Estado Límite Último de Resistencia.....	52
2.6.2.1	Estado Límite Último de Pandeo.....	56
2.6.2	Estados Límite de Servicio.....	63
2.7	Reducción de Secciones.....	64
2.7.1	Diseño definitivo.....	65
2.7.2	Comprobación de Estados Límite.....	66
2.7.2.1	Estados Límite Últimos.....	66
2.7.2.2	Estados Límite de Servicio.....	69
2.7.3	Ahorro de material.....	70
3.	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	72
4.	BIBLIOGRAFÍA.....	73
5.	PRESUPUESTO.....	76
5.1	Presupuestos parciales.....	76
5.2	Presupuesto de inversión.....	81
6.	PLANOS.....	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Propiedades acero S275JR.....	19
Tabla 2-2 Solicitaciones debidas a movimientos verticales.	24
Tabla 2-3 Solicitaciones debidas a oblicuidad de las ruedas.....	27
Tabla 2-4 Solicitaciones debidas a oblicuidad derecha.	28
Tabla 2-5 Solicitaciones debidas a oblicuidad izquierda.	28
Tabla 2-6 Solicitaciones debidas a la translación de la grúa.	31
Tabla 2-7 Cargas debidas a la traslación del carro.	31
Tabla 2-8 Solicitaciones debidas al viento frontal.....	37
Tabla 2-9 Solicitaciones debidas al viento lateral.	38
Tabla 2-10 Solicitaciones debidas al viento frontal en el pórtico 1.....	38
Tabla 2-11 Solicitaciones debidas al viento lateral en el pórtico 1.	39
Tabla 2-12 Solicitaciones debidas al viento frontal en el pórtico 2.....	40
Tabla 2-13 Solicitaciones debidas el viento lateral en el pórtico 2.	40
Tabla 2-14 Solicitaciones debidas a viento máximo frontal sobre la viga.....	41
Tabla 2-15 Solicitaciones debidas el viento máximo lateral sobre la viga.	41
Tabla 2-16 Solicitaciones debidas al viento máximo frontal sobre el pórtico 1.....	42
Tabla 2-17 Solicitaciones debidas al viento máximo lateral sobre el pórtico 1.	42
Tabla 2-18 Solicitaciones debidas al viento máximo frontal sobre el pórtico 2.....	42
Tabla 2-19 Solicitaciones debidas el viento máximo lateral sobre el pórtico 2.	43
Tabla 2-20 Combinaciones de cálculo y coeficientes de mayoración para ELU.....	45
Tabla 2-21 Leyenda de la tabla 2-20	45
Tabla 2-22 Combinaciones de cálculo numeradas.....	48
Tabla 2-23 Valores de esfuerzos para las secciones más desfavorables extraídos de SAP2000.....	53
Tabla 2-24 Cálculo de tensiones normales y tangenciales.....	54
Tabla 2-25 Comprobación ELU Resistencia en las barras más solicitadas.	54
Tabla 2-26 Cálculo de tensiones normales y tangenciales después del cambio de secciones.	55
Tabla 2-27 Comprobación ELU Resistencia en las barras más solicitadas después del cambio de secciones.	55
Tabla 2-28 Comprobación pandeo. Cálculo esbelteces. Plano pórtico.....	60

Tabla 2-29 Comprobación pandeo. Cálculo del coeficiente de pandeo y k_y . Plano pórtico.	61
Tabla 2-30 Comprobación pandeo. Cálculo esbelteces. Plano perpendicular al pórtico.....	61
Tabla 2-31 Comprobación pandeo. Cálculo del coeficiente de pandeo y k_y . Plano perpendicular al pórtico.	62
Tabla 2-32 Comprobación final a pandeo.	62
Tabla 2-33 Comprobación ELS flecha vertical.	63
Tabla 2-34 Comprobación ELS flecha horizontal U1	64
Tabla 2-35 Comprobación ELS flecha horizontal U2	64
Tabla 2-36 Cálculo de tensiones normales y tangenciales en las barras más desfavorables después de reducir perfiles.	66
Tabla 2-37 Comprobación ELU Resistencia en las barras más desfavorables después de reducir perfiles.	66
Tabla 2-38 Comprobación pandeo con reducción de perfiles. Cálculo esbelteces. Plano pórtico.	67
Tabla 2-39 Comprobación pandeo después de reducir perfiles. Cálculo del coeficiente de pandeo y k_y . Plano pórtico.	67
Tabla 2-40 Comprobación pandeo con reducción de perfiles. Cálculo esbelteces. Plano perpendicular al pórtico.	68
Tabla 2-41 Comprobación pandeo después de reducir perfiles. Cálculo del coeficiente de pandeo y k_y . Plano perpendicular al pórtico.....	68
Tabla 2-42 Comprobación final a pandeo con reducción de perfiles.....	69
Tabla 2-43 Comprobación final ELS flecha vertical	69
Tabla 2-44 Comprobación final flecha horizontal U1.....	70
Tabla 2-45 Comprobación final flecha horizontal U2.....	70
Tabla 2-46 Total de acero necesario para la primera estimación de la grúa.	71
Tabla 2-47 Total de acero necesario para el diseño final de la grúa.....	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Subsistemas en una terminal portuaria de contenedores.....	14
Figura 1-2 Diseño de la grúa en SAP2000.....	17
Figura 2-1 Clases de utilización de aparatos. (Fuente: UNE 58-112-91, Tabla 1).....	20
Figura 2-2 Coeficiente nominal del espectro de carga para los aparatos. (Fuente: UNE 58-112-91, Tabla 2).....	21
Figura 2-3 Grupos de clasificación del aparato completo. (Fuente: UNE 58-112-91, Tabla 3).	21
Figura 2-4 Aplicación cargas principales.	22
Figura 2-5 Valores de $\Psi=f(V_L)$. (Fuente: UNE 58-132-2, Fig. 1)	23
Figura 2-6 Diferentes combinaciones de pares de ruedas. (Fuente: UNE 58-132-2, Fig. 3).	24
Figura 2-7 Posiciones de los pares de ruedas. (Fuente: UNE 58-132-2, Fig. 4).....	25
Figura 2-8 Cargas actuantes sobre el aparato de elevación en posición oblicua. (Fuente UNE 58-132-2, Fig. 6).	26
Figura 2-9 Valores de v_{1i} y v_{2i} . (Fuente: UNE 58-132-2, Tabla 1)	28
Figura 2-10 Aplicación cargas de oblicuidad.	29
Figura 2-11 Pesos, acciones de rueda y factor w de resistencia por fricción. (Fuente: UNE 76-201, Tabla A-2).	30
Figura 2-12 Valores medios de aceleraciones y deceleraciones. (Fuente: UNE 76-201-88, Tabla 6). ...	30
Figura 2-13 Aplicación cargas de inercia debidas a la translación de la grúa.	31
Figura 2-14 Aplicación de solicitaciones debidas a inercia por translación del carro.....	32
Figura 2-15 Secciones iniciales de la viga en forma de Celosía.....	32
Figura 2-16 Secciones iniciales pórtico 1 acotadas.	33
Figura 2-17 Secciones iniciales pórtico 2 acotadas.	33
Figura 2-18 Velocidades y presiones del viento en servicio (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla I).....	34
Figura 2-19 Coeficiente de forma (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla II).....	35
Figura 2-20 Coeficiente aerodinámico y proporciones de la sección (Fuente: UNE 58-113.85, Fig. 1). 35	
Figura 2-21 Aplicación solicitaciones debidas al viento.	36
Figura 2-22 Coeficiente por efecto pantalla. (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla III).	36
Figura 2-23 Coeficiente de superficie neta. (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla III-a).....	37
Figura 2-24 Coeficiente de separación. (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla III-b).....	37

Figura 2-25 Secciones numeradas para aplicación del viento. Pórtico 1.....	38
Figura 2-26 Secciones numeradas para aplicación del viento. Pórtico 2.....	39
Figura 2-27 Presiones fuera de servicio. (Fuente: UNE 58-132-2, Tabla 2).....	41
Figura 2-28 Coeficiente de mayoración combinaciones (Fuente: UNE 58-132-2, Tabla 3).	44
Figura 2-29 Modelado de la grúa en SAP200 50	50
Figura 2-30 Clasificación de secciones transversales solicitadas por momentos flectores (Fuente CTE DB-SE-A, Tabla 5.1).....	51
Figura 2-31 Curva de pandeo en función de la sección transversal. (Fuente: CTE DB-SE-A, Tabla 6.2).	58
Figura 2-32 Valores del coeficiente de pandeo. (Fuente: CTE DB-SE-A, Tabla 6.3).	58
Figura 2-33 Términos de comprobación, según peor clase de sección en la pieza (Fuente: CTE DB-SE-A, Tabla 6.8).....	59
Figura 2-34 Coeficientes de interacción según peor clase de sección en la pieza (Fuente: CTE DB-SE-A, Tabla 6.9).....	60
Figura 2-35 Modelado de la grúa definitiva en SAP2000	65

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1-1 Carretilla pórtico. (Fuente: portterms.wordpress.com. 18/04/21).....	15
Imagen 1-2 Grúas pórtico. (Fuente: www.pikist.com 18/04/21).....	15
Imagen 1-3 Grúa RTG. (Fuente: ellsengruaportico.es 18/04/21).....	15
Imagen 1-4 Reach Stacker Crane (Fuente: www.gruasyaparejos.com 18/04/21).....	15
Imagen 1-5 Reach Stacker Crane (Fuente: www.gruasyaparejos.com 18/04/21).....	16
Imagen 1-6 Sidelifter Crane. (Fuente: www.gruasyaparejos.com 18/04/21).....	16
Imagen 1-7 Ubicación y recorrido de la grúa a calcular. (Fuente: Google.es/maps 10/04/21).....	18

MEMORIA

DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNA GRÚA APILADORA DE CONTENEDORES SOBRE RAÍLES EN EL
PUERTO DE BARCELONA.

1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes

1.1 Objetivo del proyecto.

El objeto del presente proyecto es el diseño y el cálculo de la estructura de una grúa apiladora de contenedores sobre raíles que será utilizada en la terminal APM de Barcelona. Dicha grúa, será de utilidad tanto para cargar y descargar contenedores en ferrocarriles y en camiones como para facilitar y agilizar el almacenamiento de estos en la terminal.

1.2 Justificación.

Este proyecto pone en práctica conocimientos adquiridos a lo largo de todo el grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales.

Principalmente, se utilizan aptitudes desarrolladas en asignaturas como Elasticidad y Resistencia de Materiales, Estructuras y Tecnología de la Construcción para el cálculo de la estructura, Expresión Gráfica e Ingeniería Gráfica para el diseño de la estructura y la elaboración de los planos, así como Proyectos para la realización del presupuesto.

Para la realización de los planos se ha utilizado el software AutoCAD de Autodesk, para el cálculo de la estructura el software SAP2000 y la elaboración del presupuesto se ha realizado con Arquímedes.

1.3 Motivación del proyecto.

Gracias a asignaturas cursadas relacionadas con la construcción, he podido ampliar el conocimiento en este sector, por el cual siempre he tenido interés. Es por ello que decidí desarrollar el proyecto en este ámbito de la ingeniería.

La Terminal APM de Barcelona ha sufrido un notable crecimiento en los últimos años. Concretamente el mercado de los contenedores “reefer” (transporte de mercancías sensibles a las temperaturas del entorno), es el sector que se ha visto más favorecido. Por esta razón, en 2019 la terminal catalana aumentó en un 31% su capacidad “reefer” y desde entonces, el tráfico tanto marítimo como ferroviario no ha hecho más que aumentar. Se ha llegado al punto de que en los

últimos meses de 2020 ha habido mercados como el de la fruta que se han visto incrementados en más de un 200% respecto al año anterior.

Debido a lo recién comentado, el principal objetivo de este proyecto es dar respuesta al constante crecimiento del transporte de contenedores en la terminal APM de Barcelona incorporando otra grúa apiladora más, para acabar de complementar a las dos que existen actualmente.

Estado del arte

1.4 Distribución y almacenamiento en una terminal marítima de contenedores.

En una terminal marítima de contenedores se pueden distinguir cuatro zonas o subsistemas diferentes (Figura 1-1):

- Subsistema de carga y descarga: Zona junto a los muelles donde se llevan a cabo las operaciones de carga y descarga de contenedores en buques.
- Subsistema de almacenamiento: Gran superficie donde se almacenan temporalmente los contenedores que posteriormente serán cargados en buques o trenes.
- Subsistema de recepción y entrega: Zona donde se cargan y descargan contenedores en medios de transporte terrestres (camiones y trenes).
- Subsistema de transporte interno: Comprende el transporte de contenedores entre la zona de almacenamiento y el resto de los subsistemas.

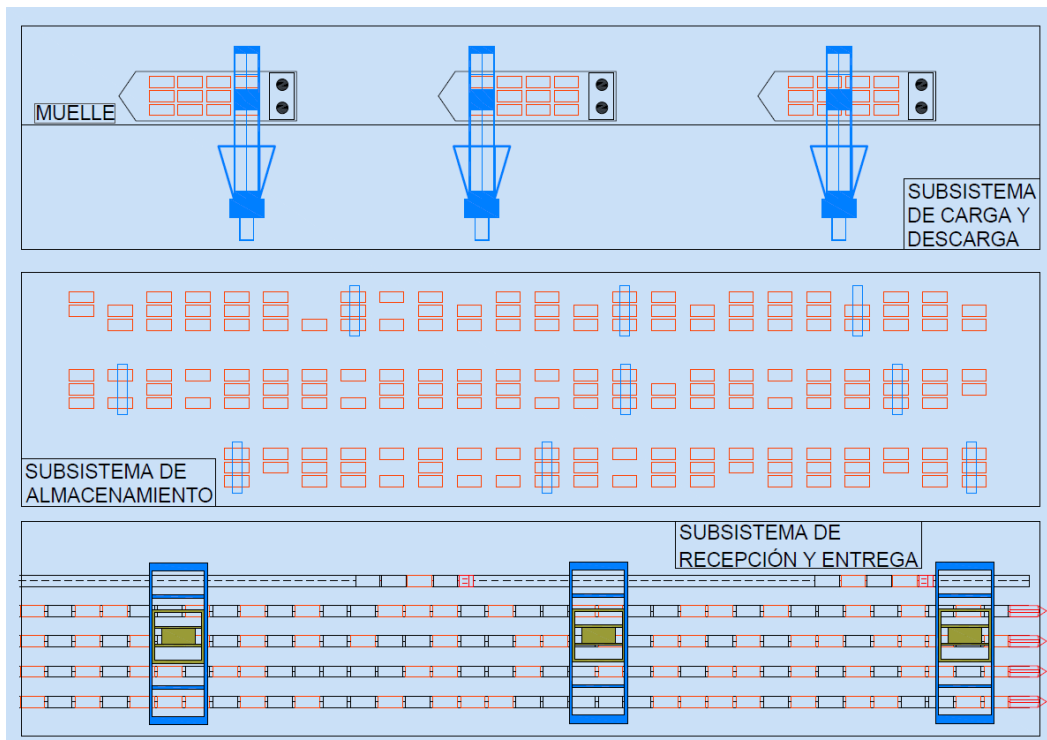


Figura 1-1 Subsistemas en una terminal portuaria de contenedores.

1.5 Tipos de grúas utilizadas principalmente en una terminal marítima de contenedores.

En las terminales portuarias de contenedores se utilizan multitud de grúas y aparatos dependiendo de las necesidades específicas de cada una. Entre muchos otros, los tipos de grúas más utilizados y que más se repiten en todas las terminales son los siguientes:

- **Carretilla pórtico (Straddle Carrier):** Estructura en forma de pórtico montada sobre neumáticos con un sistema de levantamiento que eleva contenedores hasta 4 alturas. Estas grúas actúan principalmente en la zona de almacenamiento (Imagen 1-1).
- **Grúas pórtico:** Situada en el primer subsistema. Es la más grande y se mueve a través del muelle con neumáticos o a través de raíles. Su utilidad es cargar y descargar contenedores de los buques (Imagen 1-2).



Imagen 1-1 Carretilla pórtico. (Fuente: portterms.wordpress.com. 18/04/21)



Imagen 1-2 Grúas pórtico. (Fuente: www.pikist.com 18/04/21)

- **Grúas apiladoras:** Grúas que manipulan los contenedores mediante un montacargas instalado en una viga. Trabajan tanto en la zona de almacenamiento como en el subsistema de recepción y entrega, cargando y descargando contenedores de camiones y trenes.

Este tipo de grúas se dividen en dos subgrupos. Las grúas RTG (Rubber tired gantry crane) (Imagen 1-3) que se desplazan sobre neumáticos, y las RMG (Rail mounted gantry crane) (Imagen 1-4) que están montadas sobre raíles. El objeto de estudio de este proyecto será una grúa de tipo RMG.



Imagen 1-3 Grúa RTG. (Fuente: ellenguaportico.es 18/04/21)

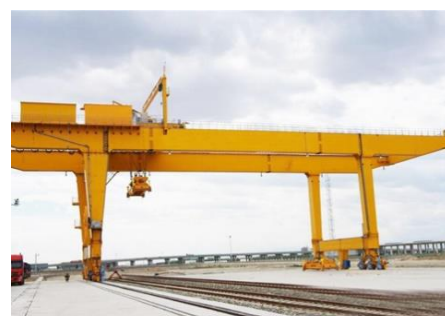


Imagen 1-4 Grúa RMG. (Fuente: ellenguaportico.es 18/04/21)

- Equipo para el transporte interno de contenedores:
 - Reach Stacker: Utilizadas para el transporte rápido de contenedores en distancias medias y cortas (Imagen 1-5)
 - Sidelifter: Se trata de un camión grúa con un elevador lateral. Además de utilizarse en el subsistema de transporte también es útil en la carga y descarga de ferrocarriles (Imagen 1-6).



Imagen 1-5 Reach Stacker Crane (Fuente: www.gruasyaparejos.com 18/04/21)



Imagen 1-6 Sidelifter Crane. (Fuente: www.gruasyaparejos.com 18/04/21).

1.6 Diseño elegido para la grúa objeto de estudio.

La grúa a diseñar se pretende utilizar en el subsistema de recepción y entrega donde ya existen dos grúas de tipo RMG (sobre raíles). En este caso, lo que se busca es una tercera grúa que agilice la carga y descarga de contenedores en medios terrestres.

Es por esta razón por la que se ha optado por una viga en forma de celosía, resultando así un diseño más ligero que el de las grúas ya existentes. Además, este tipo de viga permite reducir notablemente la superficie expuesta al viento.

Sin embargo, los apoyos de la viga principal serán dos estructuras porticadas que no serán de celosía, sino que estarán formadas de perfiles metálicos rectangulares. Uno de los apoyos tendrá la forma convencional de un pórtico, y el otro estará formado por dos apoyos que se dividirán cada uno de ellos en dos barras formando un ángulo de 36° entre ellas, y que estarán unidas en lo más alto del pórtico. De esta manera se consigue aumentar la carga nominal que la grúa es capaz de soportar.

Por el emplazamiento elegido, la grúa debe ser capaz de salvar una distancia de 30 metros entre apoyos, que se corresponde con las 6 vías de tren que existen. Además, es necesaria la

incorporación de dos voladizos para poder cargar camiones en dicho espacio y para poder coger y depositar contenedores al cargar y descargar los trenes.

Con el alcance descrito, será posible realizar las operaciones de carga y descarga a la perfección, contribuir a la organización de los contenedores e incluso, reducir el recorrido de la maquinaria del subsistema de transporte interno, con la ganancia de tiempo que esto conlleva.

A continuación, se adjunta la grúa modelada en el software SAP2000 (Figura 1-2):

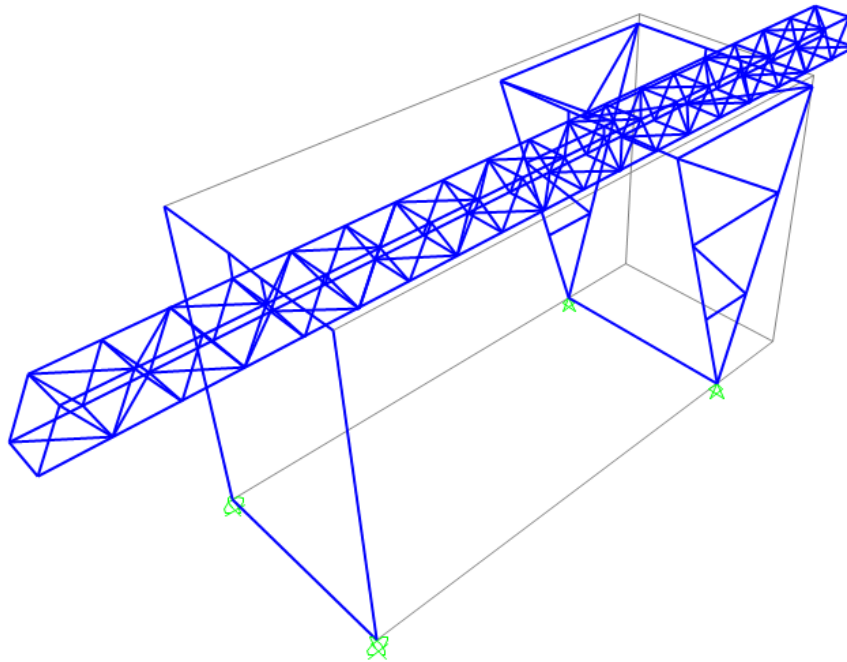


Figura 1-2 Diseño de la grúa en SAP2000

1.7 Ubicación del proyecto.

Como ya se ha comentado, el proyecto se sitúa en la terminal de contenedores del Muelle Sur del Puerto de Barcelona, que es propiedad de APM Terminals. Está situada en la costa mediterránea de Catalunya, en Barcelona.

Concretamente se situará en el sistema de recepción y entrega por medio terrestre y actuará entre las dos grúas ya existentes con el fin de tener un mayor recorrido, ya que será la más ligera y rápida de las tres.

En la imagen que se muestra a continuación (Imagen 1-7), se pueden ver las vías de tren que debe salvar la luz de la grúa. También se aprecian distintos contenedores fuera de las vías a los que debe ser capaz de llegar el voladizo de la estructura.

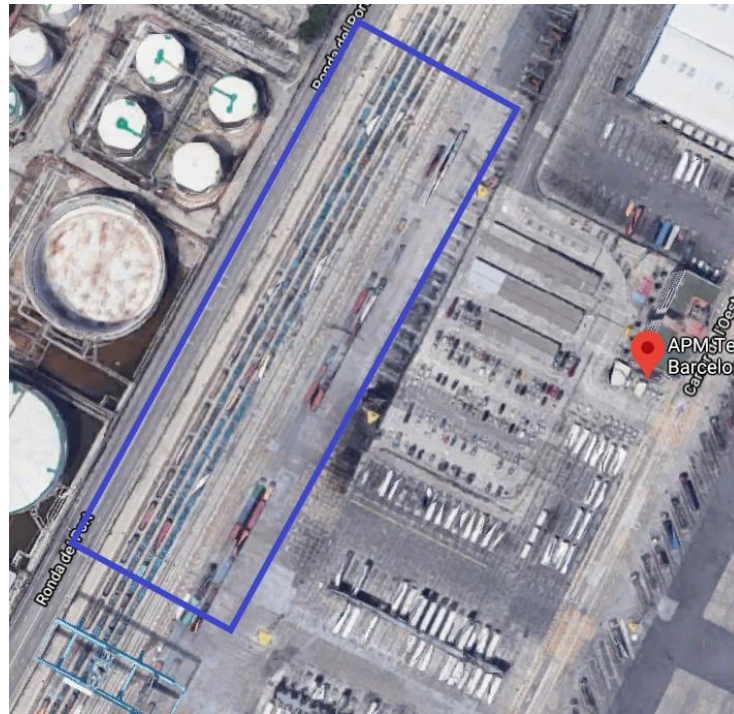


Imagen 1-7 Ubicación y recorrido de la grúa a calcular. (Fuente: Google.es/maps 10/04/21)

1.8 Normativa aplicada.

La normativa aplicada para realizar el presente proyecto ha sido la siguiente:

- Grúas y aparatos de elevación UNE 58-112-91:
 - Parte 1: General.
 - Parte 2: Grúas puente y pórtico.
- Grúas acción del viento UNE 58-113-85.
- Aparatos de elevación UNE 58-132-2: Reglas de Cálculo.
 - Parte 2: Solicitaciones y casos de solicitaciones que deben intervenir en el cálculo de las estructuras y los mecanismos.
- Construcciones metálicas UNE 76-201-88: Caminos de rodadura de puentes grúa. Bases de cálculo.
- Código Técnico de la Edificación y sus documentos básicos: DB-SE y DB-SE-A.

2. CÁLCULO ESTRUCTURAL.

2.1 Materiales empleados.

El material empleado para la construcción de la grúa será el acero S275JR, cuyas propiedades se resumen en la tabla 2-1:

Propiedades Acero S275JR		
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad (E)	210000	N/mm ²
Módulo de Rigidez (G)	81000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3	-
Límite elástico (fy)	275	N/mm ²
Coefficiente de dilatación térmica (α)	1,2 x 10 ⁵	(°C) ⁻¹
Densidad (ρ)	7850	Kg/m ³

Tabla 2-1 Propiedades acero S275JR

2.2 Perfiles Utilizados.

En este apartado se presentan los tipos de perfiles que se van a utilizar en cada una de las partes del aparato. Más adelante, se hará una estimación del tamaño de estos perfiles para poder calcular las cargas de viento con la posibilidad de ser modificados si el cálculo lo requiere.

2.2.1 Viga de Celosía.

Para la viga, se ha optado por utilizar perfiles huecos de sección cuadrada SHS (Square Hollow Section), ya que estos serán mucho más sencillos de unir que los CHS (Circular Hollow Section).

Además, los perfiles SHS también serán más adecuados para un correcto desplazamiento del carro a través de ellos.

2.2.2 Pórticos.

En el caso de los pórticos, se van a utilizar perfiles tipo viga cajón. Se trata de vigas formadas por un perfil armado a base de chapas soldadas.

Este tipo de perfil es muy utilizado en grúas pórtico ya que se consiguen alcanzar grandes cargas de elevación y también salvar grandes luces. Habitualmente son de forma rectangular hueca y se puede conseguir cualquier sección que se necesite.

2.3 Clasificación de la grúa.

Previamente a al cálculo de las acciones sobre la grúa, necesitamos realizar su clasificación para poder desplazarnos con facilidad por las tablas y gráficos que nos proporciona la normativa.

Según la UNE 58-112-91, clasificaremos la grúa según su clase de utilización y según su estado de carga y a partir de estos dos obtendremos el grupo de clasificación del aparato completo.

En la tabla de la figura 2-1, clasificamos nuestro aparato entre la clase 4 y la clase 5, un servicio regular ligero o intermitente. En la tabla de la figura 2-2, nos situamos en el tercer grupo, ya que nuestra grúa levanta con frecuencia cargas medianas y cargas próximas a la máxima.

Clases de utilización de los aparatos

Clase de utilización	Número máximo de ciclos de maniobra	Observaciones
U ₀	1,6 × 10 ⁴	Utilización ocasional
U ₁	3,2 × 10 ⁴	
U ₂	6,3 × 10 ⁴	
U ₃	1,25 × 10 ⁵	
U ₄	2,5 × 10 ⁵	Utilización regular en servicio ligero
U ₅	5 × 10 ⁵	Utilización regular en servicio intermitente
U ₆	1 × 10 ⁶	Utilización regular en servicio intensivo
U ₇	2 × 10 ⁶	Utilización intensiva
U ₈	4 × 10 ⁶	
U ₉	Más de 4 × 10 ⁶	

Figura 2-1 Clases de utilización de aparatos. (Fuente: UNE 58-112-91, Tabla 1).

Coefficiente nominal del espectro de cargas para los aparatos, K_p

Estado de carga	Coefficiente nominal del espectro de las cargas K_p	Observaciones
Q1 – Ligero	0,125	Aparato que levanta raramente la carga máxima de servicio y corrientemente cargas muy pequeñas
Q2 – Moderado	0,25	Aparato que levanta con bastante frecuencia la carga máxima de servicio y corrientemente cargas pequeñas
Q3 – Pesado	0,50	Aparato que levanta con bastante frecuencia la carga máxima de servicio y corrientemente cargas medianas
Q4 – Muy pesado	1,00	Aparato que corrientemente maneja cargas próximas a la carga máxima de servicio

Figura 2-2 Coeficiente nominal del espectro de carga para los aparatos. (Fuente: UNE 58-112-91, Tabla 2).

Basándonos en las clasificaciones anteriores y entrando en la tabla de la figura 2-3 de grupos de clasificación del aparato completo, nos situamos finalmente en los grupos 5 y 6.

Grupos de clasificación del aparato completo

Estado de carga	Coefficiente nominal del espectro de las cargas K_p	Clases de utilización y número máximo de ciclos de maniobra del aparato									
		U_0	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9
Q1 – Ligero	0,125	A1	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2 – Moderado	0,25	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8
Q3 – Pesado	0,5	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8
Q4 – Muy pesado	1,0	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8	A8

Figura 2-3 Grupos de clasificación del aparato completo. (Fuente: UNE 58-112-91, Tabla 3).

2.4 Acciones.

La norma UNE 58132-2 recoge las acciones que se deben considerar en aparatos de elevación. Estas acciones se agrupan en 4 grupos principalmente:

1. Solicitaciones principales en el estado de carga más desfavorable.
2. Solicitaciones debidas a movimientos verticales.
3. Solicitaciones debidas a movimientos horizontales.
4. Solicitaciones debidas a efectos climáticos.

Todas las solicitaciones sobre la viga que sean provocadas o transmitidas a través del carro serán en realidad divididas en 4 cargas iguales, ya que el carro se apoya en 4 ruedas sobre la viga. En el cálculo de las acciones que se muestra a continuación, se ha dibujado una única carga en cada caso para simplificar la representación, pero en el cálculo de la estructura se tendrá en cuenta.

2.4.1 Solicitaciones principales.

Las solicitaciones principales se componen de:

- Peso propio de todos los elementos que forman la estructura S_G .
- Carga de servicio S_L . Compuesta por la carga que es capaz de elevar (42 toneladas) más el peso del carro y otros accesorios como cables o ganchos (8 toneladas).

La carga de servicio, al ser una carga móvil, según la norma UNE 58-132-2 se tiene que considerar en sus posiciones más desfavorables. En nuestro caso (figura 2-4) se consideran una a cada extremo de los voladizos (S_{L1} y S_{L3}), y una en el punto medio entre los dos apoyos de la viga (S_{L2}).

$$S_{L1} = S_{L2} = S_{L3} = 50 \times 9,81 = 490,5 \text{ kN}$$

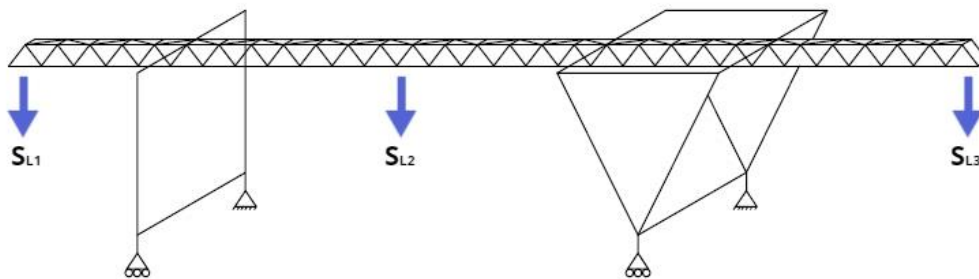


Figura 2-4 Aplicación cargas principales.

2.4.2 Solicitaciones debidas a movimientos verticales.

Estas acciones son debidas al levantamiento más o menos brusco de la carga de servicio. Según la norma, para tenerlas en cuenta se debe multiplicar la carga de servicio por un coeficiente Ψ que depende del tipo de grúa y de la velocidad de elevación de la grúa. Se calcula mediante la siguiente expresión [2.1]:

$$\Psi = 1 + \xi \cdot V_L \quad [2.1]$$

Esta expresión es válida hasta velocidades de $V_L = 1$ m/s, y a partir de este valor el coeficiente Ψ permanece constante. Por esta razón, y también porque este valor es más que aceptable para una grúa de estas características, se toma como valor de diseño $V_L = 1$ m/s.

Por otra parte, el valor de ξ viene determinado por el tipo de grúa, siendo 0,3 para grúas pluma y 0,6 para grúas pórtico y puente. Sin embargo, la norma especifica que cuando se considera la carga en un voladizo, se debe tomar siempre $\xi=0,3$.

Con esto se calcula el coeficiente Ψ resultando $\Psi_1=1,6$ para la carga entre los apoyos y $\Psi_2=1,3$ cuando la carga está en voladizo. (figura 2-5).

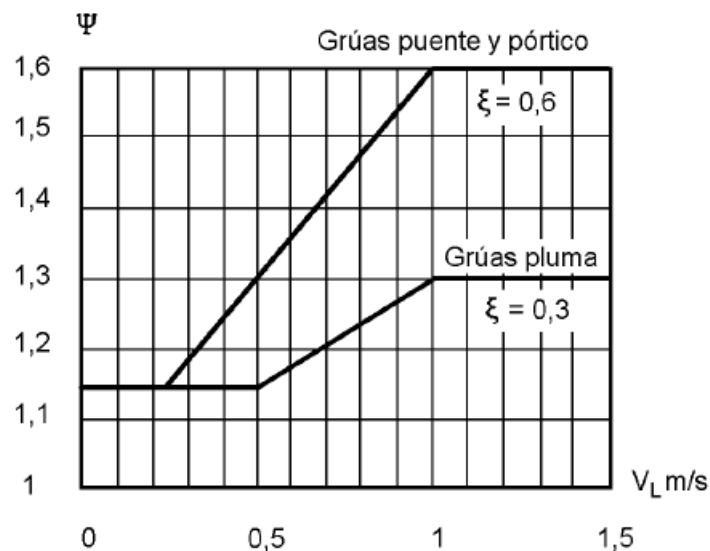


Figura 2-5 Valores de $\Psi=f(V_L)$. (Fuente: UNE 58-132-2, Fig. 1)

Multiplicando la carga de servicio por estos coeficientes, se obtienen las cargas mayoradas (Tabla 2-2) que serán las que se utilizarán para el cálculo en las posiciones comentadas anteriormente.

Nombre	Carga de Servicio (Kg)	Solicitaciones principales (kN)	Carga/4 (kN)	Coefficiente Ψ	Carga Mayorada (kN)
S _{L1}	50000	490,5	122,63	1,3	159,41
S _{L2}	50000	490,5	122,63	1,6	196,20
S _{L3}	50000	490,5	122,63	1,3	159,41

Tabla 2-2 Solicitaciones debidas a movimientos verticales.

2.4.3 Solicitaciones debidas a movimientos horizontales (S_H).

Se pueden diferenciar dos movimientos horizontales en este tipo de aparatos. Por una parte, tenemos el movimiento de translación de la grúa completa a través de los raíles y por otra parte el movimiento del carro a través de la viga principal.

El movimiento de translación, según las normas UNE 76-201-88 y UNE 58132-2 podrá ocasionar cargas debidas a la oblicuidad en las ruedas, cargas debidas al efecto de choques y cargas debidas a la inercia provocada por la aceleración de la grúa.

2.4.3.1 Cargas de oblicuidad en las ruedas (S_{H0}).

Antes de calcular estos esfuerzos, se procede a clasificar el tipo de ruedas del aparato. En este caso se trata de 6 pares de ruedas fijas e independientes en línea, por lo que según la figura 2-6 las ruedas serán del tipo IFF.





	Acoplada (C)	Independiente (I)
Fija/Fija (F/F)		
Fija/Móvil (F/M)		

Figura 2-6 Diferentes combinaciones de pares de ruedas. (Fuente: UNE 58-132-2, Fig. 3).

En la figura 2-7 se definen las posiciones relativas de los pares de ruedas respecto a la posición de los medios de guiado de la parte delantera. Se tomará $d_1=0$ porque las ruedas serán con pestaña y así lo indica la norma.

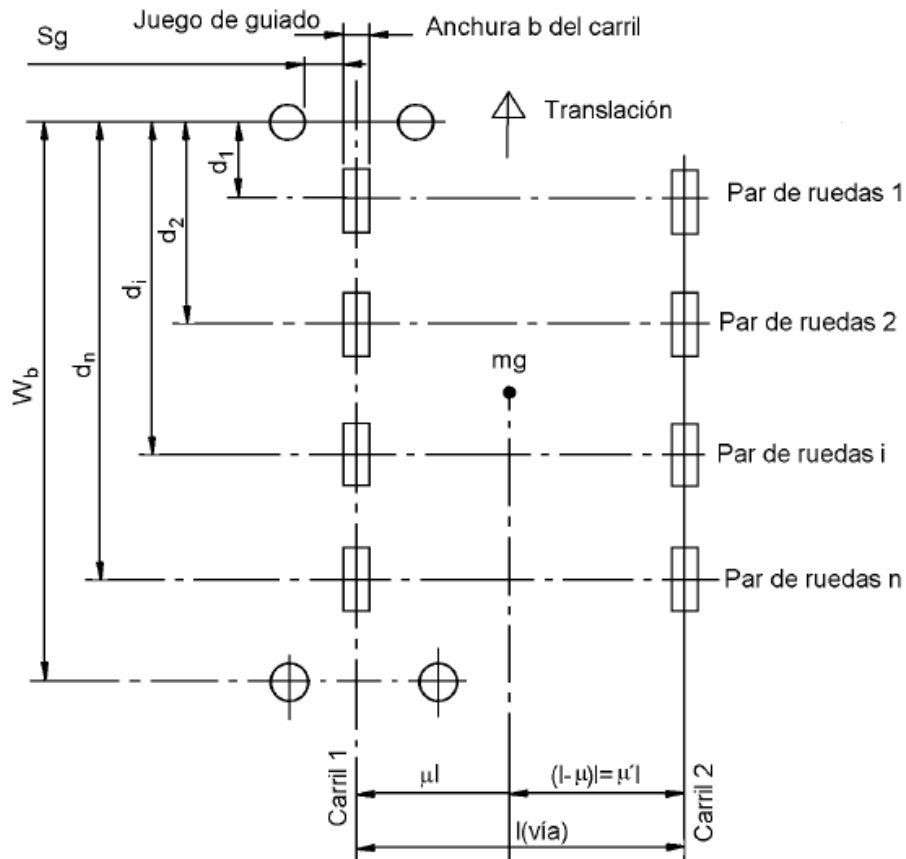


Figura 2-7 Posiciones de los pares de ruedas. (Fuente: UNE 58-132-2, Fig. 4)

La grúa, se traslada a velocidad constante formando un ángulo α (que debe ser menor o igual a 0,015 rad) con los rieles, de manera que aparecen unas fuerzas tangenciales F_{yij} en cada una de las ruedas, tal y como se muestra en la figura 2-8.

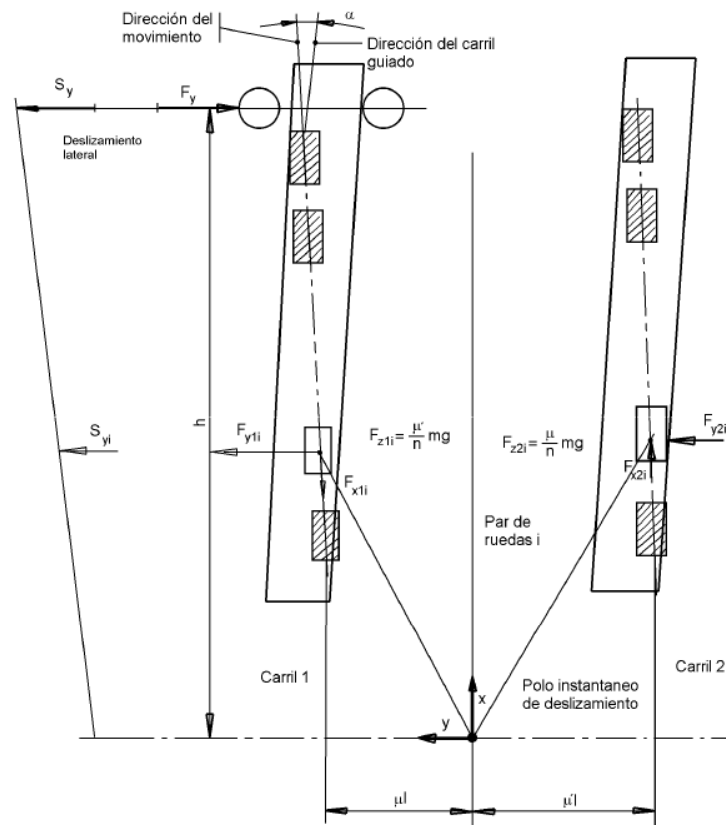


Figura 2-8 Cargas actuantes sobre el aparato de elevación en posición oblicua. (Fuente UNE 58-132-2, Fig. 6).

Para calcular estas fuerzas tangenciales, antes debemos calcular la distancia “h” entre el polo instantáneo de deslizamiento y los medios de guiado y con ello ya podremos sacar el esfuerzo F_y de guiado.

La expresión de “h” para sistemas F/F viene dada por la expresión [2.2]:

$$h = \frac{p \cdot \mu \cdot \mu' \cdot l^2 + \sum d_i^2}{\sum d_i} \quad [2.2]$$

Donde:

- p es el número de pares de ruedas acopladas
- μ es la distancia relativa entre el polo instantáneo de deslizamiento y el carril 1.
- μ' es la distancia relativa entre el polo instantáneo de deslizamiento y el carril 2.
- l es la vía del aparato.
- d_i es la distancia entre el par de ruedas i y los medios de guiado.

En la tabla 2-3 se muestran los datos en nuestro caso y el cálculo de “h”.

p	μ	μ'	l (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₃ (m)	d ₄ (m)	d ₅ (m)	d ₆ (m)	h
0	0,50	0,50	31,18	0,00	1,50	3,00	15,00	16,50	18,00	15,42

Tabla 2-3 Solicitaciones debidas a oblicuidad de las ruedas.

Una vez calculada la distancia “h” se procede a calcular los esfuerzos de guiado con la siguiente expresión [2.3]:

$$F_y = v \cdot m \cdot g \cdot f \quad [2.3]$$

Donde:

- $v = 1 - \frac{\sum d_i}{n \cdot h}$ para sistemas F/F
- $f = 0'3 \cdot (1 - e^{-250 \cdot \alpha})$ donde $\alpha \leq 0,015$ rad
- $m \cdot g$ = fuerza de la gravedad debida al aparato cargado.
- n = número de ruedas del aparato a cada lado del camino de rodadura.

Se utiliza una masa inicial del aparato de 200 toneladas, ya que hasta que no se realice la estimación exacta de los perfiles a utilizar no se puede saber con exactitud.

Tomando el caso más desfavorable, es decir, $\alpha = 0,015$ rad, se calcula la fuerza tangencial en cada rueda (F_{ii}) y posteriormente, sumando las fuerzas de las tres ruedas de cada *bogie* se obtiene la fuerza sobre cada uno de estos *bogies* (tabla 2-4 y 2-5).

Para el cálculo de estas fuerzas tangenciales “ F_{ii} ” se utiliza la fórmula mostrada anteriormente pero específica para cada rueda [2.4] y [2.5]:

$$F_{y1i} = v_{1i} \cdot m \cdot g \cdot f \quad [2.4]$$

$$F_{y2i} = v_{2i} \cdot m \cdot g \cdot f \quad [2.5]$$

Donde v_{1i} y v_{2i} las podemos calcular a partir de la expresión mostrada en la figura 2-9, entrando en ella con nuestro tipo de ruedas IFF:

Combinaciones de pares de ruedas (véase figura 3)	$\xi_{1i} = \xi_{2i}$	v_{1i}	v_{2i}
CFF	$\mu\mu'1/nh$	$\frac{\mu'}{n} \left(1 - \frac{d_i}{h}\right)$	$\frac{\mu}{n} \left(1 - \frac{d_i}{h}\right)$
IFF	0		
CFM	$\mu\mu'1/nh$		
IFM	0		

Figura 2-9 Valores de v_{1i} y v_{2i} . (Fuente: UNE 58-132-2, Tabla 1)

Cabe señalar que como la distancia relativa entre los polos instantáneos de deslizamiento y los dos carriles es la misma ($\mu=\mu'$) las fuerzas sobre las ruedas y sobre los *bogies* serán las mismas en los dos lados de la vía. Es decir, $F_{y11}=F_{y21}$, $F_{y12}=F_{y22}$... y en definitiva $F_{y1}=F_{y2}$.

Además, se puede observar claramente en los cálculos que la fuerza que aparece sobre los *bogies* traseros es nula o despreciable en comparación a los delanteros, por lo que solo se va a considerar la fuerza de los delanteros siendo F_{y1} y F_{y2} .

Rueda	11	12	13	14	15	16	F_{y1} (kN)	F_{ytras}
vii	0,0833	0,0752	0,0671	0,0023	0	0	162,136	≈0
Fyii	59,871	54,045	48,220	1,618	0	0		

Tabla 2-4 Solicitaciones debidas a oblicuidad derecha.

Rueda	21	22	23	24	25	26	F_{y2} (kN)	F_{ytras}
vii	0,0833	0,0752	0,0671	0,0023	0	0	162,136	≈0
Fyii	59,871	54,045	48,220	1,618	0	0		

Tabla 2-5 Solicitaciones debidas a oblicuidad izquierda.

Por último, en la siguiente figura (figura 2-10) se representa la aplicación de las cargas por oblicuidad. En la sollicitación S_{HO1} se están aplicando las cargas F_{y1} y F_{y2} cuando la grúa se traslada en un sentido y en S_{HO2} en el sentido contrario.

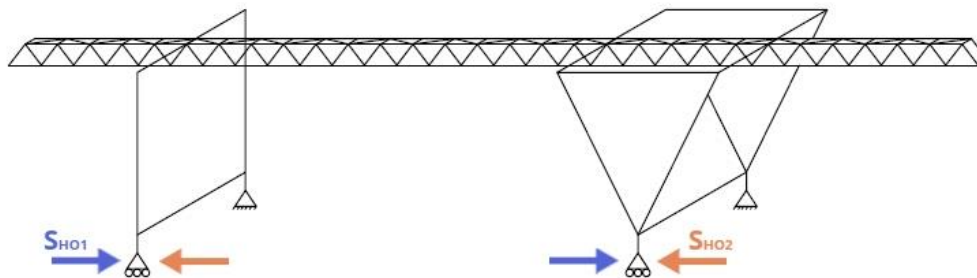


Figura 2-10 Aplicación cargas de oblicuidad.

2.4.3.2 Cargas debidas al efecto de choques (S_T).

Estas pueden dividirse en dos grupos:

- Choque sobre la estructura: En este caso solo se considerará cuando la velocidad sea mayor que 0,4 m/s. Dado que esta velocidad es más que aceptable y suficiente para nuestro caso, se ha fijado en la velocidad de translación de la grúa en 0,4 m/s ($V_t=0,4$ m/s). Por tanto, este tipo de acciones no se tiene en cuenta.
- Choque sobre la carga suspendida: Solo se consideran si la carga está guiada rígidamente. Tampoco se considerarán en nuestro caso.

2.4.3.3 Cargas debidas al movimiento horizontal de la estructura (S_{HT}).

Estas acciones son debidas a la inercia provocada por la aceleración y la deceleración de la grúa al trasladarse por los raíles. Se aplica en el punto donde está suspendida la carga. Según la norma, se calcula de la siguiente manera:

$$S_{HT} = (Q + C + P) \cdot \left(w + \frac{2 \cdot j_p}{g} \right) \quad [2.6]$$

Siendo:

- Q = Peso de la carga nominal.
- C = Peso del carro y su equipo.
- P = Peso de la viga y su equipo.
- w = factor de resistencia por fricción. Ver tabla 2-7.

- j_p = aceleración media del puente. Ver tabla 2-8.
- g = aceleración de la gravedad.

Fuerza de elevación kN	Luz entre carriles L m	Figura	Grupos 1 y 2					Grupos 3 y 4					Grupos 5 y 6, 7 y 8					Figura	Luz entre carriles L m	Fuerza de elevación kN	Factor ω				
			Pesos		Cga.de rueda			Pesos		Cga.de rueda			Pesos		Cga.de rueda										
			Carro C kN	Puente P kN	Total (C+P) kN	$V_{m\acute{a}x}$ kN	$V_{m\acute{i}n}$ kN	Carro C kN	Puente P kN	Total (C+P) kN	$V_{m\acute{a}x}$ kN	$V_{m\acute{i}n}$ kN	Carro C kN	Puente P kN	Total (C+P) kN	$V_{m\acute{a}x}$ kN	$V_{m\acute{i}n}$ kN								
10,0	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	27,0	31,0	10,0	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	27,0	31,0	10,0	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	28,0	31,0	200/50	0,004
10,0	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	27,0	31,0	10,0	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	27,0	31,0	10,0	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	28,0	31,0	300/50	0,0035
10,0	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	27,0	31,0	10,0	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	27,0	31,0	10,0	13,0	16,0	19,0	22,0	25,0	28,0	31,0	500/100	0,0035

Figura 2-11 Pesos, acciones de rueda y factor w de resistencia por fricción. (Fuente: UNE 76-201, Tabla A-2).

Velocidad m/s	1 Velocidad lenta y media con gran recorrido		2 Velocidad media y rápida (aplicaciones corrientes)		3 Velocidad rápida con fuertes aceleraciones	
	Duración de la aceleración s	Aceleración media m/s^2	Duración de la aceleración s	Aceleración media m/s^2	Duración de la aceleración s	Aceleración media m/s^2
4,00			8,0	0,50	6,0	0,67
3,15			7,1	0,44	5,4	0,58
2,50			6,3	0,39	4,8	0,52
2,00	9,1	0,22	5,6	0,35	4,2	0,47
1,60	8,3	0,19	5,0	0,32	3,7	0,45
1,00	6,6	0,15	4,0	0,25	3,0	0,33
0,63	5,2	0,12	3,2	0,19		
0,40	4,1	0,098	2,5	0,16		
0,25	3,2	0,078				
0,16	2,5	0,064				

Figura 2-12 Valores medios de aceleraciones y deceleraciones. (Fuente: UNE 76-201-88, Tabla 6).

DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNA GRÚA APILADORA DE CONTENEDORES SOBRE RAÍLES EN EL PUERTO DE BARCELONA.

Con todo esto, se realiza el cálculo de la acción:

$m_a(t)$	$m_c(t)$	$m_p(t)$	w	$j_p (m/s^2)$	$g (m/s^2)$	SHL (kN)	SHL/4 (kN)
42	8	50	0,0035	0,098	9,81	23,034	5,758

Tabla 2-6 Solicitaciones debidas a la translación de la grúa.

En nuestro caso, se considerarán en las mismas posiciones que se describen en las solicitaciones principales, resultando en este caso S_{HT1} , S_{HT2} y S_{HT3} :

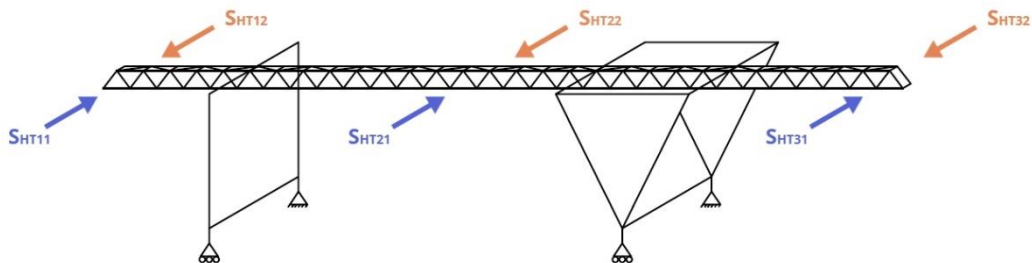


Figura 2-13 Aplicación cargas de inercia debidas a la translación de la grúa.

2.4.3.4 Cargas debidas al movimiento horizontal del carro (S_{HC}).

Estas son debidas a las aceleraciones y deceleraciones del carro, y se calculan de igual manera que las anteriores pero sin tener en cuenta el peso de la viga. También se aplican en el punto de suspensión de la carga.

$$S_{HC} = (Q + C) \cdot \left(w + \frac{2 \cdot j_p}{g} \right) \quad [2.7]$$

Utilizando los mismos valores que se han expuesto anteriormente se calculan las cargas debidas a la translación del carro en la tabla 2-7 y se muestran los puntos de aplicación en la figura 2-14:

$m_a(t)$	$m_c(t)$	w	$j_p (m/s^2)$	$g (m/s^2)$	$S_{HC} (kN)$	$S_{HC}/4 (kN)$
42	8	0,0035	0,098	9,81	11,517	2,879

Tabla 2-7 Cargas debidas a la translación del carro.

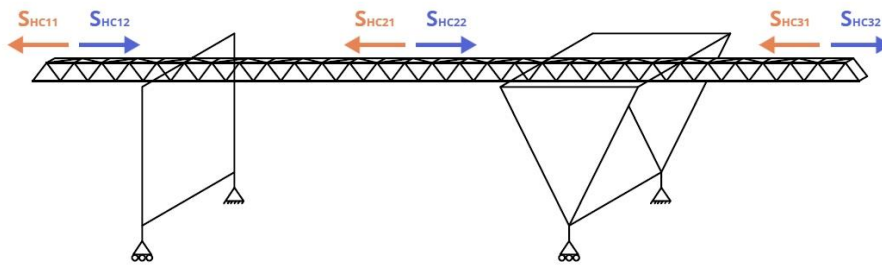


Figura 2-14 Aplicación de solicitaciones debidas a inercia por translación del carro

2.4.4 Solicitaciones debidas al viento (S_w).

Para el cálculo de las acciones de viento es necesario conocer las secciones de cada una de las partes de la estructura. Se realiza por tanto una estimación del tamaño de los perfiles, y posteriormente en el cálculo, si es necesario, se reducirá o se aumentará el perfil y se volverá a calcular. Esta estimación se realiza basándose en grúas similares ya existentes y en catálogos de fabricantes de este tipo de aparatos.

Para la viga en forma de celosía, se estiman perfiles de 350x350x10 mm para el cordón inferior y de 250x250x8 mm para el resto de las barras (figura 2-15). Esta diferencia es debida a que el cordón inferior es en el que se apoya la carga y además el carro necesita un mínimo de ancho de rodadura.

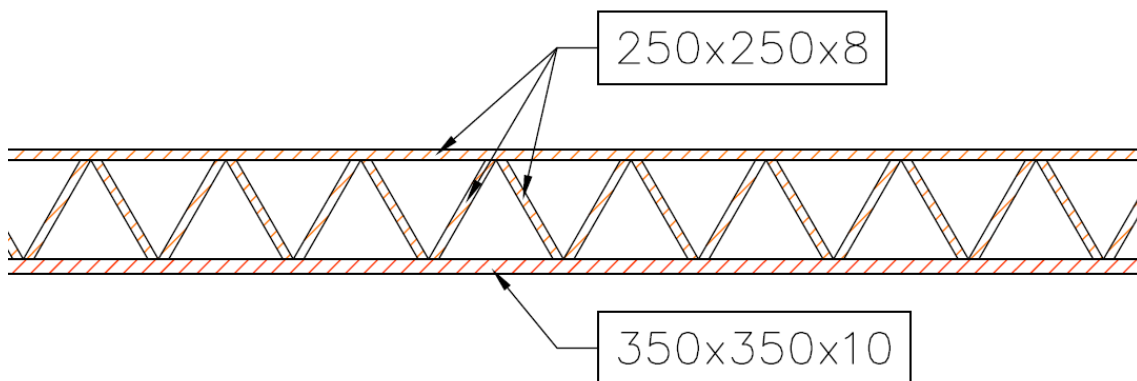


Figura 2-15 Secciones iniciales de la viga en forma de Celosía.

Los pórticos sobre los que apoya la viga se dividen en varias vigas cajón, siendo sus medidas en metros las indicadas en las siguientes figuras y todas con un espesor de 5 cm.

Secciones pórtico 1

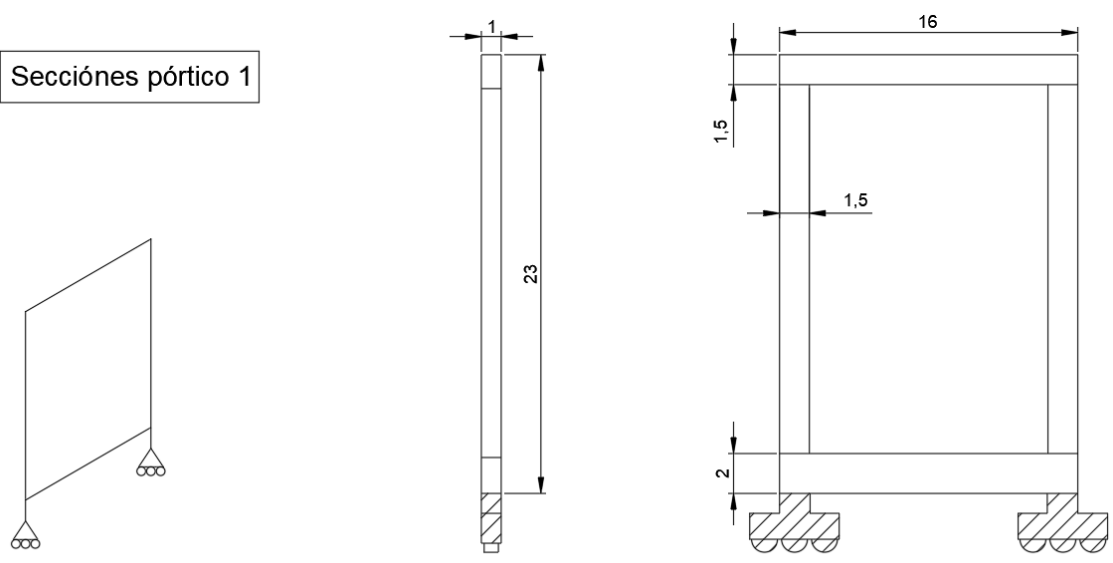


Figura 2-16 Secciones iniciales pórtico 1 acotadas.

Secciones pórtico 2

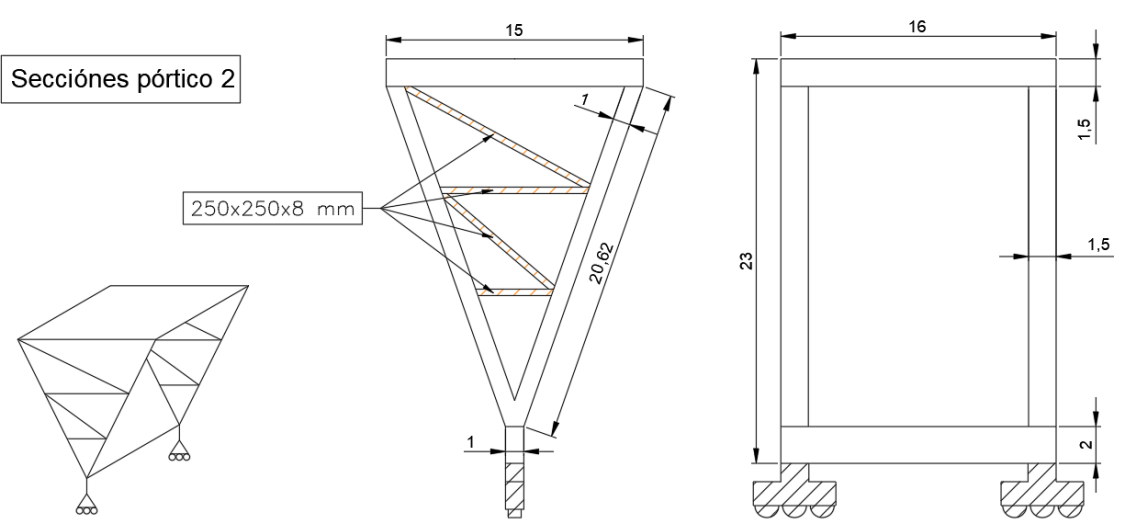


Figura 2-17 Secciones iniciales pórtico 2 acotadas.

Las longitudes de las barras de 250x250x8 mm, son 13,56 m, 9,23 m, 10 m, y 4,53 m, respectivamente en orden descendente.

2.4.4.1 Viento en servicio sobre la estructura.

Según la norma “UNE 58-113-85 Grúas. Acción del viento” la fuerza del viento en kN viene dada por la siguiente expresión:

$$F = A \cdot p \cdot C_f \quad [2.8]$$

Donde:

- A es la superficie neta en metros cuadrados del elemento considerado en m².
- p es la presión del viento en kN/m².
- C_f es el coeficiente de forma, en la dirección del viento, del elemento considerado.

El valor de la presión del viento se obtiene de la figura 2-18, considerando que nuestra grúa es de tipo c):

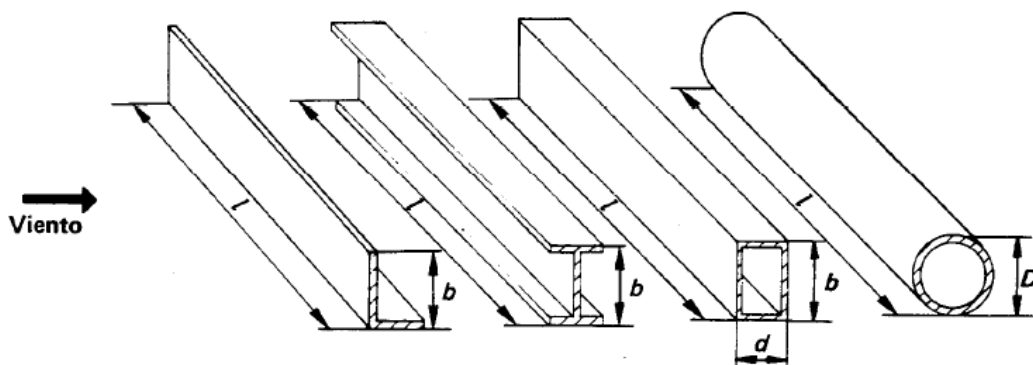
Tipo de Grúa	Velocidad del viento m/s	Presión del viento kPa/m ²
a) Grúas fácilmente protegibles contra la acción del viento y concebidas para utilizarse exclusivamente en caso de viento ligero (por ejemplo, grúas bajas cuya pluma pueda abatirse fácilmente hasta el suelo).	14	0,125
b) Todos los tipos normales de grúas que se instalen al aire libre.	20	0,25
c) Grúas de tipo portuario que deben poder continuar funcionando incluso en caso de viento fuerte.	28,5	0,50

Figura 2-18 Velocidades y presiones del viento en servicio (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla I)

Para la obtención del coeficiente de forma, se utilizan la figura 2-19 y la figura 2-20:

Tipo	Descripción	Coeficiente aerodinámico l/b ó l/D					
		5	10	20	30	40	50
Elementos simples	Perfiles laminados en L, en U y chapas planas	1,3	1,35	1,6	1,65	1,7	1,9
	Perfiles redondos, en los que $D v_s < 6 \text{ m}^2/\text{s}$ en los que $D v_s \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$	0,75 0,60	0,80 0,65	0,90 0,70	0,95 0,70	1,0 0,75	1,1 0,8
	Perfiles cuadrados de más de 350 mm de lado y rectangulares de más de 250 mm X 450 mm	b/d ≥ 2 1 0,5 0,25	1,55 1,40 1,0 0,8	1,75 1,55 1,2 0,9	1,95 1,75 1,3 0,9	2,1 1,85 1,35 1,0	2,2 1,9 1,4 1,0
Marcos simples de celosía	Perfiles de caras planas	1,7					
	Perfiles redondos en los que $D v_s < 6 \text{ m}^2/\text{s}$ en los que $D v_s \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$	1,2 0,8					
Casetas de máquinas, etc.	Estructuras rectangulares llenas, sobre el suelo o sobre fundación maciza (el aire no puede circular bajo la estructura)	1,1					

Figura 2-19 Coeficiente de forma (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla II).



$$\text{Coeficiente aerodinámico} = \frac{\text{longitud del elemento}}{\text{altura de la sección cara al viento}} = \frac{l}{b} \text{ ó } \frac{l}{D}$$

$$\text{Proporción de sección (Perfiles cuadrados)} = \frac{\text{altura de la sección cara al viento}}{\text{ancho de la sección, paralela al viento}} = \frac{b}{d}$$

Figura 2-20 Coeficiente aerodinámico y proporciones de la sección (Fuente: UNE 58-113.85, Fig. 1).

Se considerará caso de viento frontal (S_{w1} y S_{w2}) y viento lateral (S_{w3} y S_{w4}), siendo estas dos las direcciones más desfavorables (figura 2-21). Se calculará por separado la acción del viento sobre la viga y sobre cada pórtico.

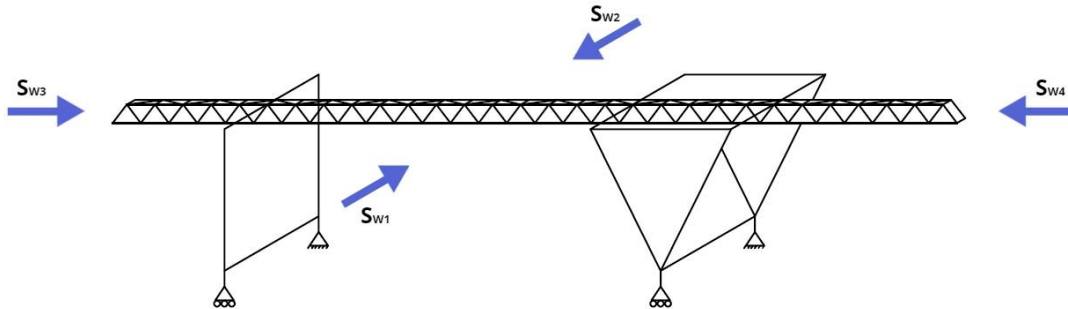


Figura 2-21 Aplicación solicitaciones debidas al viento.

2.4.4.1.1 Viento sobre la viga.

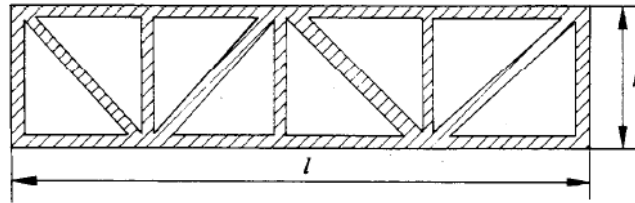
En el caso de nuestra viga, al ser en forma de celosía tridimensional, las dos caras de la viga se abrigan mutuamente y la acción del viento sobre la primera cara va a ser mayor que sobre la segunda. Por ello se calcula un coeficiente de apantallamiento que se aplicará a la fuerza sobre la cara no expuesta al viento en cada caso.

Para el cálculo de este coeficiente, se utilizan las figuras 2-22, 2-23 y 2-24:

Coeficiente de separación a/b	Coeficiente de superficie neta A/A_e					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	0,75	0,4	0,32	0,21	0,15	0,1
1,0	0,92	0,75	0,59	0,43	0,25	0,1
2,0	0,96	0,8	0,63	0,5	0,33	0,2
4,0	1	0,88	0,76	0,66	0,55	0,45
5,0	1	0,95	0,88	0,81	0,75	0,68
6,0	1	1	1	1	1	1

Figura 2-22 Coeficiente por efecto pantalla. (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla III).

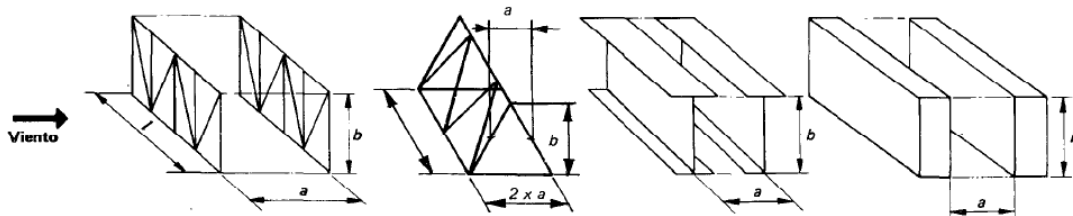
a) Coeficiente de superficie neta



$$\text{Coeficiente de superficie neta} \frac{A}{A_e} = \frac{\text{Superficie de las partes s\u00f3lidas (rayada)}}{\text{Superficie total}} = \frac{\sum A \text{ elementos}}{b \times l}$$

Figura 2-23 Coeficiente de superficie neta. (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla III-a).

b) Coeficiente de separacion



$$\text{Coeficiente de separaci\u00f3n} = \frac{\text{distancia entre caras opuestas}}{\text{altura del elemento cara al viento}} = \frac{a}{b}$$

Figura 2-24 Coeficiente de separaci\u00f3n. (Fuente: UNE 58-113-85, Tabla III-b).

En el caso de nuestra viga, con los perfiles de caras planas presentados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados (tabla 2-8):

p (kN/m ²)	Cf	A (m ²)	A _{total} (m ²)	A/A _{tot}	a/b	η	F _{marco1} (kN)	F _{marco2} (kN)
0,50	1,70	71,54	192,96	0,37	1,00	0,59	60,81	35,88

Tabla 2-8 Solicitaciones debidas al viento frontal.

Como estas fuerzas aparecer\u00e1n como cargas lineales, dividimos entre la longitud de la viga y obtenemos:

$$F_{m1} = 0,976 \frac{kN}{m}$$

$$F_{m2} = 0,575 \frac{kN}{m}$$

En el caso del viento lateral sobre la viga, aunque es prácticamente depreciable, se calculará solo sobre la primera cara (Tabla 2-9):

p (kN/m ²)	Cf	A (m ²)	F _{marco1} (kN)	F _{lineal} (kN/m)
0,50	1,70	3,30	2,81	0,234

Tabla 2-9 Solicitaciones debidas al viento lateral.

2.4.4.1.2 Viento sobre el pórtico 1.

En los pórticos, cuando es necesario, se divide la estructura en secciones rectas (figuras 2-25 y 2-26) y se calcula la acción del viento en cada una de ellas (Tablas 2-10 y 2-11).

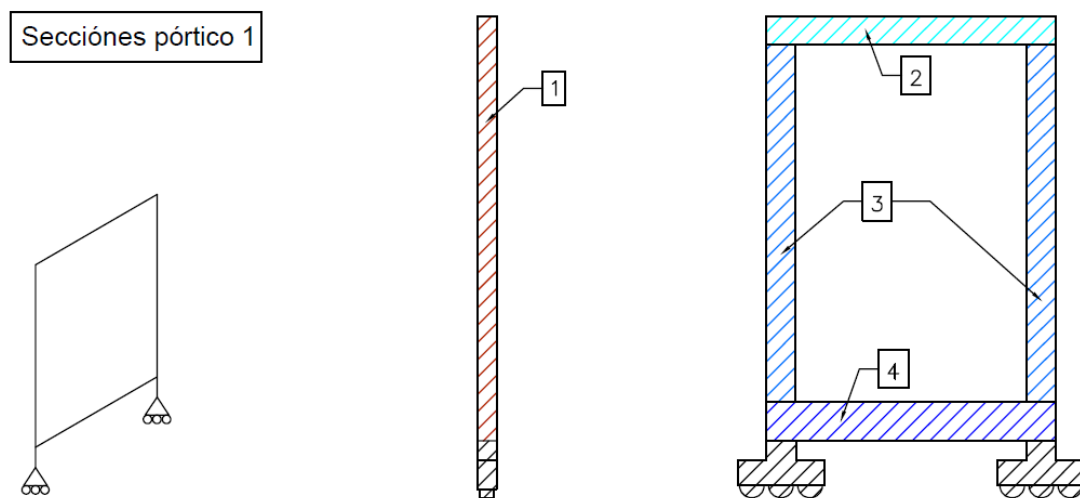


Figura 2-25 Secciones numeradas para aplicación del viento. Pórtico 1.

Sección	p (kN/m ²)	l (m)	b (m)	d (m)	l/b	b/d	Cf	A _{p1.i} (m ²)	F. Viento (kN)	F _{pi} (kN/m)
1	0,50	23,00	1,00	1,50	23,00	0,67	1,85	23,00	21,275	0,925

Tabla 2-10 Solicitaciones debidas al viento frontal en el pórtico 1.

Sección	p (kN/m ²)	l (m)	b (m)	d (m)	l/b	b/d	C _f	A _{p2.i} (m ²)	F. Viento (kN)	F _{pi} (kN/m)
2	0,50	16,00	1,50	1,00	10,67	1,50	1,75	24,00	21,000	1,313
3	0,50	18,50	1,50	1,00	12,33	1,50	1,95	27,75	27,056	1,463
4	0,50	16,00	2,00	1,00	8,00	2,00	1,75	32,00	28,000	1,750

Tabla 2-11 Solicitaciones debidas al viento lateral en el pórtico 1.

2.4.4.1.2 Viento sobre el pórtico 2.

En este caso se calculan las fuerzas de igual manera que anteriormente, pero en el caso de la sección 4 de este segundo pórtico (ver figura 2-26) el viento sopla formando un ángulo "θ" con el eje longitudinal de la barra. En este caso se aplica una modificación a la expresión de la fuerza del viento [2.9]:

$$F = A \cdot p \cdot C_p \cdot \sin^2 \theta \quad [2.9]$$

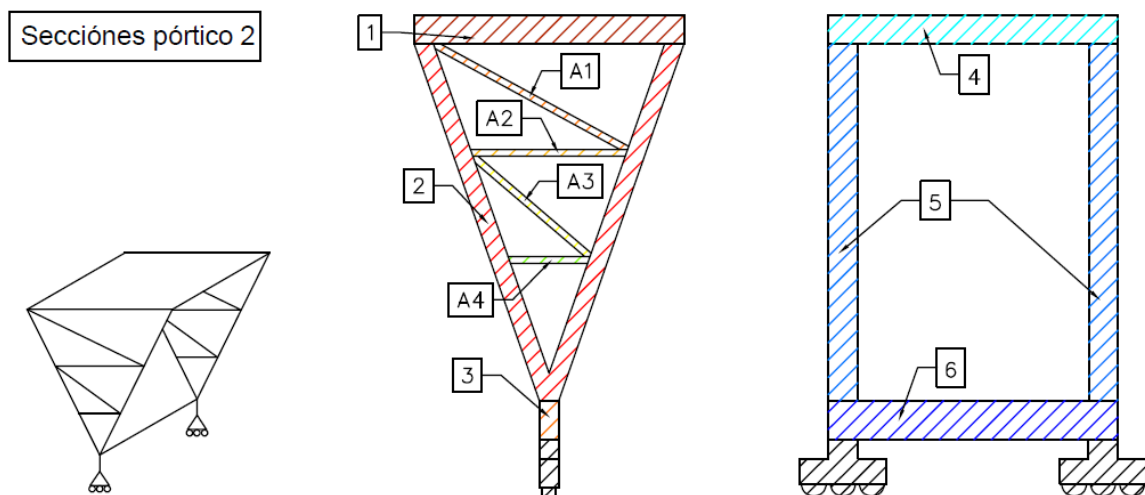


Figura 2-26 Secciones numeradas para aplicación del viento. Pórtico 2.

En las tablas a continuación, se recogen los valores de las acciones de viento sobre el segundo pórtico:

Sección	p (kN/m ²)	l (m)	b (m)	d (m)	l/b	b/d	C _f	A _{p2.i} (m ²)	F. Viento (kN)	F _{pi} (kN/m)
1	0,50	15,00	1,50	1,50	10,00	1,00	1,55	22,50	17,438	1,163
2	0,50	20,62	1,00	1,50	20,62	0,67	1,75	20,62	18,043	0,875
3	0,50	2,00	1,00	15,00	2,00	0,07	0,80	2,00	0,800	0,400
A1	0,50	13,56	0,35	0,35	38,74	1,00	1,90	4,75	4,509	0,333
A2	0,50	9,23	0,35	0,35	26,37	1,00	1,85	3,23	2,988	0,324
A3	0,50	10,00	0,35	0,35	28,57	1,00	1,85	3,50	3,238	0,324
A4	0,50	4,53	0,35	0,35	12,94	1,00	1,75	1,59	1,387	0,306

Tabla 2-12 Solicitaciones debidas al viento frontal en el pórtico 2.

Sección	p (kN/m ²)	l (m)	b (m)	d (m)	l/b	b/d	C _f	θ (grados)	A _{p2.i} (m ²)	F _{pi} (kN/m)
4	0,50	16,00	1,50	1,50	10,67	1,00	1,55	90,00	24,00	1,163
5	0,50	20,62	1,50	1,00	13,75	1,50	1,95	72,00	30,93	1,323
6	0,50	16,00	2,00	1,00	8,00	2,00	1,75	90,00	32,00	1,750

Tabla 2-13 Solicitaciones debidas el viento lateral en el pórtico 2.

2.4.4.2 Viento sobre la carga móvil en servicio.

Según la tabla de la Figura 2-18 mostrada anteriormente, nuestra grúa es de tipo c). Por tanto, la norma facilita la siguiente expresión para el cálculo de la acción del viento sobre la carga móvil:

$$f = 0,06 \cdot m \cdot g \quad [2.10]$$

Siendo:

- f la fuerza ejercida por el viento sobre la carga móvil, en kN.
- m la masa de la carga móvil, en toneladas.
- g la aceleración de la gravedad en m/s².

Nuestra masa móvil es de 50 toneladas, por tanto:

$$f = 30 \text{ kN}$$

2.4.4.1 Viento fuera de servicio sobre la estructura (S_{Wmax}).

Se trata de un viento extremo para el que la grúa tiene que ser capaz de permanecer estable en condiciones fuera de servicio. Esto significa que en las combinaciones de acciones esta carga se considerará por si sola, sin combinarse con ninguna otra.

Para los aparatos utilizados al aire libre, la presión del viento, que depende de la altura del elemento considerado, viene especificada en la siguiente tabla de la norma UNE 58132-2.

Altura sobre el suelo m	Presión del viento fuera de servicio N/m ²	Velocidad aproximada equivalente del viento fuera de servicio m/s
0 a 20	800	36
20 a 100	1 100	42
más de 100	1 300	46

Figura 2-27 Presiones fuera de servicio. (Fuente: UNE 58-132-2, Tabla 2).

Nuestra grúa tiene una altura de 22 metros, lo que significa que se debe diferenciar entre los elementos situados por arriba de los 20 metros y los que no superan este límite. Sin embargo, del lado de la seguridad y por simplificar, se realiza el cálculo con los valores de alturas entre 20 y 100 metros, es decir, se toma una presión del viento de $p=1,1 \text{ kN/m}^2$.

En las siguientes tablas (2-14 a 2-19) se vuelve a calcular la acción del viento en cada uno de los elementos del aparato tal y como se ha realizado anteriormente, pero con el único cambio de la presión del viento:

p (kN/m ²)	C_f	A (m ²)	A_{total} (m ²)	A/A_{tot}	a/b	η	F_{marco1} (kN)	F_{marco2} (kN)	S_{WM1} (kN/m)	S_{WM2} (kN/m)
1,10	1,70	71,54	192,96	0,37	1,00	0,59	133,772	78,926	2,147	1,267

Tabla 2-14 Solicitaciones debidas a viento máximo frontal sobre la viga.

p (kN/m ²)	C_f	A (m ²)	F_{marco1} (kN)	F_{lineal} (kN/m)
1,10	1,70	3,30	6,171	0,514

Tabla 2-15 Solicitaciones debidas el viento máximo lateral sobre la viga.

Sección	p (kN/m ²)	l (m)	b (m)	d (m)	l/b	b/d	C_f	$A_{p1.i}$	F. Viento	F_{pi} (kN/m)
1	1,10	22,00	1,00	1,50	22,00	0,67	1,75	22,00	42,35	1,925

Tabla 2-16 Solicitaciones debidas al viento máximo frontal sobre el pórtico 1.

Sección	p (kN/m ²)	l (m)	b (m)	d (m)	l/b	b/d	C_f	$A_{p2.i}$	F. Viento	F_{pi} (kN/m)
2	1,10	15,00	1,50	1,00	10,00	1,50	1,75	22,50	43,313	2,888
3	1,10	18,50	1,50	1,00	12,33	1,50	1,95	27,75	59,524	3,218
4	1,10	15,00	2,00	1,00	7,50	2,00	1,75	30,00	57,750	3,850

Tabla 2-17 Solicitaciones debidas al viento máximo lateral sobre el pórtico 1.

Sección	p (kN/m ²)	l (m)	b (m)	d (m)	l/b	b/d	C_f	$A_{p2.i}$	F. Viento	F_{pi} (kN/m)
1	1,10	14,00	1,50	1,50	9,33	1,00	1,55	21,00	35,805	2,558
2	1,10	19,61	1,00	1,50	19,61	0,67	1,75	19,61	37,749	1,925
3	1,10	2,00	1,00	15,00	2,00	0,07	0,80	2,00	1,760	0,880
A1	1,10	13,56	0,35	0,35	38,74	1,00	1,90	4,75	9,919	0,732
A2	1,10	9,23	0,35	0,35	26,37	1,00	1,85	3,23	6,574	0,712
A3	1,10	10,00	0,35	0,35	28,57	1,00	1,85	3,50	7,123	0,712
A4	1,10	4,53	0,35	0,35	12,94	1,00	1,75	1,59	3,052	0,674

Tabla 2-18 Solicitaciones debidas al viento máximo frontal sobre el pórtico 2.

Sección	P (kN/m ²)	l (m)	b (m)	d (m)	l/b	b/d	C_f	θ (grados)	$A_{p2.i}$	F_{pi} (kN/m)
4	1,10	15,00	1,50	1,50	10,00	1,00	1,55	90,00	22,50	2,558
5	1,10	19,61	1,50	1,00	13,07	1,50	1,95	72,00	29,42	2,910
6	1,10	15,00	2,00	1,00	7,50	2,00	1,75	90,00	30,00	3,850

Tabla 2-19 Solicitaciones debidas el viento máximo lateral sobre el pórtico 2.

2.5 Combinaciones de acciones.

En este apartado se muestran todas las hipótesis y combinaciones de cálculo que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el cálculo de la estructura diseñada.

2.5.1 Estados Límite de Servicio (ELS).

En los ELS se van a considerar las flechas sobre la viga, tanto horizontales como verticales. Para cada caso, los valores de las flechas se deben a las acciones producidas por las ruedas del carro, en su posición más desfavorable, sobre la viga, pero en este caso sin la aplicación de coeficientes dinámicos y con coeficientes de ponderación iguales a la unidad.

En el caso de las flechas verticales, la combinación considerada será la de peso propio (S_G) con el movimiento de elevación de la carga (S_L).

$$S_G + S_L \quad [2.11]$$

Por otro lado, para la flecha horizontal se considerará el peso propio (S_G) con la acción debida al movimiento horizontal del carro (S_{HC}).

$$S_G + S_{HC} \quad [2.12]$$

2.5.2 Estados Límite Últimos.

Para las combinaciones de Estados Límite Últimos se utilizan dos coeficientes de mayoración. El primero es el coeficiente Ψ debido a movimientos verticales calculado anteriormente y el segundo es el coeficiente γ_c que se obtiene de la figura 2-28, entrando con el tipo de grúa que en nuestro caso

era A5 o A6. Nos pondremos en el caso más desfavorable y utilizaremos el coeficiente correspondiente al tipo A6.

Grupo del aparato	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈
γ_c	1,00	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20

Figura 2-28 Coeficiente de mayoración combinaciones (Fuente: UNE 58-132-2, Tabla 3).

En este tipo de estructuras se consideran 3 casos de solicitaciones:

- Caso I. Servicio normal sin viento.
 - Se consideran las acciones debidas al peso propio (S_G), a la carga de servicio (S_L) y los efectos horizontales más desfavorables (S_H) mayoradas como indica la siguiente expresión:

$$\gamma_c \cdot (S_G + \Psi \cdot S_L + S_H) \quad [2.13]$$

- Caso II. Servicio normal con viento límite de servicio.
 - A las solicitaciones del caso anterior se añaden las cargas de viento límite de servicio S_W .

$$\gamma_c \cdot (S_G + \Psi \cdot S_L + S_H) + S_W \quad [2.14]$$

- Caso III. Solicitaciones excepcionales.
 - En este apartado en nuestro caso se considerarán solamente las cargas de viento fuera de servicio (S_{Wmax}) combinadas con las del peso propio (S_G).

Antes de pasar a mostrar la tabla con todas las posibles combinaciones, se hace la siguiente consideración: Las cargas de oblicuidad (S_{HO}) y de inercia debidas a la translación de la grúa (S_{HP}) siempre van a aparecer juntas, ya que las dos son producidas por el mismo movimiento. Es decir, nunca aparecerá una sin aparecer la otra. Por esta razón, se decide crear una hipótesis que agrupe estas dos acciones y de esta manera se simplificarán las combinaciones de acciones. Llamaremos a esta nueva hipótesis S_{HT} .

En las siguientes tablas (2-20 y 2-22) se muestran todas las combinaciones que se van a tener en cuenta en el cálculo:

	S_G (1)	S_L (1)	S_L' (2)	S_{HT} (2)	S_{HC} (2)	S_W (4)	S_{Wmax} (4)	Combinaciones
CASO I	1,14	1,824						1
	1,14	1,824		1,14				2
	1,14	1,824			1,14			2
	1,14		1,482					2
	1,14		1,482	1,14				4
	1,14		1,482		1,14			4
CASO II	1,14	1,824				1		4
	1,14	1,824		1,14		1		8
	1,14	1,824			1,14	1		8
	1,14		1,482			1		8
	1,14		1,482	1,14		1		16
	1,14		1,482		1,14	1		16
CASO III	1						1	4
TOTAL								79

Tabla 2-20 Combinaciones de cálculo y coeficientes de mayoración para ELU.

Solicitud	Definición	Nombre SAP
S_G	Acciones debidas al peso propio.	PESO PROPIO
S_L	Acciones debidas al movimiento vertical (levantamiento) de la carga entre los apoyos de la viga.	MOV. VERTICAL
S_L'	Acciones debidas al movimiento vertical (levantamiento) de la carga en los voladizos.	MOV. VERTICAL'
S_{HT}	Acciones debidas al movimiento de translación de la grúa. Incluye cargas de oblicuidad y de inercia en la posición de a carga.	TRANSLACIÓN GRUA
S_{HC}	Acciones de inercia debidas al movimiento del carro a través de la viga.	MOV. CARRO
S_W	Acciones debidas al viento de servicio.	VIENTO (1 al 4)
S_{Wmax}	Acciones debidas al viento fuera de servicio.	V. EXTREMO (1 al 4)

Tabla 2-21 Leyenda de la tabla 2-20

Nombre	Combinación	Archivo SAP
COMB 1	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL	[2]
COMB 2	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (1)	[2]
COMB 3	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (2)	[2]
COMB 4	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (1)	[2]
COMB 5	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (2)	[2]
COMB 6	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1)	[1]
COMB 7	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2)	[3]
COMB 8	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (1)	[1]
COMB 9	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (2)	[1]
COMB 10	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (1)	[3]
COMB 11	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (2)	[3]
COMB 12	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (1)	[1]
COMB 13	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (2)	[1]
COMB 14	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (1)	[3]
COMB 15	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (2)	[3]
COMB 16	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + VIENTO (1)	[2]
COMB 17	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + VIENTO (2)	[2]
COMB 18	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + VIENTO (3)	[2]
COMB 19	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + VIENTO (4)	[2]
COMB 20	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (1)	[2]
COMB 21	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (1)	[2]
COMB 22	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (2)	[2]
COMB 23	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (2)	[2]
COMB 24	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (3)	[2]
COMB 25	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (3)	[2]
COMB 26	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (4)	[2]

DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNA GRÚA APILADORA DE CONTENEDORES SOBRE RAÍLES EN EL PUERTO DE BARCELONA.

COMB 27	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (4)	[2]
COMB 28	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (1) + VIENTO (1)	[2]
COMB 29	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (2) + VIENTO (1)	[2]
COMB 30	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (1) + VIENTO (2)	[2]
COMB 31	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (2) + VIENTO (2)	[2]
COMB 32	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (1) + VIENTO (3)	[2]
COMB 33	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (2) + VIENTO (3)	[2]
COMB 34	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (1) + VIENTO (4)	[2]
COMB 35	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL + MOV. CARRO (2) + VIENTO (4)	[2]
COMB 36	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + VIENTO (1)	[1]
COMB 37	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + VIENTO (2)	[1]
COMB 38	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + VIENTO (3)	[1]
COMB 39	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + VIENTO (4)	[1]
COMB 40	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + VIENTO (1)	[3]
COMB 41	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + VIENTO (2)	[3]
COMB 42	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + VIENTO (3)	[3]
COMB 43	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + VIENTO (4)	[3]
COMB 44	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (1)	[1]
COMB 45	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (1)	[1]
COMB 46	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (2)	[1]
COMB 47	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (2)	[1]
COMB 48	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (3)	[1]
COMB 49	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (3)	[1]
COMB 50	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (4)	[1]
COMB 51	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (4)	[1]
COMB 52	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (1)	[3]
COMB 53	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (1)	[3]

DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNA GRÚA APILADORA DE CONTENEDORES SOBRE RAÍLES EN EL PUERTO DE BARCELONA.

COMB 54	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (2)	[3]
COMB 55	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (2)	[3]
COMB 56	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (3)	[3]
COMB 57	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (3)	[3]
COMB 58	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (1) + VIENTO (4)	[3]
COMB 59	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + TRANSLACIÓN GRÚA (2) + VIENTO (4)	[3]
COMB 60	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (1) + VIENTO (1)	[1]
COMB 61	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (2) + VIENTO (1)	[1]
COMB 62	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (1) + VIENTO (2)	[1]
COMB 63	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (2) + VIENTO (2)	[1]
COMB 64	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (1) + VIENTO (3)	[1]
COMB 65	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (2) + VIENTO (3)	[1]
COMB 66	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (1) + VIENTO (4)	[1]
COMB 67	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (1) + MOV. CARRO (2) + VIENTO (4)	[1]
COMB 68	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (1) + VIENTO (1)	[3]
COMB 69	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (2) + VIENTO (1)	[3]
COMB 70	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (1) + VIENTO (2)	[3]
COMB 71	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (2) + VIENTO (2)	[3]
COMB 72	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (1) + VIENTO (3)	[3]
COMB 73	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (2) + VIENTO (3)	[3]
COMB 74	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (1) + VIENTO (4)	[3]
COMB 75	PESO PROPIO + MOV. VERTICAL' (2) + MOV. CARRO (2) + VIENTO (4)	[3]
COMB 76	PESO PROPIO + V. EXTREMO (1)	[4]
COMB 77	PESO PROPIO + V. EXTREMO (2)	[4]
COMB 78	PESO PROPIO + V. EXTREMO (3)	[4]
COMB 79	PESO PROPIO + V. EXTREMO (4)	[4]

Tabla 2-22 Combinaciones de cálculo numeradas.

Para facilitar la comprensión de las combinaciones cabe añadir la siguiente información:

- La diferencia entre movimiento vertical' (1) y (2) es que cada una está aplicada en un voladizo.
- Las diferentes acciones tanto de MOV.CARRO (1) y (2) como de TRANSLACIÓN GRÚA (1) y (2) son los sentidos del movimiento. MOV. CARRO (1) el carro se desplaza en el sentido $(-\bar{x})$ y MOV. CARRO (2) el carro se desplaza en el sentido contrario $(+\bar{x})$. En el caso de TRANSLACIÓN GRÚA, la acción (1) es debida al movimiento del aparato en sentido $(-\bar{y})$ y la (2) en sentido contrario $(+\bar{y})$.
- La grúa, como la mayoría de las grúas de puerto, está pensada para situarse en un punto y realizar las operaciones de desplazamiento de contenedores en este punto. Por esta razón, tal y como especifica la norma UNE 58 132-2 no se combina el efecto de translación con otro movimiento horizontal. Es decir, lo único que se está restringiendo es que la grúa cargada se traslade y el carro se desplace al mismo tiempo.
- Finalmente, en los casos de viento tenemos 4 acciones distintas. La (1) y la (2) corresponden al viento frontal en dirección y sentido $(+\bar{y})$ y $(-\bar{y})$ respectivamente. La (3) y la (4) corresponden a viento lateral en dirección y sentido $(+\bar{x})$ y $(-\bar{x})$ respectivamente.

Con todo lo expuesto, quedan claramente definidas todas las acciones y combinaciones de acciones que se aplicarán al modelo para calcular la estructura y comprobar los diferentes criterios.

2.6 Comprobaciones.

En este apartado se van a realizar las comprobaciones necesarias para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de la estructura diseñada. Estas comprobaciones consisten en verificar que no se sobrepasan los Estados Límite impuestos por el CTE.

El CTE define "Estado Límite" como: *"aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguna de los requisitos estructurales para las que ha sido concebido"*.

Por una parte, se van a comprobar los Estados Límite Últimos (ELU) y por otro lado los Estados Límite de Servicio (ELS).

2.6.1 Procedimiento de cálculo.

Para modelar correctamente la estructura y poder introducir todas las combinaciones de cargas, se han utilizado 4 archivos de SAP2000:

- [1] Modelos Carga Voladizo 1.
- [2] Modelo Cargas Centro.
- [3] Modelos Carga Voladizo 3.
- [4] Modelo Cargas Viento Extremo.

Los 4 archivos tienen modelada exactamente la misma estructura (Figura 2-29), que ha sido importada desde AutoCAD, con las mismas secciones en cada barra y con las mismas articulaciones, pero en cada uno de ellos se introducen unas combinaciones de cargas. De esta manera es todo mucho más intuitivo que realizarlo todo en el mismo archivo.

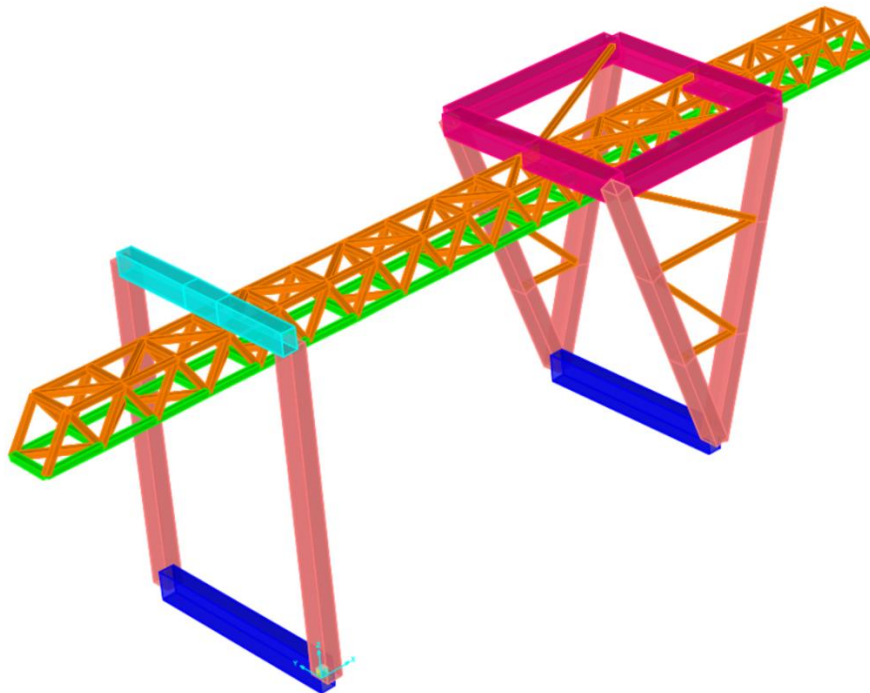


Figura 2-29 Modelado de la grúa en SAP2000

Los archivos [1], [2] y [3], contienen de igual manera las cargas de viento de servicio y peso propio. Sin embargo, la diferencia entre estos viene en el punto de aplicación de las cargas de translación de la grúa, de movimiento del carro y de movimiento vertical. En el archivo [1] están aplicadas en el primer voladizo, en el [2] en el centro de la viga y en el [3] en el otro voladizo.

En el archivo [4] simplemente están introducidas las acciones de peso propio y de viento extremo y las combinaciones correspondientes a estas acciones.

De esta manera, no tendremos un archivo de SAP2000 con las 79 combinaciones expuestas anteriormente, sino que tendremos estas 79 combinaciones repartidas entre los 4 archivos. La

distribución de estas 79 combinaciones en los diferentes archivos de SAP se muestra en la última columna de la tabla 2-22 mostrada anteriormente.

2.6.2 Estados Límite Últimos

Según el CTE: “Son los que, de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio del edificio o el colapso total o parcial del mismo”. Deben considerarse los debidos a:

- “Pérdida del equilibrio del edificio, o de una parte estructuralmente independiente, considerado como un cuerpo rígido”
- “Fallo por deformación excesiva, transformación de la estructura o de parte de ella en un mecanismo, rotura de sus elementos estructurales de sus uniones, o inestabilidad de elementos estructurales”

En primer lugar, se realiza la clasificación de secciones según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica. Según el CTE-DB-SE-A, estas son las 4 clases de secciones (figura 2-30):

Clase 1: Plástica	Permiten la formación de la rótula plástica con la capacidad de rotación suficiente para la redistribución de momentos.
Clase 2: Compacta	Permiten el desarrollo del momento plástico con una capacidad de rotación limitada.
Clase 3: Semicompacta o Elástica	En la fibra más comprimida se puede alcanzar el límite elástico del acero pero la abolladura impide el desarrollo del momento plástico
Clase 4: Esbelta	Los elementos total o parcialmente comprimidos de las secciones esbeltas se abollan antes de alcanzar el límite elástico en la fibra más comprimida.

Figura 2-30 Clasificación de secciones transversales solicitadas por momentos flectores (Fuente CTE DB-SE-A, Tabla 5.1).

En el caso de estudio, se trabaja con secciones de clase 3: Semicompacta o Elástica.

En segundo lugar, se necesita conocer la resistencia de cálculo de los materiales empleados. Esta se calcula, según el CTE DB-SE-A, como el cociente entre la tensión límite elástico y el coeficiente de seguridad del material [2.15].

$$f_{yd} = f_y / \gamma_M \quad [2.15]$$

Por otra parte, el CTE DB-SE-A determina el coeficiente de seguridad del acero como 1,05. El límite elástico del acero S275JR, ya expuesto con anterioridad en este proyecto, es 275 N/mm². Con esto, la resistencia de cálculo es:

$$f_{yd} = 275 / 1,05 = 261,9 \text{ N/mm}^2$$

2.6.2.1 Estado Límite Último de Resistencia.

En este apartado se va a realizar comprobar la resistencia de las secciones de la estructura diseñada frente a las acciones que actúan sobre esta. Para realizar estas comprobaciones se compara la tensión equivalente de Von Mises (σ_{eq}) con la resistencia de cálculo del material (f_{yd}), teniéndose que cumplir la condición [2.16].

$$\sigma_{eq} / f_{yd} \leq 1 \quad [2.16]$$

El cálculo de la tensión de Von Mises se realiza con la siguiente expresión [2.17]:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot (\tau_{xy} + \tau_{xz} + \tau_{xs})^2} \quad [2.17]$$

Donde:

- σ_x es la tensión normal de la sección, calculada con [2.18].
- τ_{xy} , τ_{xz} y τ_{xs} son las tensiones tangenciales debidas al cortante en y, cortante en z y al momento torsor, respectivamente.

Para calcular la tensión normal, se utiliza la ecuación de Navier [2.18]:

$$\sigma_x = \left| \frac{N}{A} \right| + \left| \frac{M_y}{W_y} \right| + \left| \frac{M_z}{W_z} \right| \quad [2.18]$$

Donde:

- N es el axil al que está sometido la sección.
- A es el área de la sección.
- M_y y M_z son los momentos en el eje y y z respectivamente.
- W_y y W_z son los módulos resistentes en y y en z respectivamente.

Y para la tensión tangencial se utiliza la siguiente expresión [2.19]:

$$\tau_{xy} = \frac{V_y \cdot S_y}{I_z \cdot t} \quad [2.19]$$

Donde:

- V_y es el cortante en y
- S_y es el momento estático en y
- I_z el momento de inercia en el eje z
- T el espesor de la sección.

Para realizar esta comprobación, se han agrupado las barras de la estructura en 5 grupos según sus secciones (estos grupos se pueden apreciar en la figura 2-29):

- Cercha Superior: Sección cuadrada hueca (SHS) 250x250x8 mm.
- Cercha Inferior: Sección cuadrada hueca (SHS) 350x350x10 mm.
- Pilares pórticos: Viga cajón de sección 1x1,5 m.
- Uniones inferiores: Viga cajón de sección 2x1 m.
- Uniones superiores: Viga cajón de sección 1,5x1,5 m.

Se van a extraer los resultados del cálculo para cada una de las secciones por separado de cada archivo SAP2000 y se integrarán todos en una misma hoja de cálculo. Se buscará la barra más solicitada (la que tenga mayor tensión equivalente de Von Mises) para cada grupo de secciones y se comprobará que esta cumple el criterio. De esta manera, se comprueba que la barra más solicitada de cada uno de los tipos de barras que integran la grúa cumple a resistencia y por tanto, que toda la estructura cumple.

A continuación, se muestran tanto los resultados extraídos de SAP como los cálculos realizados en la comprobación ELU Resistencia de las secciones más desfavorables:

GRUPO	Frame	COMB	P (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)	T (kN·m)	M2 (kN·m)	M3 (kN·m)
Cercha Superior	280	COMB72	2739,56	7,20	22,13	3,09	-34,95	-26,03
Cercha Inferior	225	COMB72	-2982,70	-9,63	45,65	-0,70	76,33	-63,31
Pilares pórtico	1	COMB47	-831,43	0,00	-238,54	0,00	-3082,34	0,00
Uniones inferiores	214	COMB52	104,48	428,72	-1211,54	-108,39	-4605,27	2852,95
Uniones superiores	188	COMB76	482,81	-716,24	25,96	-71,88	194,06	-4496,04

Tabla 2-23 Valores de esfuerzos para las secciones más desfavorables extraídos de SAP2000.

GRUPO	Frame	COMBINACIÓN	σ_x (MPa)	τ_{xy} (MPa)	τ_{xz} (MPa)	$\tau_{x\theta}$ (MPa)	σ_{eq} (MPa)
Cercha Superior	280	COMB72	454,495	1,091	3,354	3,297	454,693
Cercha Inferior	225	COMB72	312,494	1,267	6,007	0,303	312,770
Pilares pórtico	1	COMB47	34,104	0,000	1,704	0,000	34,231
Uniones inferiores	214	COMB52	55,339	3,062	8,654	0,516	59,256
Uniones superiores	188	COMB76	33,091	3,7697	0,2884	0,388	33,975

Tabla 2-24 Cálculo de tensiones normales y tangenciales.

GRUPO	Frame	COMBINACIÓN	Max σ_{eq} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)	σ_{eq}/f_{yd}	CUMPLE
Cercha Superior	280	COMB72	454,6932	261,905	1,7361	NO CUMPLE
Cercha Inferior	225	COMB72	312,7697	261,905	1,1942	NO CUMPLE
Pilares pórtico	1	COMB47	34,2313	261,905	0,1307	CUMPLE
Uniones inferiores	214	COMB55	59,2561	261,905	0,2263	CUMPLE
Uniones superiores	188	COMB76	33,9750	261,905	0,1297	CUMPLE

Tabla 2-25 Comprobación ELU Resistencia en las barras más solicitadas.

Como se puede apreciar en la tabla 2-25, tanto la Cercha Superior como la Cercha Inferior fallan a resistencia, con lo que es necesario aumentar el perfil de dichos grupos de barras. Siguiendo las tablas de los perfiles SHS se aumentan los perfiles hasta encontrar unos que cumplan y que sean del menor peso posible.

Para la Cercha Superior se elige un perfil SHS 350x350x10 mm y para la Cercha Inferior se elige un perfil SHS 450x450x12,5 mm.

Con todo esto, se muestran los resultados una vez modificadas las secciones:

GRUPO	Frame	COMBINACIÓN	σ_x (MPa)	τ_{xy} (MPa)	τ_{xz} (MPa)	$\tau_{x\theta}$ (MPa)	σ_{eq} (MPa)
Cercha Superior	280	COMB72	242,128	1,091	3,354	1,336	242,335
Cercha Inferior	225	COMB72	211,482	1,267	6,007	0,187	211,876
Pilares pórtico	1	COMB47	34,104	0,000	1,704	0,000	34,231
Uniones inferiores	214	COMB52	55,339	3,062	8,654	0,516	59,256
Uniones superiores	188	COMB76	33,091	3,7697	0,2884	0,388	33,975

Tabla 2-26 Cálculo de tensiones normales y tangenciales después del cambio de secciones.

GRUPO	Frame	COMBINACIÓN	Max σ_{eq} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)	σ_{eq}/f_{yd}	CUMPLE
Cercha Superior	107	COMB72	242,3349	261,9048	0,9253	CUMPLE
Cercha Inferior	30	COMB72	211,8764	261,9048	0,8090	CUMPLE
Pilares pórtico	1	COMB47	34,2313	261,9048	0,1307	CUMPLE
Uniones inferiores	15	COMB55	59,2561	261,9048	0,2263	CUMPLE
Uniones superiores	188	COMB76	33,9750	261,9048	0,1297	CUMPLE

Tabla 2-27 Comprobación ELU Resistencia en las barras más solicitadas después del cambio de secciones.

Con estos cambios, todas las barras cumplen a resistencia y por consiguiente, la estructura cumple. También se puede observar que no hay una combinación de acciones que predomine y sea la crítica para todo tipo de barras, sino que dependiendo de la combinación hay grupos de barras que trabajan más y otras menos.

En el caso de la viga, que está compuesta por los grupos “Cercha Superior” y “Cercha Inferior”, se observa que coincide la combinación más desfavorable para ambos grupos, la combinación 72. Como se puede ver en la tabla 2-22, esta combinación corresponde a una situación en la que el carro se encuentra en el extremo del voladizo 3, al mismo tiempo eleva carga y se desplaza horizontalmente y también sopla viento lateral en sentido $(+\bar{x})$.

Por contrario, para los grupos de barras que forman los pórticos, la combinación más desfavorable cambia para cada uno de ellos. En los pilares pórtico, la combinación más desfavorable se da cuando el carro está en el voladizo 1 (lógico ya que el primer pórtico, que es el menos resistente, soportará casi toda la carga). Para las “Uniones inferiores” el caso más desfavorable se da cuando la

carga se encuentra en el voladizo 3, y por último, para las “Uniones Superiores”, el caso más desfavorable es el de viento frontal extremo.

No obstante, se aprecia claramente que los tres últimos grupos de barras cumplen holgadamente, ya que, en el peor de los casos, trabajan al 22,6% y al 13% aproximadamente.

Por tanto, si las comprobaciones de pandeo y de ELS no lo impiden, se reducirán todas estas secciones con el fin de obtener una solución más ligera y en consecuencia más económica.

2.6.2.1 Estado Límite Último de Pandeo.

Para la comprobación del pandeo, también se han agrupado las barras en diferentes grupos. Dentro de cada grupo, se ha seleccionado por un lado la barra con mayor axil de compresión y por otro lado la barra comprimida con mayor momento (ya sea en el eje y o en el z).

Los grupos son:

- Cercha superior.
- Cercha Inferior.
- Pilares Pórtico 1.
- Pilares Pórtico 2.
- Uniones Superiores.
- Uniones Inferiores.

Una vez elegida la sección a comprobar, se identifica el coeficiente de pandeo (β) según las restricciones de los extremos de la barra y se calcula la longitud de pandeo equivalente L_k [2.20]:

$$L_k = \beta \cdot L \quad [2.20]$$

Donde L es la longitud real de la barra que se está comprobando.

Seguidamente, se calculan los valores de esbeltez mecánica [2.21], esbeltez límite [2.22] y esbeltez reducida [2.23]:

$$\lambda = \frac{\beta \cdot L}{i} \quad [2.21]$$

Siendo i el radio de giro según el eje en el que se estudia el pandeo.

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{f_y}} \quad [2.22]$$

E : módulo de elasticidad del acero.

f_y : límite elástico del acero.

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_{lim}} \quad [2.23]$$

A continuación, se calcula el coeficiente de pandeo χ según el plano en el que se está comprobando el pandeo [2.24]. Su valor debe ser menor a la unidad.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad [2.24]$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad [2.25]$$

Donde α es el coeficiente de imperfección elástica, que se obtiene de las tablas del CTE DB-SE-A. Este depende del tipo de perfil seleccionado y de sus características (Ver figuras 2-31 y 2-32).

Tipo de sección	Tipo de acero Eje de pandeo ⁽¹⁾	S235 a S355		S450		
		y	z	y	z	
Perfiles laminados en I 	$h/b > 1,2$	$t \leq 40$ mm	a	b	a_0	a_0
		40 mm $< t \leq 100$ mm	b	c	a	a
	$h/b \leq 1,2$	$t \leq 100$ mm	b	c	a	a
		$t > 100$ mm	d	d	c	c
Perfiles armados en I 	$t \leq 40$ mm	b	c	b	c	
	$t > 40$ mm	c	d	c	d	
Agrupación de perfiles laminados soldados 		c	c	c	c	
Tubos de chapa simples o agrupados 	laminados en caliente	a	a	a_0	a_0	
	conformados en frío	c	c	c	c	
Perfiles armados en cajón ⁽²⁾ 	soldadura gruesa: $a/t > 0,5$ $b/t < 30$ $h/t_w < 30$	c	c	c	c	
	en otro caso	b	b	b	b	

Figura 2-31 Curva de pandeo en función de la sección transversal. (Fuente: CTE DB-SE-A, Tabla 6.2).

Tabla 6.3 Valores del coeficiente de pandeo (χ)

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	a_0	a	b	c	d
Coefficiente (α) de imperfección	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76
$\leq 0,20$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,30	0,99	0,98	0,96	0,95	0,92
0,40	0,97	0,95	0,93	0,90	0,85
0,50	0,95	0,92	0,88	0,84	0,78
0,60	0,93	0,89	0,84	0,79	0,71
0,70	0,90	0,85	0,78	0,72	0,64
0,80	0,85	0,80	0,72	0,66	0,58
0,90	0,80	0,73	0,66	0,60	0,52
1,00	0,73	0,67	0,60	0,54	0,47
1,10	0,65	0,60	0,54	0,48	0,42
1,20	0,57	0,53	0,48	0,43	0,38
1,30	0,51	0,47	0,43	0,39	0,34
1,40	0,45	0,42	0,38	0,35	0,31
1,50	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28
1,60	0,35	0,32	0,31	0,28	0,25
1,80	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21
2,00 ⁽¹⁾	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 ⁽¹⁾	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 ⁽¹⁾	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 ⁽²⁾	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 ⁽²⁾	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

⁽¹⁾ esbeltez intolerable en los elementos principales
⁽²⁾ esbeltez intolerable incluso en elementos de arriostamiento

Figura 2-32 Valores del coeficiente de pandeo. (Fuente: CTE DB-SE-A, Tabla 6.3).

Para el caso presente, el valor del coeficiente de imperfección es 0,21 y viene dado por la curva de pandeo a.

DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNA GRÚA APILADORA DE CONTENEDORES SOBRE RAÍLES EN EL PUERTO DE BARCELONA.

Finalmente, con los parámetros anteriores calculados, se comprueba si la barra cumple o no a pandeo mediante las siguientes expresiones para elementos comprimidos y flectados:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{y,Ed} + e_{N,y} \cdot N_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_{yd}} + \alpha_z \cdot k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad [2.26]$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \alpha_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{y,Ed} + e_{N,y} \cdot N_{Ed}}{W_y \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad [2.27]$$

Siendo:

- N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ son los valores de la fuerza axial y de los momentos de cálculo de mayor valor absoluto de la pieza.
- Los valores de W_y , W_z , α_y , α_z , $e_{N,y}$, $e_{N,z}$ están indicados en la siguiente figura (2-33).
- χ_y y χ_z son los coeficientes de pandeo en cada dirección, calculado según [2.24].
- χ_{LT} es el coeficiente de pandeo lateral, según el CTE DB-SE A apartado 6.3.3 se tomará igual a 1,00 en piezas no susceptibles de pandeo por torsión.
- $e_{N,z}$ y $e_{N,y}$: desplazamientos del centro de gravedad de la sección transversal efectiva con respecto a la posición del centro de gravedad de la sección transversal bruta.
- Los coeficientes k_y y k_z se calculan con las expresiones mostradas en la figura (2-34).

Clase	A*	W_y	W_z	α_y	α_z	$e_{N,y}$	$e_{N,z}$
1	A	$W_{pl,y}$	$W_{pl,z}$	0,6	0,6	0	0
2	A	$W_{pl,y}$	$W_{pl,z}$	0,6	0,6	0	0
3	A	$W_{el,y}$	$W_{el,z}$	0,8	1	0	0
4	A_{eff}	$W_{eff,y}$	$W_{eff,z}$	0,8	1	Según pieza y tensiones	Según pieza y tensiones

Figura 2-33 Términos de comprobación, según peor clase de sección en la pieza (Fuente: CTE DB-SE-A, Tabla 6.8).

Cla-se	Tipo de sección	k_y	k_z	k_{yLT}
1 y 2	I, H, abiertas	$1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	el menor de $1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$
	Hueca delgada		$1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$0,6 + \bar{\lambda}_z$
3 y 4	Todas	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$1 - \frac{0,05 \cdot \bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$

siendo
 $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$ valores de las esbelteces reducidas para los ejes y – y y z – z, no mayores que 1,00.

$$N_{C,Rd} = A^* \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Figura 2-34 Coeficientes de interacción según peor clase de sección en la pieza (Fuente: CTE DB-SE-A, Tabla 6.9).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el cálculo a pandeo de la barra más desfavorable de cada grupo. Se ha llamado “plano pórtico” cuando se estudia el pandeo de la barra sobre su propio eje y, y se ha llamado “plano perpendicular al pórtico” cuando se estudia el pandeo de la barra sobre su eje z.

GRUPO	Barra	$\lambda_{lim.}$	β	L (cm)	$L_{eq.}$ (cm)	λ_y	λ_z	Comprob. $\lambda_{y,z} < 2$
Cercha Superior	278	86,815	1	346,4	346,4	24,95	0,29	CUMPLE
Cercha Inferior	225	86,815	1	346,4	346,4	21,89	0,25	CUMPLE
Pilar pórtico 1	1	86,815	2	2200	4400	78,47	0,90	CUMPLE
Pilar pórtico 2	201	86,815	1	749,92	749,92	13,37	0,15	CUMPLE
Uniones superiores	214	86,815	1	750	750	12,66	0,15	CUMPLE
Uniones inferiores	188	86,815	1	1500	1500	35,68	0,41	CUMPLE

Tabla 2-28 Comprobación pandeo. Cálculo esbelteces. Plano pórtico.

GRUPO	Barra	ϕ_y	χ_y	N_{ed} (kN)	$M_{y,ed}$ (kN·m)	$M_{z,ed}$ (kN·m)	$N_{c,rd}$ (kN)	k_y
Cercha Superior	278	0,550	0,98	1733,202	28,746	12,137	3561,905	1,086
Cercha Inferior	225	0,537	0,98	2982,69	76,32	63,30	5074,40	1,090
Pilar pórtico 1	1	0,982	0,73	831,42	3082,33	0,00	62857,14	1,010
Pilar pórtico 2	201	0,507	1,00	724,08	2586,69	2586,69	62857,14	1,001
Uniones superiores	214	0,505	1,00	1,00	4606,92	2760,82	75952,38	1,000
Uniones inferiores	188	0,607	0,95	375,56	4516,11	4516,11	75952,38	1,001

Tabla 2-29 Comprobación pandeo. Cálculo del coeficiente de pandeo y k_y . Plano pórtico.

GRUPO	Barra	$\lambda_{lim.}$	β	L (cm)	L_{eq} (cm)	λ_z	$\underline{\lambda}_z$	Comprob. $\underline{\lambda}_z < 2$
Cercha Superior	278	86,815	1	346,4	346,4	24,95	0,29	CUMPLE
Cercha Inferior	225	86,815	1	346,4	346,4	21,89	0,25	CUMPLE
Pilar pórtico 1	1	86,815	2	2200	4400	107,84	1,24	CUMPLE
Pilar pórtico 2	201	86,815	2	749,92	1499,84	36,76	0,42	CUMPLE
Uniones superiores	214	86,815	1	750	750	12,66	0,15	CUMPLE
Uniones inferiores	188	86,815	1	1500	1500	20,70	0,24	CUMPLE

Tabla 2-30 Comprobación pandeo. Cálculo esbelteces. Plano perpendicular al pórtico.

GRUPO	Barra	ϕ_z	χ_z	N_{ed} (kN)	$M_{y,ed}$ (kN·m)	$M_{z,ed}$ (kN·m)	$N_{c,rd}$ (kN)	k_z
Cercha Superior	278	0,550	0,98	1733,20	28,74	12,13	3561,90	1,086
Cercha Inferior	225	0,537	0,99	2982,69	76,32	63,30	5074,40	1,090
Pilar pórtico 1	1	1,381	0,50	831,42	3082,33	0,00	62857,14	1,016
Pilar pórtico 2	201	0,613	0,95	724,084	2586,69	2586,69	62857,14	1,003
Uniones superiores	214	0,505	1,00	1,002	4606,92	2760,82	75952,38	1,000
Uniones inferiores	188	0,532	0,99	375,568	4516,11	4516,11	75952,38	1,001

Tabla 2-31 Comprobación pandeo. Cálculo del coeficiente de pandeo y k_y . Plano perpendicular al pórtico.

GRUPO	Barra más desfavorable	Comprobación Plano pórtico	Comprobación plano perpendicular	¿CUMPLE?
Cercha Superior	278	0,6037	0,5886	CUMPLE
Cercha Inferior	225	0,8221	0,7973	CUMPLE
Pilar pórtico 1	1	0,1303	0,1160	CUMPLE
Pilar pórtico 2	201	0,2227	0,2047	CUMPLE
Uniones superiores	214	0,1970	0,1724	CUMPLE
Uniones inferiores	188	0,2729	0,2407	CUMPLE

Tabla 2-32 Comprobación final a pandeo.

Como se aprecia, se verifica el Estado Límite Último a pandeo para todas las barras en cada uno de los planos. Además, como pasaba en el estudio de ELU Resistencia, muchas de ellas cumplen sobradamente. Por tanto, si se cumplen los ELS se procederá a una reducción de los perfiles.

2.6.2 Estados Límite de Servicio.

En el caso del Estado Límite de Servicio, para el tipo de estructuras como la estructura objeto de estudio, se debe cumplir que la flecha máxima de la viga no supere el valor máximo admisible. Siguiendo la norma UNE 76-201-88 se adoptan como valores máximos admisibles los expuestos a continuación, siendo la luz de la grúa 31,2 m.

- Flecha vertical: 1/750 de la luz.
- Flecha horizontal: 1/1000 de la luz.

Para los voladizos, se tomará una luz igual a dos veces el vuelo.

Se introducen las combinaciones descritas en el apartado 2.5.1 en el SAP2000 y se obtienen los desplazamientos en los nudos. Una vez obtenidos, se extraen datos por separado de cada voladizo y del centro de la cercha, quedando así 3 casos para comprobar. Para cada uno de los tres casos se encuentran los nudos con mayor desplazamiento en las tres posibles direcciones y se comprueban todos. De esta manera se están comprobando los nudos más desfavorables de toda la estructura.

- Flecha vertical (tabla 2-32):

$$\delta_{rel} = \left| \frac{U3}{luz} \right| \leq \frac{1}{750} = \delta_{adm} \quad [2.28]$$

Caso	Nudo	U3 (m)	δ_{rel}	δ_{adm}	COMPROBACIÓN
Centro Cercha	84	-0,011239	0,000360	0,001333	CUMPLE
Voladizo 1	71	-0,030210	0,001246	0,001333	CUMPLE
Voladizo 3	72	-0,037820	0,001220	0,001333	CUMPLE

Tabla 2-33 Comprobación ELS flecha vertical.

Como era de esperar, las flechas verticales máximas se producen en el centro de la cercha y en los dos extremos de los voladizos. Además, se producen en el cordón inferior de la viga, ya que es por donde se desplaza el carro y donde se aplican de manera directa las cargas verticales.

- Flecha horizontal (tablas 2-34 y 2-35):

$$\delta_{rel} = \left| \frac{U2}{luz} \right| \leq \frac{1}{1000} = \delta_{adm} \quad [2.29]$$

Caso	Nudo	U1 (m)	δ_{rel}	δ_{adm}	COMPROBACIÓN
Centro Cercha	58	0,021978	0,000704	0,001000	CUMPLE
Voladizo 1	35	0,021084	0,000870	0,001000	CUMPLE
Voladizo 3	94	-0,005576	0,000180	0,001000	CUMPLE

Tabla 2-34 Comprobación ELS flecha horizontal U1

Caso	Nudo	U2 (m)	δ_{rel}	δ_{adm}	COMPROBACIÓN
Centro Cercha	93	0,000945	0,000030	0,001000	CUMPLE
Voladizo 1	76	-0,000815	0,000034	0,001000	CUMPLE
Voladizo 3	63	0,001202	0,000039	0,001000	CUMPLE

Tabla 2-35 Comprobación ELS flecha horizontal U2

Por tanto, la estructura cumple el Estado Límite de Servicio tanto para flechas verticales como horizontales.

2.7 Reducción de Secciones.

Como se ha visto en los resultados recientemente expuestos, hay muchos perfiles que son excesivos para las solicitaciones que soportan, en concreto los de los pórticos. La primera estimación de perfiles se hizo en base a grúas ya existentes y a catálogos de fabricantes, pero ahora que ya se han obtenido los primeros resultados, se puede afinar más con la elección de las secciones.

Además, en la primera estimación, siguiendo modelos ya existentes se propusieron hasta tres diferentes perfiles de viga cajón para los pórticos. En este apartado también se intentarán homogeneizar los pórticos de la grúa de manera que se utilicen el menor tipo de perfiles posibles.

2.7.1 Diseño definitivo.

Después de probar varios perfiles, cambiando tanto las dimensiones como el espesor, y de comprobar los Estados Límite para cada uno de ellos, se ha llegado a la siguiente solución:

- Cercha Superior: Sección cuadrada hueca (SHS) 350x350x10 mm.
- Cercha Inferior: Sección cuadrada hueca (SHS) 400x400x12,5 mm.
- Pilares pórticos y uniones superiores: Viga cajón de sección 1x1 m y espesor de 3 cm.

Las barras de los grupos “Cercha Superior” y “Cercha Inferior” no se han modificado ya que estaban ajustadas correctamente, pero el resto de las barras (las vigas cajón), se han reducido bastante.

A continuación, se muestra el modelo definitivo en SAP2000 (figura 2-35).

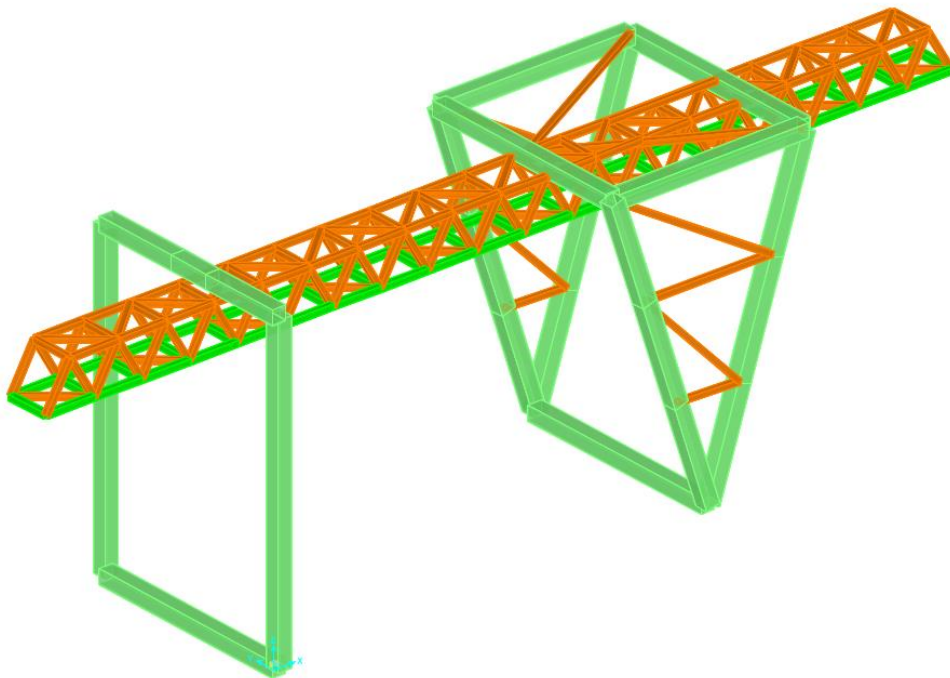


Figura 2-35 Modelado de la grúa definitiva en SAP2000

2.7.2 Comprobación de Estados Límite.

En este apartado se van a mostrar las comprobaciones de todos los Estados Límite para la estructura con los perfiles definitivos.

2.7.2.1 Estados Límite Últimos.

- Estado Límite Último de Resistencia.

GRUPO	Frame	COMB.	σ_x (MPa)	τ_{xy} (MPa)	τ_{xz} (MPa)	$\tau_{x\theta}$ (MPa)	σ_{eq} (MPa)
Cercha Superior	280	COMB72	242,128	1,091	3,354	1,336	242,335
Cercha Inferior	225	COMB72	211,482	1,267	6,007	0,187	211,876
Pilares pórtico	1	COMB47	91,494	0,000	1,704	0,000	91,541
Uniones superiores	214	COMB52	204,998	3,062	8,654	1,920	206,354
Uniones inferiores	188	COMB76	132,497	3,7697	0,2884	1,273	132,818

Tabla 2-36 Cálculo de tensiones normales y tangenciales en las barras más desfavorables después de reducir perfiles.

GRUPO	Frame	COMBINACIÓN	Max σ_{eq} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)	σ_{eq}/f_{yd}	CUMPLE
Cercha Superior	280	COMB72	242,3349	261,9048	0,9253	CUMPLE
Cercha Inferior	225	COMB72	211,8764	261,9048	0,8090	CUMPLE
Pilares pórtico	1	COMB47	91,5413	261,9048	0,3495	CUMPLE
Uniones superiores	214	COMB52	206,3544	261,9048	0,7879	CUMPLE
Uniones inferiores	188	COMB76	132,8181	261,9048	0,5071	CUMPLE

Tabla 2-37 Comprobación ELU Resistencia en las barras más desfavorables después de reducir perfiles.

Como se aprecia, la relación entre la tensión equivalente de Von Mises y la resistencia de cálculo del acero ha subido notablemente en “Pilares Pórtico”, en “Uniones superiores” y en “Uniones Inferiores”. Con las secciones anteriores, dicha relación llegaba en el caso más desfavorable al 13%, 22% y al 13% respectivamente. Con los nuevos perfiles, alcanzan el 35%, 79% y 51%. Es decir, prácticamente en todos los grupos se ha aumentado este cociente en el triple.

- Estado Límite Último de Pandeo.

GRUPO	Barra	$\lambda_{lim.}$	β	L (cm)	L_{eq} (cm)	λ_y	λ_{yV}	Comprob. $\lambda_{yV} < 2$
Cercha Superior	278	86,815	1	346,4	346,4	24,95	0,29	CUMPLE
Cercha Inferior	225	86,815	1	346,4	346,4	21,89	0,25	CUMPLE
Pilar pórtico 1	1	86,815	2	2200	4400	111,06	1,28	CUMPLE
Pilar pórtico 2	201	86,815	1	749,92	749,92	18,93	0,22	CUMPLE
Uniones superiores	214	86,815	1	750	750	18,93	0,22	CUMPLE
Uniones inferiores	188	86,815	1	1500	1500	37,86	0,44	CUMPLE

Tabla 2-38 Comprobación pandeo con reducción de perfiles. Cálculo esbelteces. Plano pórtico.

GRUPO	Barra	ϕ_y	χ_y	N_{ed} (kN)	$M_{y,ed}$ (kN·m)	$M_{z,ed}$ (kN·m)	$N_{c,rd}$ (kN)	k_y
Cercha Superior	278	0,550	0,980	1733,20	28,74	12,14	3561,91	1,086
Cercha Inferior	225	0,537	0,988	2982,69	76,32	63,31	5074,41	1,090
Pilar pórtico 1	1	1,432	0,482	831,42	3082,33	0,00	30485,71	1,034
Pilar pórtico 2	201	0,526	0,996	724,08	2586,69	2586,69	30485,71	1,003
Uniones superiores	214	0,526	0,996	1,00	4606,92	2760,82	30485,71	1,000
Uniones inferiores	188	0,620	0,943	375,56	4516,11	4516,12	30485,71	1,003

Tabla 2-39 Comprobación pandeo después de reducir perfiles. Cálculo del coeficiente de pandeo y k_y . Plano pórtico.

GRUPO	Barra	$\lambda_{lim.}$	β	L(cm)	$L_{eq.}(cm)$	λ_z	λ_z	Comprob. $\lambda_z < 2$
Cercha Superior	278	86,815	1	346,4	346,4	24,95	0,29	CUMPLE
Cercha Inferior	225	86,815	1	346,4	346,4	21,89	0,25	CUMPLE
Pilar pórtico 1	1	86,815	2	2200	4400	111,06	1,28	CUMPLE
Pilar pórtico 2	201	86,815	2	749,92	1499,84	37,86	0,44	CUMPLE
Uniones superiores	214	86,815	1	750	750	18,93	0,22	CUMPLE
Uniones inferiores	188	86,815	1	1500	1500	37,86	0,44	CUMPLE

Tabla 2-40 Comprobación pandeo con reducción de perfiles. Cálculo esbelteces. Plano perpendicular al pórtico.

GRUPO	Barra	ϕ_z	χ_z	N_{ed} (kN)	$M_{y,ed}$ (kN·m)	$M_{z,ed}$ (kN·m)	$N_{c,rd}$ (kN)	k_z
Cercha Superior	278	0,550	0,980	1733,202	28,746	12,137	3561,905	1,086
Cercha Inferior	225	0,537	0,988	2982,699	76,328	63,308	5074,405	1,090
Pilar pórtico 1	1	1,432	0,482	831,428	3082,336	0,000	30485,714	1,034
Pilar pórtico 2	201	0,620	0,943	724,084	2586,695	2586,695	30485,714	1,007
Uniones superiores	214	0,526	0,996	1,002	4606,925	2760,823	30485,714	1,000
Uniones inferiores	188	0,620	0,943	375,568	4516,118	4516,118	30485,714	1,003

Tabla 2-41 Comprobación pandeo después de reducir perfiles. Cálculo del coeficiente de pandeo y k_y . Plano perpendicular al pórtico.

GRUPO	Barra más desfavorable	Comprobación Plano pórtico	Comprobación plano perpendicular	¿CUMPLE?
Cercha Superior	278	0,6037	0,5886	CUMPLE
Cercha Inferior	225	0,8221	0,7973	CUMPLE
Pilar pórtico 1	1	0,3729	0,3096	CUMPLE
Pilar pórtico 2	201	0,5399	0,4897	CUMPLE
Uniones superiores	214	0,7314	0,6399	CUMPLE
Uniones inferiores	188	0,9127	0,8227	CUMPLE

Tabla 2-42 Comprobación final a pandeo con reducción de perfiles.

En el caso del pandeo también se puede apreciar un gran aumento. Los pilares han pasado de estar trabajando entre un 10% y un 23% a estar entre un 30% y un 55%. Las “Uniones Superiores” han pasado de menos de un 20% a casi un 75% y las “Uniones Inferiores” han pasado de trabajar en torno al 30% a trabajar a más del 90% en el caso del plano del pórtico.

De hecho, la comprobación a pandeo de las “Uniones Inferiores” ha sido una de las limitantes, es decir, el resto de las comprobaciones de ELU en el resto de barras aún podría haber soportado alguna disminución más en los perfiles, pero esta no.

2.7.2.2 Estados Límite de Servicio.

- Flecha Vertical:

Caso	Nudo	U3 (m)	δ_{rel}	δ_{adm}	COMPROBACIÓN
Centro Cercha	84	-0,011239	0,000360	0,001333	CUMPLE
Voladizo 1	71	-0,030210	0,001246	0,001333	CUMPLE
Voladizo 3	72	-0,040715	0,001313	0,001333	CUMPLE

Tabla 2-43 Comprobación final ELS flecha vertical

- Flecha Horizontal:

Caso	Nudo	U1 (m)	δ_{rel}	δ_{adm}	COMPROBACIÓN
Centro Cercha	58	0,021978	0,000704	0,001000	CUMPLE
Voladizo 1	35	0,021084	0,000870	0,001000	CUMPLE
Voladizo 3	94	-0,005576	0,000180	0,001000	CUMPLE

Tabla 2-44 Comprobación final flecha horizontal U1.

Caso	Nudo	U2 (m)	δ_{rel}	δ_{adm}	COMPROBACIÓN
Centro Cercha	93	0,000945	0,000030	0,001000	CUMPLE
Voladizo 1	76	-0,000815	0,000034	0,001000	CUMPLE
Voladizo 3	63	0,001145	0,000037	0,001000	CUMPLE

Tabla 2-45 Comprobación final flecha horizontal U2.

Como se observa en los resultados, la flecha horizontal no es para nada elevada, pero la flecha vertical se acerca mucho al límite. Aunque en estas condiciones cumple todo, seguir reduciendo los perfiles tampoco sería posible por la limitación de la flecha vertical.

2.7.3 Ahorro de material.

La reducción de perfiles realizada repercute directamente en el material necesario para construir la grúa y, como se verá posteriormente en el presupuesto, también en el precio de esta.

En las tablas siguientes (Tablas 2-46 y 2-47), se muestra el total de acero utilizado tanto en la primera estimación de perfiles de la grúa como en el diseño final. De esta manera se calcula fácilmente el ahorro de material en toneladas.

Primera estimación	Peso en toneladas
Cercha Inferior	29,13
Cercha Superior	78,39
Pilares Pórtico	66,41
Uniones Superiores	251,22
Uniones Inferiores	68,26
TOTAL	493,41

Tabla 2-46 Total de acero necesario para la primera estimación de la grúa.

Diseño final	Peso en toneladas
Cercha Inferior	29,13
Cercha Superior	78,39
Pórticos	215,65
TOTAL	323,17

Tabla 2-47 Total de acero necesario para el diseño final de la grúa.

Así pues, como se ve en las tablas anteriores hay un ahorro considerable de material. En concreto, el ahorro es de $493,41 - 323,17 = 170,24$ toneladas de acero. Esto supone, haber reducido el peso de la estructura en un 34,5% respecto a la primera estimación.

3. RESUMEN Y CONCLUSIONES.

En el presente proyecto se ha realizado el diseño y el cálculo de la estructura de una grúa sobre raíles, pensada para realizar labores de distribución, entrega y recepción de contenedores. Dicha grúa se ubicará en la terminal de contenedores del puerto de Barcelona. Las dimensiones de la grúa permiten desplazar contenedores en un rango horizontal de 66,5 metros y elevarlos hasta los 15 metros.

La estructura se compone, por una parte, de una viga en forma de celosía tridimensional, por donde se desplazará el carro que sostiene los contenedores, y por otra parte de dos pórticos donde se sostendrá la viga. Para la viga en celosía se seleccionan perfiles cuadrados huecos (SHS) y para los pórticos secciones rectangulares huecas (vigas cajón), y con esto, se realiza un predimensionado de la estructura completa.

La estructura se diseña en el programa AutoCAD de Autodesk y una vez modelada se introduce en el software de cálculo SAP2000. Se ha hecho uso de la normativa específica relativa a Grúas y aparatos de elevación (UNE 58-112-91, UNE 58-113-85, 58-132-2) y a Caminos de rodadura de puentes grúa (UNE 76-201-88). A partir de dicha normativa, se han calculado todas las acciones a las que estará expuesta la estructura y todas las combinaciones necesarias a considerar y se introducen también en SAP2000.

A partir de este punto, con los datos extraídos de SAP2000 y mediante Excel, se han comprobado todos los Estados Límite para todas las combinaciones exigidas por la norma.

En un primer cálculo, se ha llegado rápidamente a la conclusión de que se necesita aumentar los perfiles de la viga para cumplir a resistencia. En un segundo cálculo, se ha conseguido que toda la grúa cumpla los criterios, pero se ha decidido realizar una disminución de perfiles para optimizar la estructura.

Finalmente, se ha conseguido llegar a una estructura con perfiles reducidos y también homogeneizados, es decir, con un único tipo de perfil se podrán construir los dos pórticos. La solución final ha sido perfiles SHS de 350x350x10 mm para la "Cercha Superior", perfiles SHS de 400x400x12,5 mm para la "Cercha Inferior" y vigas cajón de 1x1x0,003 m para los pórticos. Esta reducción de perfiles afecta notablemente a la ligereza de la estructura y por tanto disminuye considerablemente su costo.

Además, se ha elaborado el presupuesto del proyecto mediante el software Arquímedes de CYPE, resultando un precio final de 1.042.525,14 €.

En último lugar, se han elaborado los planos para la correcta definición de la estructura. Estos planos se han realizado también en AutoCAD de Autodesk.

4. BIBLIOGRAFÍA.

- RODRÍGUEZ-AVIAL LLADRENT, Mariano; GONZÁLEZ-ALBERTO GARCÍA, Antonio y Universidad Nacional de Educación a Distancia (España): *Elasticidad y resistencia de materiales*, Madrid: UNED, 2011.
- SOLAGUREN-BEASCOA FERNÁNDEZ, Manuel: *Elasticidad y resistencia de materiales*, Madrid, Pirámide, 2016.
- SORO OROZ, Agustín: *Resistencia de materiales y teoría de estructuras*, Burgos: Universidad de Burgos, 2018.
- SUÁREZ GUERRA, Fernando; CARAZO ÁLVAREZ, Juan de Dios; FERNÁNDEZ ACEITUNO, Javier; JIMÉNEZ GONZÁLEZ, José Ignacio; Odilo: *Fundamentos de elasticidad y resistencia de materiales*, Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A, 2020.

WEBGRAFÍA

- BERNARDINO ABAD, “Te contamos todo sobre una terminal portuaria”, <https://bernardinoabad.es/2019/08/21/te-contamos-todo-sobre-una-terminal-portuaria/>, Consultado el 26/03/2021.
- EL MERCANTIL, “APM Terminals Barcelona inicia un nuevo servicio ferroviario reefer con Zaragoza”, <https://elmercantil.com/2020/03/11/apm-terminals-barcelona-inicia-un-nuevo-servicio-ferroviario-reefer-con-zaragoza/>. Consultado el 28/03/2021.
- EL MERCANTIL, “APM Terminals Barcelona invertirá 38 millones de euros en nuevas grúas hasta 2026”, <https://elmercantil.com/2020/10/28/apm-terminals-barcelona-invertira-38-millones-de-euros-en-nuevas-gruas-hasta-2026/>. Consultado el 29/03/2021.

- FINANZAS.COM, “APM Terminals Barcelona adquire una grúa apiladora por 3,5 millones de euros”, https://www.finanzas.com/coyuntura/apm-terminals-barcelona-adquiere-una-grua-apiladora-por-3-5-millones-de-euros_13537114_102.html, Consultado el 29/03/2021

- GRUAS ALHABRA, “¿Qué tipos de Grúas son usadas en los puertos?”, <https://gruasalhambra.com/que-tipos-de-gruas-son-usadas-en-los-puertos/>, Consultado el 26/03/2021.

- GRÚAS Y APAREJOS, “Tipos de grúas pórtico”, https://www.gruasyaparejos.com/grua-portico/grua-portico-tipos/#tipo_viga_cajon, Consultado el 28/03/2021.

PRESUPUESTO

DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNA GRÚA APILADORA DE CONTENEDORES SOBRE RAÍLES EN EL
PUERTO DE BARCELONA.

5. PRESUPUESTO

5.1 Presupuestos parciales.

Presupuesto parcial nº 1 ESTRUCTURA

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
1.1	EAV010	kg	Perfiles cuadrado huecos de acero S275JR laminados en caliente con uniones soldadas.	323.170,000	2,09	675.425,30
Total presupuesto parcial nº 1 ESTRUCTURA:						675.425,30

Presupuesto parcial nº 2 PINTURA

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
2.1	RLC010	m ²	Tratamiento superficial de protección anticorrosiva para elementos de acero mediante imprimación anticorrosiva a base de resina epoxi y fosfato de zinc, aplicada en dos manos (100 µ).	1.476,960	20,72	30.602,61
Total presupuesto parcial nº 2 PINTURA:						30.602,61

Presupuesto parcial nº 3 CALIDAD Y ENSAYOS

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
3.1	XMP010	Ud	Ensayo destructivo sobre una muestra de perfil laminado, con determinación de: límite elástico aparente, resistencia a tracción, módulo de elasticidad, alargamiento y estricción.	4,000	194,36	777,44
3.2	XMP020	Ud	Ensayo de aptitud al soldeo sobre una muestra soldada de perfil laminado, con determinación de: disminución de la carga total de rotura.	4,000	194,36	777,44
3.3	XMS010	Ud	Inspección visual sobre una unión soldada.	8,000	65,64	525,12
Total presupuesto parcial nº 3 CALIDAD Y ENSAYOS:						2.080,00

Presupuesto parcial nº 4 GESTIÓN DE RESIDUOS

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
4.1	GRA010	Ud	Transporte de residuos inertes metálicos producidos en estructuras metálicas, con contenedor de 7 m ³ , a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos.	16,000	212,07	3.393,12
Total presupuesto parcial nº 4 GESTIÓN DE RESIDUOS:						3.393,12

Presupuesto parcial nº 5 SEGURIDAD Y SALUD

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
5.1	F01	Ud	Partida alzada en materia de seguridad y salud	1,000	8.743,53	8.743,53
Total presupuesto parcial nº 5 SEGURIDAD Y SALUD:						8.743,53

5.2 Presupuesto de inversión.

Presupuesto de ejecución del material (PEM)

1. ESTRUCTURA	675.425,30 €
2. PINTURA	30.602,61 €
3. CALIDAD Y ENSAYOS	2.080,00 €
4. GESTIÓN DE RESIDUOS	3.393,12 €
5. SEGURIDAD Y SALUD	8.743,53 €
Total:	720.244,56 €
Gastos generales (13% PEM)	93.631,79 €
Beneficio industrial (6% PEM)	43.214,67 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	857.091,03 €
IVA (21% PEC)	179.989,12 €
TOTAL (PEC + IVA)	1.037.080,14 €

Asistencia técnica

6. PROYECTO DE EJECUCIÓN	4.500,00 €
IVA (21%)	945,00 €
TOTAL ASISTENCIA TÉCNICA	5.445,00 €
TOTAL PRESUPUESTO DE INVERSIÓN	1.042.525,14 €

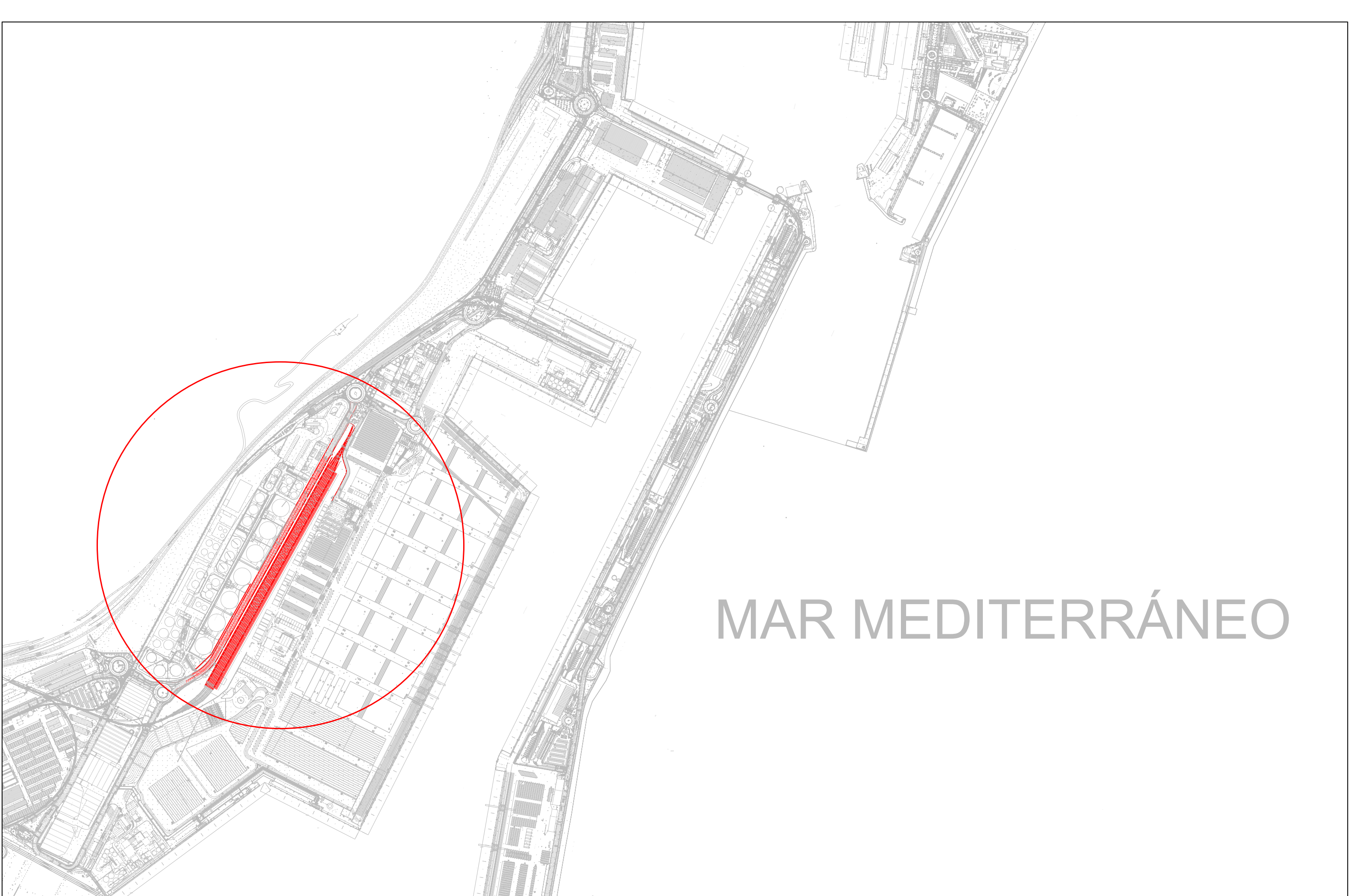
Asciende el presupuesto de inversión a la cantidad de UN MILLÓN CUARENTA Y DOS MIL QUINIENTOS VEINTICINCO euros con CATORCE céntimos.

6. PLANOS



01 Plano de Situación.

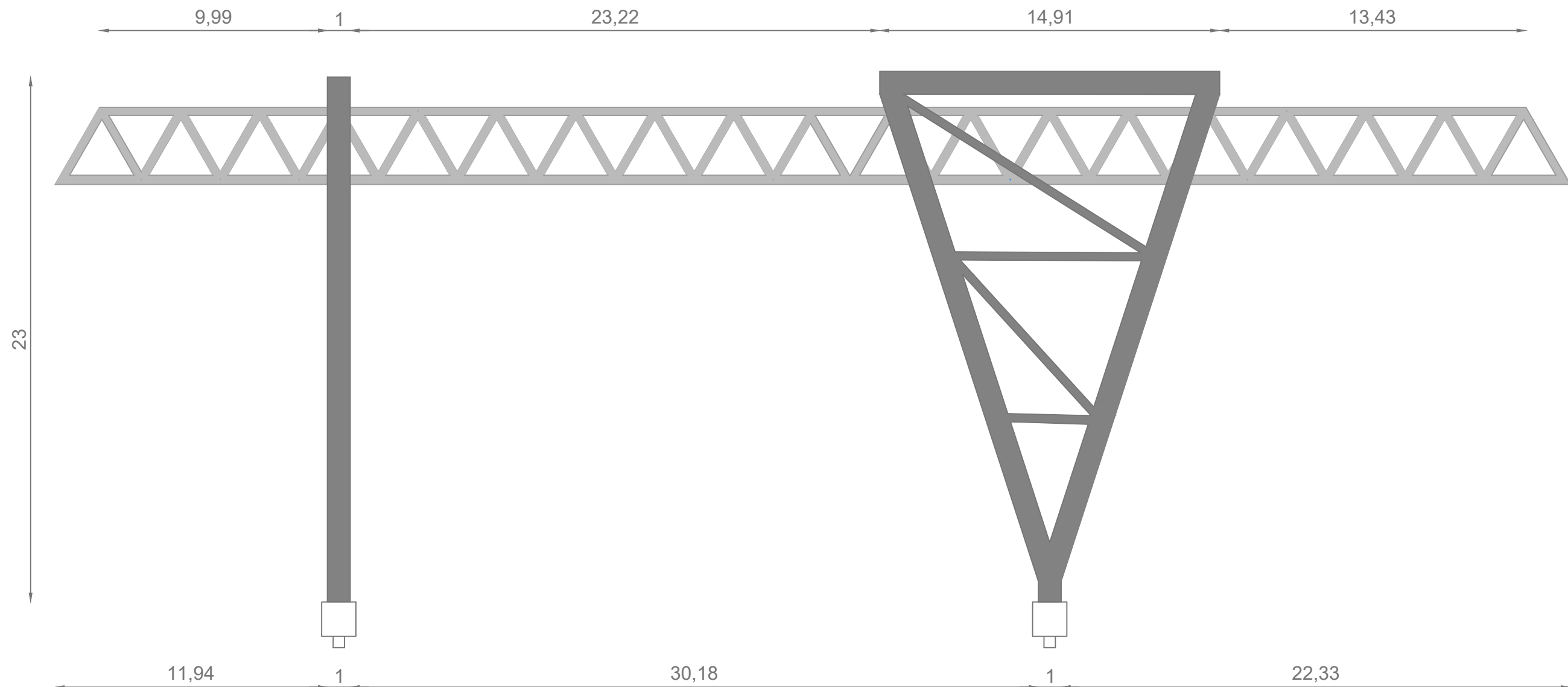
02 Planta y Alzado Grúa.

03 Perfil y vista en 3d.

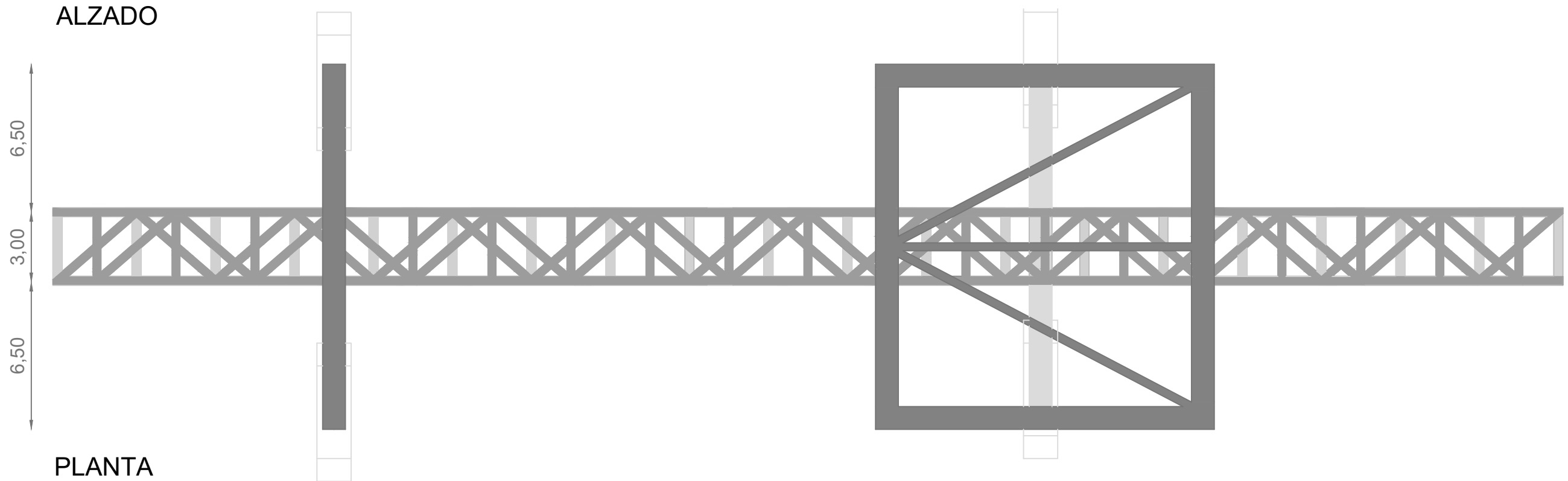


MAR MEDITERRÁNEO

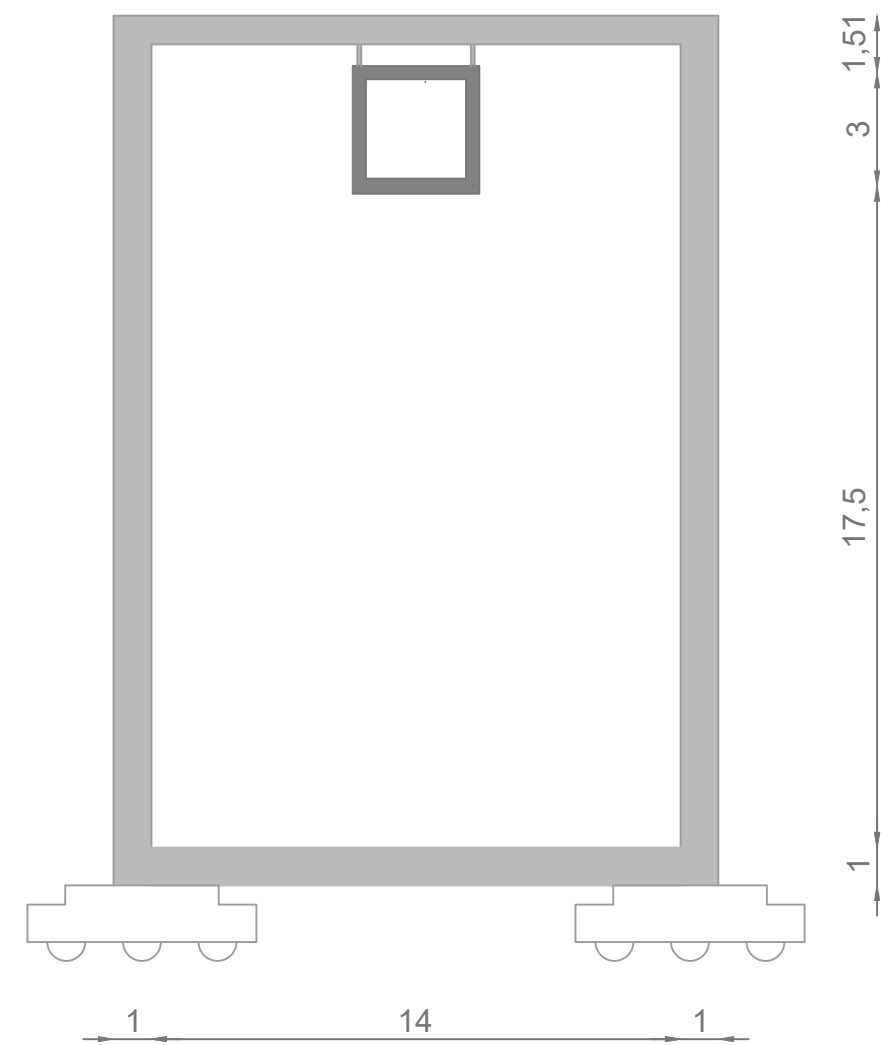
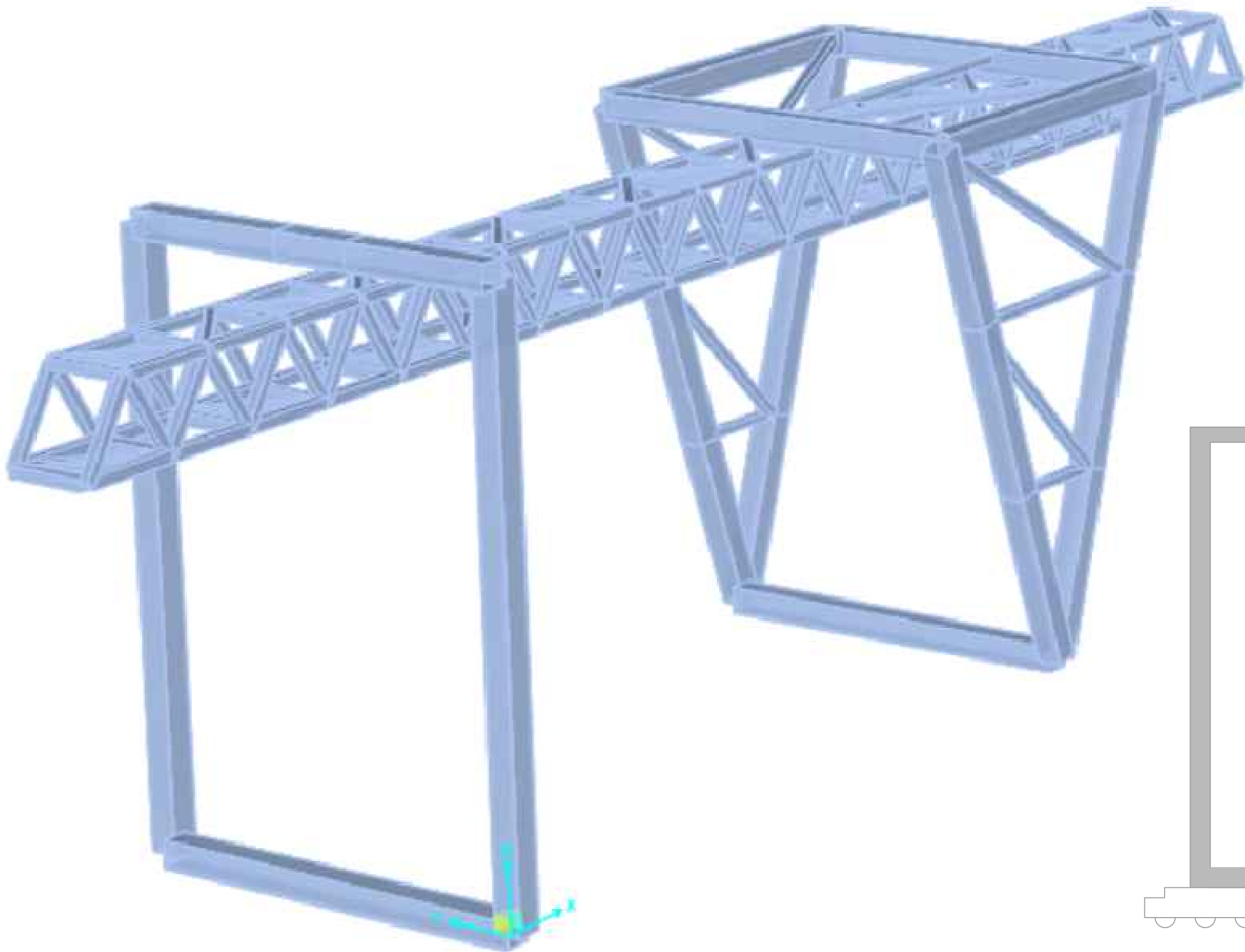
TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES	Proyecto:	Plano:	Fecha:	Nº Plano:	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALÈNCIA	DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNA GRÚA APILADORA DE CONTENEDORES SOBRE RAÍLES EN EL PUERTO DE BARCELONA	Plano de Situación Autor: MARC PASCUAL GOMAR	Mayo 2021 Escala: 1:10.000	01



ALZADO



PLANTA



PERFIL