



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis y desarrollo en 3D de la estructura metálica de una nave industrial

Autor: Andrea Añón Suárez

Director: Tamar Awad Parada

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Análisis y desarrollo en 3D de la estructura metálica de una nave industrial
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/2023 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Andrea Añón Suárez

Fecha: 19 / 07 / 2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Tamar Awad Parada

Fecha: 19 / 07 / 2023



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis y desarrollo en 3D de la estructura metálica de una nave industrial

Autor: Andrea Añón Suárez

Director: Tamar Awad Parada

Madrid

ANÁLISIS Y DESARROLLO EN 3D DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE UNA NAVE INDUSTRIAL

Autor: Añón Suárez, Andrea.

Director: Awad Parada, Tamar.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Partiendo de un proyecto existente, en este Trabajo de Fin de Máster se trata de diseñar, analizar, dibujar en CAD y modelar un prototipo en 3D de la estructura metálica de la ampliación de la nave industrial existente. Teniendo como base las medidas de la nave actual, se trata de realizar un diseño de la ampliación de dicha nave con medidas y características similares al tratar de duplicar la capacidad de almacenaje y trabajo de la empresa, además de mantener la misma estética para poder unir ambas naves. Este diseño se realiza de forma que resulte un proyecto lo más económico, eficiente y sostenible posible.

Palabras clave: Estructura, metálica, nave, CYPE, diseño 3D, acero

1. Introducción

Para realizar un diseño y desarrollo de una estructura metálica para la construcción de una nave industrial es necesario conocer cada una de las características necesarias para la utilidad de dicha nave, dado que hace falta dicha información para la estimación de las cargas que puede llegar a sufrir la estructura, por lo que deberá estar preparada para cada una de las situaciones adversas que pueden surgir en su entorno.

Este proyecto se estudiará en base a la ampliación de la nave industrial requerida por la empresa Perfiles Aragón, situando la nave en el municipio de Épila, Zaragoza. La construcción de la nave industrial requerida viene determinada por unas medidas específicas impuestas por la empresa, ya que se trata de realizar una ampliación a base de duplicar la capacidad tanto de producción como de trabajo. Por ello, se quieren mantener las mismas características y estética de la nave industrial ya existente, teniendo en cuenta la misma altura, fachada, pórticos y materiales similares para ayudar a la agrupación de ambas naves.

La actual nave industrial viene determinada por las siguientes medidas: 140,5 metros de largo, 136 metros de ancho, 17,5 metros de altura de cumbrera con un 7% de inclinación, siendo la cubierta a dos aguas. Con estas medidas, se trata de realizar un diseño de una nave industrial acorde a las características requeridas.

2. Definición del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es diseñar una estructura metálica lo más económica posible atendiendo a la normativa para el correcto desarrollo de la nave industrial.

Para realizar este diseño, se estudiarán las cargas que puede sufrir la estructura según su ubicación, utilización y desarrollo de su actividad industrial. Por otro lado, se va a diseñar la estructura mediante dos métodos, desarrollando los cálculos paso por paso cumpliendo con la normativa de construcción, el Código Técnico de la Edificación (CTE), y realizando el diseño en un programa de cálculo de estructuras, en este caso CYPE para

ingenieros. Por ello, se realizará una pequeña comparación entre los resultados obtenidos en ambos casos para analizar las diferencias y ver cuál es el mejor método de resolución.

3. Planteamiento del problema

Para realizar los cálculos de la estructura metálica es necesario conocer todas las características necesarias, desde cada una de las medidas que se van a tener en cuenta hasta las cargas que sufrirá dicha estructura.

Sabiendo que la nave tiene unas dimensiones de 140,5 metros de largo, 136 metros de ancho, 17,5 metros de altura de cumbrera con un 7% de inclinación, es decir, el punto más bajo es de 12,5 metros de alto, con un ángulo de inclinación de la cubierta a dos aguas de $4,2^\circ$, se ha decidido realizar los pórticos de celosía mediante el tipo de celosía Pratt, ya que es el más utilizado en construcciones industriales.

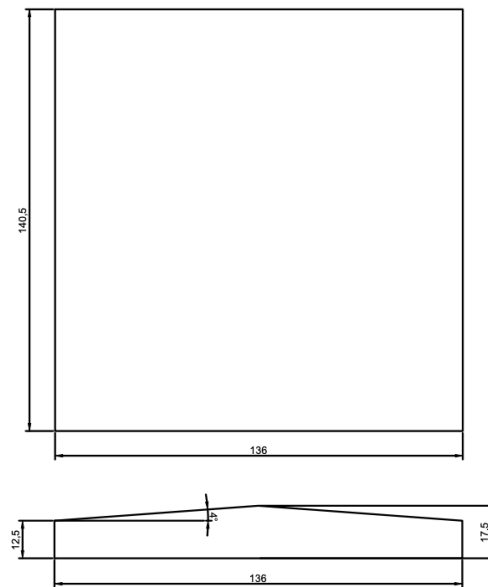


Figura 1. Medidas de la nave industrial

Además, por un lado, se tienen los pórticos de celosía, los cuales cuentan con un total de 5 pilares de soporte, los cuales se encuentran separados entre ellos por 34 metros. Por otro lado, en los pórticos de fachada se ha diseñado que haya un total de 21 pilares sujetando dicho pórtico, los cuales se encuentran separados por 6,8 metros, ya que, si la longitud de las correas es grande, puede haber problemas de flexión.

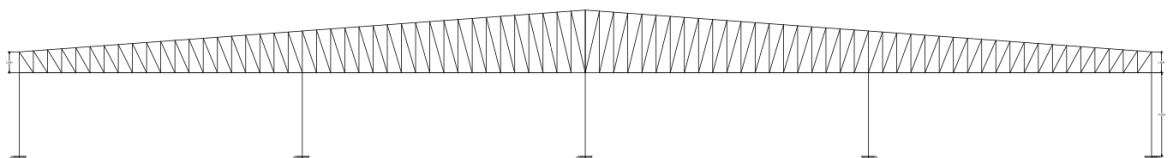


Figura 2. Estructura metálica del pórtico de celosía

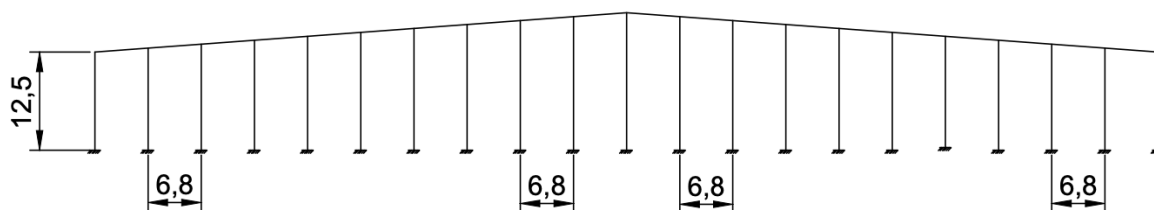


Figura 3. Estructura metálica del pórtico de fachada

También es necesario conocer la distancia entre correas de cubierta, es decir, la distancia entre montantes, la cual será de 1,7 metros. También se conoce la distancia entre los vanos de los pórticos que, calculando mediante los momentos flectores, sale que los vanos exteriores tienen una medida de 5,04 metros y los interiores de 5,93 metros, debido a la flexión de las correas de cubierta.

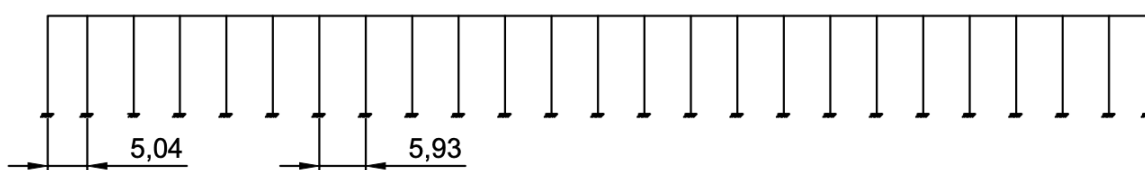


Figura 4. Estructura metálica del lateral de la nave industrial

Conocidas todas las medidas necesarias para el desarrollo de los cálculos, se requiere realizar un estudio de las cargas, teniendo en cuenta tanto las cargas permanentes, en las cuales se incluyen el peso propio de la estructura, el peso propio de la cubierta siendo en este caso realizada mediante paneles de tipo sándwich, y el peso de futuros paneles fotovoltaicos, como las cargas variables, en las cuales se encuentran la carga debida al viento, la carga de nieve y la sobrecarga de uso por mantenimiento. Dichas cargas se calculan siguiendo la normativa especificada en el CTE. [1][2]

Habiendo calculado todas las hipótesis de cargas que pueden llegar a afectar a la estabilidad y resistencia de la estructura metálica de la nave industrial, se obtienen las siguientes cargas totales.

<i>Carga Total Correas ($q_{kTcorreas}$)</i>	<i>Carga Total Celosías ($q_{kTcelosías}$)</i>	<i>Coeficiente Parcial de Seguridad Total (γ_T)</i>	<i>Carga Total Mayorada Correas ($q_{dTcorreas}$)</i>	<i>Carga Total Mayorada Celosías ($q_{dTcelosías}$)</i>
1,238 kN/m ²	1,538 kN/m ²	1,444	1,815 kN/m ²	2,220 kN/m ²

Tabla 1. Cargas totales sobre la estructura metálica de la nave industrial

Con estos datos realizados en el planteamiento del problema, se realizan los dos métodos de cálculo de los perfiles necesarios que componen la estructura metálica de la nave industrial.

4. Resultados

Tras el cálculo por ambos métodos de la estructura metálica de la nave industrial solicitada, se han obtenido los siguientes resultados.

<i>Partes de la estructura</i>	<i>Perfiles de los cálculos</i>	<i>Perfiles de CYPE</i>
Pilares de Fachada	HEB 240	HEB 300
Pilares de Celosías	HEB 220	HEB 240
Correas Laterales	IPE 270	IPE 360
Correas de Fachada	IPE 270	IPE 400
Correas de Cubierta	IPE 120	IPE 400
Correa de Cumbra de Cubierta	IPE 120	IPE 330
Arriostramientos	FL 100x40	FL 40x12
Montantes Exteriores	#120.6	#120.6
Montantes Interiores	#120.6	#120.5
Diagonales	#80.4	#140.6
Cordón Inferior	#120.6	#140.5
Cordón Superior	#120.6	#140.8

Tabla 2. Resultados de la estructura metálica diseñada

Por otro lado, se ha realizado el diseño en CAD, mediante Solid Edge, del prototipo de la estructura para la posible impresión de 3D de un modelo, a escala 1:1000.

Por último, se ha propuesto un presupuesto de los perfiles metálicos escogidos para el diseño de la nave industrial tras realizar una comparación de precios del mercado actual. Por ello, el presupuesto de la estructura metálica sería de UN MILLÓN TRESCIENTOS NUEVE MIL OCHOCIENTOS CUARENTA Y UN EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS.

<i>Tipo de perfil</i>	<i>Precio final por producto</i>
HEB 300	55.940,63 €
HEB 240	73.195,20 €
IPE 360	61.372,51 €
IPE 400	639.065,70 €
IPE 330	5.277,39 €
FL 40x12	4.599,19 €
#120.6	13.969,08 €
#120.5	129.264,60 €
#140.5	65.760,61 €
#140.6	169.402,49 €
#140.8	91.994,48 €
TOTAL	1.309.841,96 €

Tabla 3. Presupuesto de la estructura metálica diseñada

5. Conclusiones

Tras realizar los cálculos y comparando los resultados de ambos métodos de diseño, se puede observar que existe una diferencia considerable entre los perfiles diseñados mediante cálculos y los diseñados por el programa CYPE, los cuales son mayores.

Esto es debido a que el programa tiene en cuenta la totalidad del peso propio de la estructura diseñada. Sin embargo, en los cálculos realizados a mano se considera un único elemento de cada tipo, escogiendo el más restrictivo y desfavorable, para el dimensionamiento de toda la estructura, por lo que no tiene en cuenta el peso total de cada uno de los elementos de la nave industrial.

Por tanto, se podría decir que el mejor método para el diseño y cálculo de estructuras metálicas para construcciones industriales es mediante programas de cálculo de estructuras, ya que realiza un análisis más profundo de las cargas, siempre y cuando se comprueben todos los cálculos con la normativa de construcción establecida.

6. Referencias

- [1] *Seguridad Estructural.* (s. f.).
<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/SeguridadEstructural.html>
- [2] *DBSE.pdf.* (s. f.).
<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE.pdf>

ANALYSIS AND DEVELOPMENT IN 3D OF THE STEEL STRUCTURE OF AN INDUSTRIAL BUILDING

Author: Añón Suárez, Andrea.

Supervisor: Awad Parada, Tamar.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Starting from an existing project, this Project is about designing, analyzing, drawing in CAD and modeling a 3D prototype of the metal structure of the extension of a existing industrial building. Based on the measurements of the current building, the aim is to design an extension of the existing building with similar measurements and characteristics in order to duplicate the storage and work capacity of the company, as well as maintaining the same aesthetics to be able to join both buildings. This design is made so that the project is as economical, efficient and sustainable as possible.

Keywords: Structure, metal, warehouse, CYPE, 3D design, steel

1. Introduction

In order to design and develop a metallic structure for the construction of an industrial building, it is necessary to know each of the necessary characteristics for the usefulness of the building, since this information is needed to estimate the loads that the structure may suffer, so it must be prepared for each of the adverse situations that may arise in its environment.

This project will be studied based on the expansion of the industrial building required by the company Perfiles Aragón, located in the town of Épila, Zaragoza. The construction of the industrial building required is determined by specific measures imposed by the company, since it is an expansion based on doubling the capacity of both production and work. Therefore, we want to maintain the same characteristics and aesthetics of the existing industrial building, taking into account the same height, front, porches and similar materials to help the grouping of both buildings.

The current industrial building is determined by the following measurements: 140.5 meters long, 136 meters wide, 17.5 meters high at the ridge with a 7% slope, with a gable roof. With these measurements, the aim is to design an industrial building according to the required characteristics.

2. Project definition

The main objective of this project is to design a metallic structure as economical as possible in compliance with the regulations for the correct development of the industrial building.

In order to carry out this design, the loads that the structure can suffer according to its location, use and development of its industrial activity will be studied. On the other hand, the structure will be designed using two methods, developing the calculations step by step in compliance with the building regulations, the Código Técnico de la Edificación (CTE), and performing the design in a structural calculation program, in this case CYPE

for engineers. Therefore, a small comparison will be made between the results obtained in both cases to analyze the differences and see which is the best method of resolution.

3. Problem statement

In order to perform the calculations of the metallic structure it is necessary to know all the necessary characteristics, from each of the measures to be taken into account to the loads that the structure will undergo.

Knowing that the building is 140.5 meters long, 136 meters wide, 17.5 meters high at the ridge with a 7% slope, i.e. the lowest point is 12.5 meters high, with a pitch angle of the gable roof of 4.2° , it was decided to use the Pratt lattice type, as it is the most commonly used in industrial buildings.

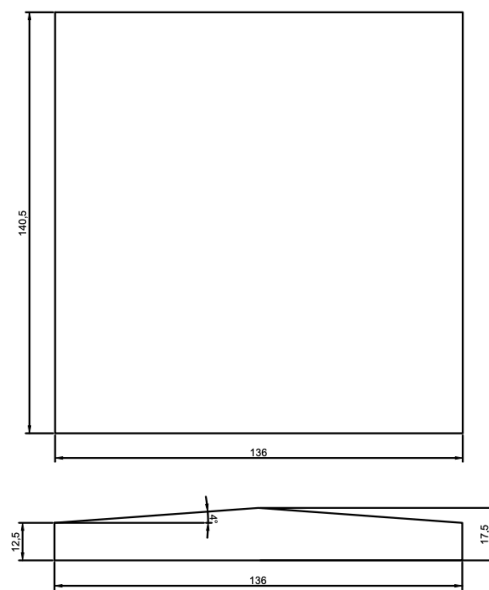


Figure 1. Industrial building dimensions

In addition, on the one hand, there are the lattice girders, which have a total of 5 supporting pillars, which are separated by 34 meters. On the other hand, in the facade portal frames, a total of 21 pillars have been designed to support the portal frames, which are separated by 6.8 meters, since, if the length of the purlins is large, there may be bending problems.

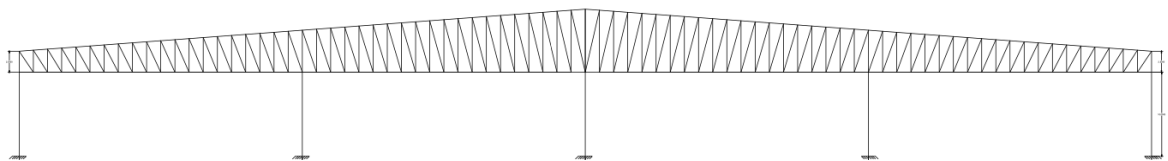


Figure 2. Metal structure of the lattice portal frame

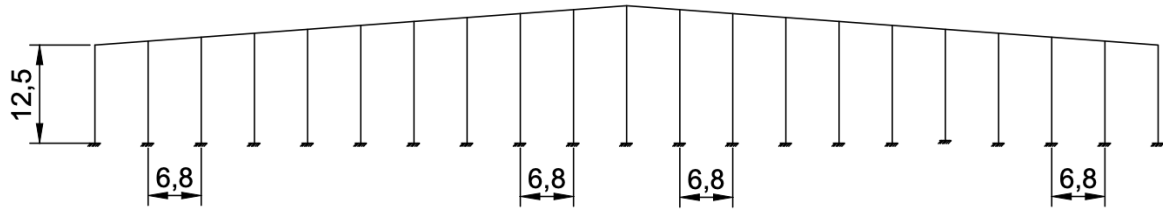


Figure 3. Metal structure of the facade portal frame

It is also necessary to know the distance between roof purlins, i.e. the distance between uprights, which will be 1.7 meters. It is also necessary to know the distance between the spans of the portal frames which, calculated by means of the bending moments, gives an external span of 5.04 meters and an internal span of 5.93 meters, due to the bending of the roof purlins.

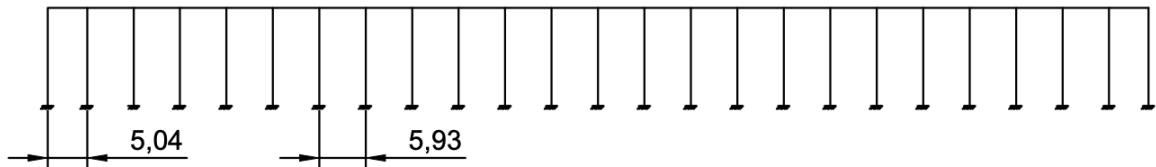


Figure 4. Metal structure of the side of the industrial building

Once all the necessary measurements for the development of the calculations are known, a study of the loads is required, taking into account both the permanent loads, which include the own weight of the structure, the own weight of the roof being in this case made by sandwich panels, and the weight of future photovoltaic panels, and the variable loads, which include the wind load, the snow load and the maintenance overload. These loads are calculated according to the regulations specified in the CTE. [1][2]

Having calculated all the load hypotheses that may affect the stability and resistance of the steel structure of the industrial building, the following total loads are obtained.

<i>Purlins Total Load</i> ($q_{kTcorreas}$)	<i>Lattice Total Load</i> ($q_{kTcelosias}$)	<i>Total Partial Safety</i> <i>Ratio (γ_T)</i>	<i>Total Increased</i> <i>Total Load Purlins</i> ($q_{dTcorreas}$)	<i>Total Increased</i> <i>Total Load Lattice</i> ($q_{dTcelosias}$)
1,238 kN/m ²	1,538 kN/m ²	1,444	1,815 kN/m ²	2,220 kN/m ²

Table 1. Total loads on the steel structure of the industrial building

With these data, the two methods of calculation of the necessary profiles that compose the metallic structure of the industrial building are carried out.

4. Results

After the calculation by both methods of the steel structure of the requested industrial building, the following results have been obtained.

<i>Parts of the structure</i>	<i>Calculation profiles</i>	<i>CYPE profiles</i>
Facade Pillars	HEB 240	HEB 300
Lattice Pillars	HEB 220	HEB 240
Side Purlins	IPE 270	IPE 360
Facade Purlins	IPE 270	IPE 400
Roof Purlins	IPE 120	IPE 400
Roof top Purlins	IPE 120	IPE 330
Bracing	FL 100x40	FL 40x12
Exterior Uprights	#120.6	#120.6
Interior Uprights	#120.6	#120.5
Diagonals	#80.4	#140.6
Lower Cord	#120.6	#140.5
Upper Cord	#120.6	#140.8

Table 2. Results of the designed metallic structure

On the other hand, a CAD design has been made, using Solid Edge, of the prototype of the structure for the possible 3D printing of a model, at a scale of 1:1000.

Finally, a budget has been proposed for the metal profiles chosen for the design of the industrial building after a price comparison of the current market. Therefore, the budget for the metallic structure would be ONE MILLION THREE HUNDRED NINE THOUSAND EIGHT HUNDRED FORTY-ONE EUROS AND NINETY-SIX CENTS.

<i>Profile type</i>	<i>Final price per product</i>
HEB 300	55.940,63 €
HEB 240	73.195,20 €
IPE 360	61.372,51 €
IPE 400	639.065,70 €
IPE 330	5.277,39 €
FL 40x12	4.599,19 €
#120.6	13.969,08 €
#120.5	129.264,60 €
#140.5	65.760,61 €
#140.6	169.402,49 €
#140.8	91.994,48 €
TOTAL	1.309.841,96 €

Table 3. Estimate price of the designed steel structure

5. Conclusions

After performing the calculations and comparing the results of both design methods, it can be seen that there is a considerable difference between the profiles designed by calculations and those designed by the CYPE program, which are bigger.

This is because the program takes into account the total self-weight of the designed structure. However, in the calculations performed by hand, only one element of each type is considered, choosing the most restrictive and unfavorable one, for the sizing of the whole structure, so it does not take into account the total weight of each of the elements of the industrial building.

Therefore, it could be said that the best method for the design and calculation of steel structures for industrial constructions is by means of structural calculation programs, since it performs a deeper analysis of the loads, as long as all calculations are checked with the established construction regulations.

6. References

- [1] *Seguridad Estructural.* (s. f.).
<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/SeguridadEstructural.html>
- [2] *DBSE.pdf.* (s. f.).
<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE.pdf>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1 Motivación del proyecto	9
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías	11
Capítulo 3. Estado de la Cuestión.....	12
Capítulo 4. Definición del Trabajo.....	17
4.1 Objetivos.....	17
Capítulo 5. Planteamiento de la Estructura.....	18
5.1 Descripción de la solución propuesta.....	18
5.1.1 Datos de la estructura.....	19
5.1.2 Medidas y distancias de la estructura.....	20
5.1.3 Materiales utilizados.....	24
5.1.4 Elección de cerramientos.....	25
5.2 Estudio de las cargas	26
5.2.1 Acciones permanentes.....	27
5.2.2 Acciones variables	28
5.2.3 Carga total sobre la estructura.....	38
5.2.4 Limite de flecha.....	38
Capítulo 6. Desarrollo de los Cálculos de la Estructura	39
6.1 Cálculo de las correas de cubierta.....	39
6.1.1 Comprobación de flecha	40
6.1.2 Repercusión por metro cuadrado del peso propio.....	41
6.1.3 Uniones de las correas en momento nulo	41
6.2 Cálculo de las celosías	42
6.2.1 Esfuerzos cortantes y flectores de las celosías	42
6.2.2 Esfuerzos en las barras de las celosías.....	46
6.2.3 Dimensionado de barras comprimidas	49
6.2.4 Dimensionado de barras traccionadas	51
6.2.5 Comprobación de flecha	52

6.2.6 Repercusión por metro cuadrado del peso propio.....	52
6.3 Cálculo de los arriostramientos.....	53
6.3.1 Dimensionado de los arriostramientos	54
6.3.2 Normal añadido por los arriostramientos	54
6.4 Cálculo de pilares.....	55
6.4.1 Pilares de las celosías.....	56
6.4.2 Pilares de la fachada	57
6.5 Cálculo de las correas de fachada	58
6.5.1 Comprobación de flecha	60
6.5.2 Repercusión por metro cuadrado del peso propio.....	60
Capítulo 7. Desarrollo del Diseño con el Software CYPE.....	61
7.1 Introducción de hipótesis iniciales.....	61
7.2 Diseño de la estructura.....	62
7.3 Introducción de cargas	63
7.4 Dimensionado de la cimentación	64
7.5 Resultados	66
7.6 Comparativa de resultados entre cálculos y CYPE.....	70
7.7 Desarrollo de un prototipo en 3D.....	72
Capítulo 8. Presupuesto del Proyecto.....	74
8.1 Resumen de perfiles utilizados	74
8.2 Longitud total de cada perfil	75
8.3 Peso de cada perfil	75
8.4 Comparativa de precios del mercado	76
8.5 Presupuesto final	78
Capítulo 9. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	80
9.1 ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructuras	80
9.2 ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles	81
9.3 ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante	81
9.4 ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico	81
Capítulo 10. Conclusiones	82
Capítulo 11. Bibliografía.....	84

<i>ANEXO I. PLANOS.....</i>	<i>86</i>
<i>ANEXO II. NAVE CON PUENTE GRÚA</i>	<i>87</i>
<i>ANEXO III. PRONTUARIO</i>	<i>88</i>
I. Perfiles IPE	88
II. Perfiles HEB	89
III. Perfiles Rectangulares.....	90
IV. Perfiles Huecos Cuadrados	91

Índice de figuras

Figura 1. Medidas de la nave industrial	8
Figura 2. Estructura metálica del pórtico de celosía	8
Figura 3. Estructura metálica del pórtico de fachada	9
Figura 4. Estructura metálica del lateral de la nave industrial	9
Figura 5. Palacio de Cristal. Fuente: (CUBA, s. f.)	12
Figura 6. Construcción del Crystal Palace por Joseph Paxton. Fuente: (Crystal Palace por Joseph Paxton, s. f.).....	13
Figura 7. Construcción de la Torre Eiffel. Fuente: (La Torre Eiffel, 2023).....	13
Figura 8. Biblioteca de Santa Genoveva. Fuente: (La guía de Historia del Arte, s. f.).....	14
Figura 9. Tipos de armadura. Fuente: (Curso: Construcciones Industriales, s. f.).....	15
Figura 10. Tipos de cerchas. Fuente: (Curso: Construcciones Industriales, s. f.).....	15
Figura 11. Tipos de celosías. Fuente: (Curso: Construcciones Industriales, s. f.)	16
Figura 12. Planta y alzado de la nave industrial.....	19
Figura 13. Estructura de las celosías	20
Figura 14. Pilares de fachada	20
Figura 15. Separación entre correas	21
Figura 16. Detalle de la numeración de las barras de las celosías	21
Figura 17. Vanos de tipo exterior.....	23
Figura 18. Diagrama de momento flector del vano exterior	23
Figura 19. Vanos de tipo interior	23
Figura 20. Diagrama de momento flector del vano interior.....	24
Figura 21. Distancia entre vanos	24
Figura 22. Características del panel sándwich HiRock para la cubierta. Fuente: (Hiansa, s. f.-a).....	26
Figura 23. Características del panel sándwich HiRock para la fachada. Fuente:(Hiansa, s. f.-b)	26
Figura 24. Tabla de coeficientes parciales de seguridad. Fuente: (DBSE.pdf, s. f.).....	28
Figura 25. Valores de las sobrecargas de uso. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)	29

Figura 26. Zonas climáticas de invierno. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.).....	30
Figura 27. Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.).....	30
Figura 28. Valor de la velocidad del viento. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.).....	32
Figura 29. Valores del coeficiente de exposición. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.) ...	32
Figura 30. Identificación de zonas laterales afectadas por el viento. Fuente:(Seguridad Estructural, s. f.).....	33
Figura 31. Coeficientes de presión según las zonas laterales de la nave. Fuente:(Seguridad Estructural, s. f.).....	33
Figura 32. Identificación de zonas de la cubierta afectadas por el viento lateral. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)	34
Figura 33. Coeficientes de presión según las zonas de la cubierta por viento lateral. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)	34
Figura 34. Identificación de zonas de la cubierta afectadas por el viento frontal. Fuente:(Seguridad Estructural, s. f.).....	35
Figura 35. Coeficientes de presión según las zonas de la cubierta por viento frontal. Fuente:(Seguridad Estructural, s. f.).....	35
Figura 36. Coeficientes de presión interior. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.).....	37
Figura 37. Diagrama del momento flector	41
Figura 38. Momento flector en función de distancias.....	42
Figura 39. Boceto de las reacciones de la celosía	43
Figura 40. Curvas de pandeo. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)	50
Figura 41. Valores del coeficiente de pandeo. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.).....	50
Figura 42. Momento en el punto A	55
Figura 43. Estructura metálica de las celosías.....	62
Figura 44. Estructura metálica del pórtico de fachada.....	63
Figura 45. Vista lateral de la nave industrial.....	63
Figura 46. Estructura metálica completa.....	63
Figura 47. Zapatas de la nave industrial.....	65
Figura 48. Zapatas parte inferior y derecha.....	65

Figura 49. Zapatas parte superior, izquierda y central	66
Figura 50. Detalle de las fachadas de fondo de la nave industrial	67
Figura 51. Detalle de las celosías de la nave industrial.....	68
Figura 52. Detalle de fachada lateral de la nave industrial	69
Figura 53. Diseño de prototipo en 3D de la fachada de fondo.....	72
Figura 54. Diseño de prototipo en 3D de un pórtico de celosía	73

Índice de tablas

Tabla 1. Cargas totales sobre la estructura metálica de la nave industrial	9
Tabla 2. Resultados de la estructura metálica diseñada	10
Tabla 3. Presupuesto de la estructura metálica diseñada	11
Tabla 4. Altura de montantes	22
Tabla 5. Características del acero S275	25
Tabla 6. Acciones permanentes.....	27
Tabla 7. Total carga permanente.....	28
Tabla 8. Coeficientes de presión exterior críticos	36
Tabla 9. Presión estática del viento.....	37
Tabla 10. Total carga variable.....	38
Tabla 11. Cargas totales sobre la estructura.....	38
Tabla 12. Cargas que actúan sobre las correas de cubierta	39
Tabla 13. Momentos de los vanos.....	39
Tabla 14. Flechas de las correas de cubierta	40
Tabla 15. Cargas totales sobre la celosía.....	42
Tabla 16. Reacciones en los apoyos de la celosía	43
Tabla 17. Esfuerzos cortantes sobre la celosía.....	44
Tabla 18. Esfuerzos flectores sobre la celosía.....	45
Tabla 19. Esfuerzo normal para dimensionamiento del cordón inferior.....	46
Tabla 20. Esfuerzo normal para dimensionamiento del cordón superior.....	47
Tabla 21. Esfuerzo normal para dimensionamiento las diagonales	48
Tabla 22. Esfuerzo normal para dimensionamiento los montantes.....	48
Tabla 23. Flecha total de la celosía	52
Tabla 24. Pesos propios de las barras de las celosías.....	53
Tabla 25. Cargas que actúan sobre las correas de cubierta	59
Tabla 26. Momentos según los ejes	59
Tabla 27. Módulos resistentes calculados.....	59
Tabla 28. Flechas de las correas de cubierta	60

Tabla 29. Componentes de las fachadas de fondo de la estructura metálica	67
Tabla 30. Componentes de la cubierta de la estructura metálica	68
Tabla 31. Componentes de las celosías de la estructura metálica	69
Tabla 32. Componentes de las fachadas laterales de la estructura metálica	70
Tabla 33. Comparación de resultados de cálculo y CYPE.....	71
Tabla 34. Resumen de perfiles de la estructura metálica	74
Tabla 35. Longitud total de cada perfil	75
Tabla 36. Pesos totales de los perfiles.....	76
Tabla 37. Comparación de precios para perfiles laminados.....	77
Tabla 38. Comparación de precios para perfiles planos.....	77
Tabla 39. Comparación de precios para tubos	78
Tabla 40. Presupuesto de la estructura metálica	79

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción en España se está desarrollando cada vez más en los últimos años, sobre todo en el sector de la industria metalúrgica, consiguiendo, en la medida de lo posible, la máxima eficiencia y sostenibilidad, además de una mayor reducción de costes, siempre y cuando se cumpla el Código Técnico de la Edificación de España. Por ello, este Trabajo de Fin de Máster tratará de conseguir un diseño, análisis, dibujo y un pequeño desarrollo de un prototipo en 3D para proponer un proyecto de construcción, lo más económico, eficiente y sostenible posible, de una estructura metálica correspondiente a una nave industrial.

Para el estudio y cálculo de una estructura metálica para una nave industrial es necesario desarrollar toda la documentación necesaria para la elaboración de un proyecto constructivo, es decir, conocer todas las características necesarias para su correcto desarrollo, además de tener en cuenta todos los requisitos impuestos para la futura utilización de dicha nave, ya que se necesitará dicha información para la estimación de cargas que sufrirá la estructura y para el propio diseño de la nave.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

De cara a la realización de este Trabajo de Fin de Máster, se ha buscado un proyecto lo más real posible para conseguir que la estructura metálica a diseñar tenga unas características y unos requisitos acordes a los demandados en la actualidad por las distintas industrias, no solo en la industria metalúrgica.

Dada la gran demanda de servicios personalizados para la venta de productos metálicos de acero, en especial perfiles estructurales, además de ángulos, pletinas y tubo estructural, el Centro de Servicios Épila perteneciente a la empresa Perfiles Aragón, situado en el municipio de Épila, perteneciente a la provincia de Zaragoza, necesita ampliar sus instalaciones, duplicando en tamaño la nave industrial actual de la empresa.

La ampliación de este establecimiento industrial será destinada al almacenaje de perfiles metálicos con mecanizado, ya que se pretende disponer de una mayor capacidad de almacenaje y poder ampliar las líneas de mecanizado. Estas líneas de mecanizado constan de máquinas de corte, entalladoras y máquinas de perforación, las cuales son maquinaria de última generación que constan de accionamientos robotizados y tanto la alimentación como la retirada de los productos están automatizadas.

La construcción de esta nave industrial viene determinada por unas medidas específicas requeridas por la empresa, ya que se pretende realizar una ampliación de la nave ya existente, por lo que se quiere mantener la misma fachada, la misma altura de cubierta, pórticos similares a los ya existentes y materiales con las mismas características a los ya utilizados, agrupando así estéticamente ambas naves industriales.

La nave industrial actual, siendo únicamente de planta baja, consta de las siguientes dimensiones: con un total de 19.108 metros cuadrados, tiene 140,5 metros de longitud y 136 metros de ancho. Además, consta de una altura máxima, es decir, el punto más alto de la cubierta es de 17,5 metros, donde la altura más baja será de 12,5 metros, es decir, una inclinación del 7% aproximadamente, ya que la cubierta está a dos aguas.

De la misma manera, se conoce que se necesita la instalación en cada uno de los pórticos puentes grúa para la carga y descarga de los perfiles a lo largo de la nave, pudiendo ser sustituidos por pórticos grúa situados mediante guías en el suelo de la nave en vez de puentes soportados por los pilares. Por otro lado, también se tendrá en cuenta la posibilidad de la posterior instalación de paneles solares en la cubierta de la nave, ya que influye en la carga total prevista que debe soportar la estructura metálica en su totalidad.

Con toda la información necesaria para el correcto desarrollo del proyecto, la cual se mostrará en el Capítulo 5. , se llevará a cabo el estudio y cálculo de la estructura metálica de esta nave industrial requerida.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Dadas las medidas de la nave industrial que se desea diseñar y calcular, se procede a realizar el proyecto siguiendo una serie de pasos determinados y con la ayuda de distintos recursos, los cuales se definirán en este capítulo.

Para llevar a cabo los distintos cálculos y optimización de la estructura metálica de la nave industrial se tendrá en cuenta la normativa impuesta por el Código Técnico de la Edificación de España, además de las distintas fórmulas que se necesiten para el correcto desarrollo del proyecto.

El Código Técnico de la Edificación defina las distintas normativas que deben cumplir todos los edificios en proceso de construcción debido a los requisitos básico de seguridad y habitabilidad, ayudando así a mantener la seguridad de todas las personas y la protección del medio ambiente.

Dentro del Código Técnico de la Edificación (CTE), se hará uso de los documentos básicos de seguridad estructural destinados a diferentes propósitos, como son el DB SE-A destinado a la seguridad estructural del acero y el DB SE-AE el cual define las acciones en la edificación.

Por otro lado, se hará uso del software CYPE para ingenieros, en concreto el módulo de CYPE 3D, para realizar el diseño y cálculo de la estructura en su conjunto, además de las cimentaciones de la nave industrial.

Posteriormente, se utilizarán herramientas de CAD como AutoCAD, ya que trabaja en 2D para realizar los planos de la estructura diseñada anteriormente.

Por último, se utilizará el programa de CAD Solid Edge para realizar el diseño en 3D del prototipo de la nave industrial.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Las estructuras metálicas han sido, a lo largo de la historia, una de las principales formas de construcción alrededor de todo el mundo. Se han construido con este tipo de estructura desde palacios o museos hasta estaciones de metro o edificios de viviendas.

Tras la Revolución Industrial, en el siglo XIX, se empezó a elaborar una arquitectura basada en estructuras de hierro, ya que se comenzó a elaborar el hierro fundido en grandes cantidades y se desarrolló el hierro forjado debido al invento de la laminación para crear grandes vigas. Con ello, se comenzó la llamada Arquitectura del Hierro, la cual dio lugar a grandes monumentos históricos. [1]

Uno de los ejemplos de estructuras metálicas más conocido es el Palacio de Cristal del Parque del Retiro, situado en Madrid y diseñado por el arquitecto español Ricardo Velázquez Bosco. Este recinto sirve como una sede expositiva de la mano del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía. [2]



Figura 5. Palacio de Cristal. Fuente: (CUBA, s.f.)

Para el diseño del Palacio de Cristal, el arquitecto se inspiró en el Crystal Palace de Londres, diseñado a su vez por el famoso arquitecto inglés Joseph Paxton. El Crystal Palace fue construido en Hyde Park en el año 1851 para la Exposición Universal y, posteriormente, fue desmontado y trasladado al sur de Londres hasta su destrucción debido a un incendio en 1936. [3]

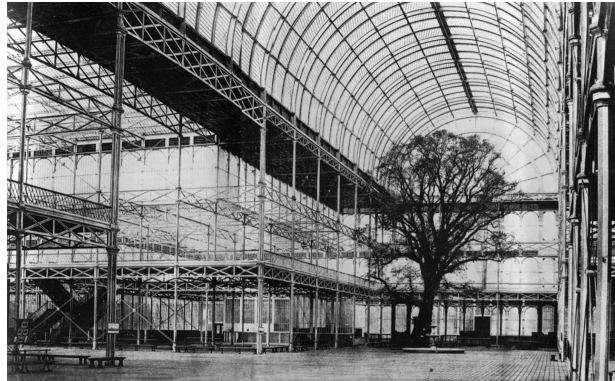


Figura 6. Construcción del Crystal Palace por Joseph Paxton. Fuente: (Crystal Palace por Joseph Paxton, s.f.)

Por otro lado, debido a la Exposición Universal de París de 1889, existen varios monumentos importantes en la ciudad que mantienen una estructura metálica, como lo son el Grand Palais y el Petit Palais, la antigua Estación de Orsay, ahora utilizada como museo y conocida como el Museo de Orsay, el antiguo Palacio de las Máquinas e incluso la Torre Eiffel, todos ellos dentro de la Arquitectura del Hierro. [4]

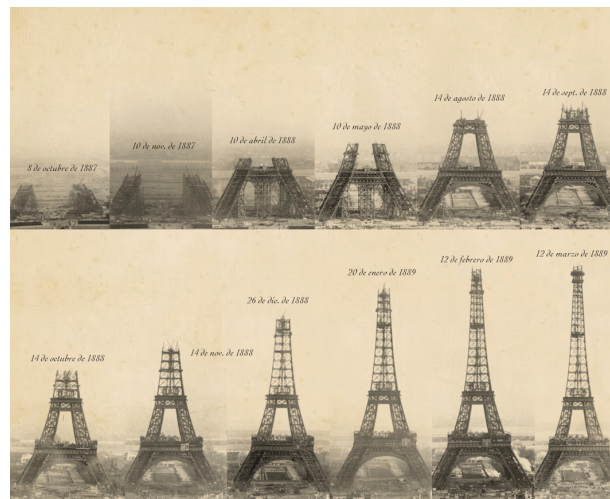


Figura 7. Construcción de la Torre Eiffel. Fuente: (La Torre Eiffel, 2023)

Además, existen otros edificios referentes de la Arquitectura del Hierro, como lo es la Biblioteca de Santa Genoveva, situada en París, diseñada por Henri Labrouste y finalizada en 1850 [5] , o también el puente de Luis I, situado en Oporto, Portugal, diseñado por Théophile Seyrig y finalizado en 1886 [6].



Figura 8. Biblioteca de Santa Genoveva. Fuente: (La guía de Historia del Arte, s. f.)

Teniendo en cuenta los distintos edificios históricos que se han construido mediante una estructura metálica, se va a proceder a analizar la construcción actual de edificios y naves industriales mediante este tipo de estructuras.

En la actualidad, en muchos países el uso de estructuras metálicas para el sector de la construcción es el método más común, dada la facilidad y rapidez que aporta ejecutar un edificio. Por ello, la mayoría de los rascacielos de Nueva York son contruidos mediante estructura metálica, ya que es la forma más común de construir en Estados Unidos y es más rápido que realizarlo con estructura de hormigón.

Mirando más en concreto en el sector industrial, el método de construcción más común de las naves industriales, tanto para uso de fabricación como para uso de almacenaje, es realizarlas con estructura metálica para, posteriormente, realizar los cerramientos con distintos métodos, como podría ser mediante panel sándwich o chapa metálica.

Dentro de todas las partes que conforman la estructura metálica de una nave industrial en su totalidad, una de las partes más importantes es el pórtico, ya que es el elemento que sujeta la mayoría de la carga que sufre la nave, ya sea por elementos externos o por otras estructuras de unión, como lo son las correas y arriostramientos, o los cerramientos. Las partes que conforman un pórtico son los pilares y las armaduras.

Existen diferentes tipos de armaduras para la construcción de pórticos, siendo las dos más importantes las armaduras tipo cerchas o el tipo celosía, las cuales se muestran en la

siguiente figura. Dependiendo de la situación y de los requisitos de carga de la estructura, se elige un tipo de armadura específico.

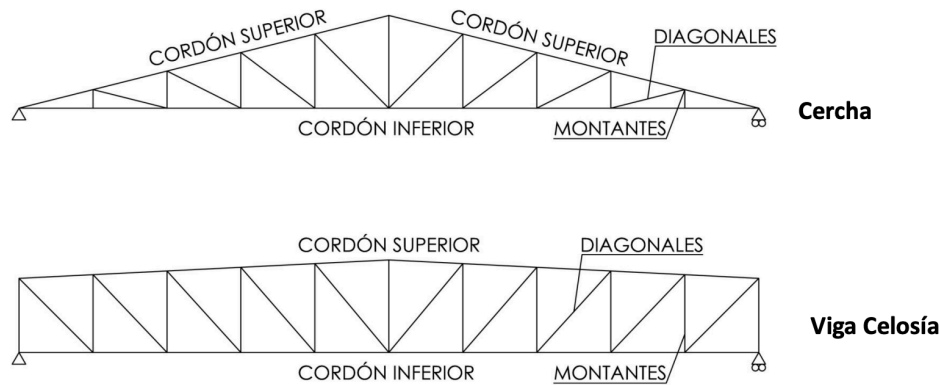


Figura 9. Tipos de armadura. Fuente: (Curso: Construcciones Industriales, s. f.)

A su vez, dentro de cada uno de estos tipos hay tres tipos, los cuales se explicarán a continuación.

Dentro de la tipología de cerchas, respectivamente siguiendo la Figura 10:

- Cercha Americana
- Cercha Inglesa
- Cercha Swan

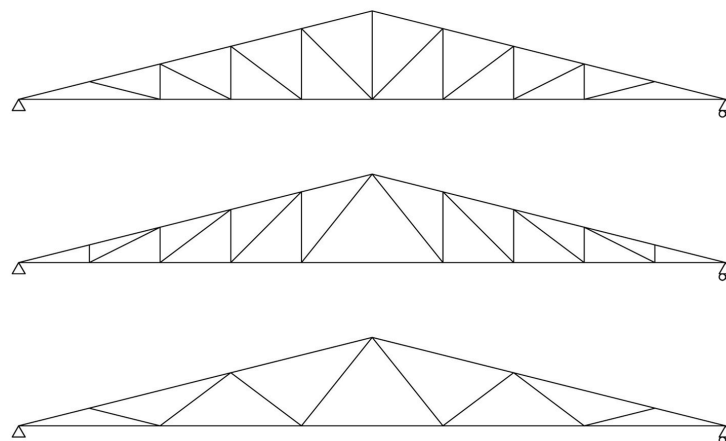


Figura 10. Tipos de cerchas. Fuente: (Curso: Construcciones Industriales, s. f.)

Dentro de la tipología de las vigas celosía, respectivamente siguiendo la imagen de la Figura 11:

- Viga Pratt. Es uno de los tipos de celosía más utilizados en la construcción de naves industriales. Este tipo de diseño proporciona una buena resistencia a la compresión y tracción.
- Viga Warren.
- Viga Howe.

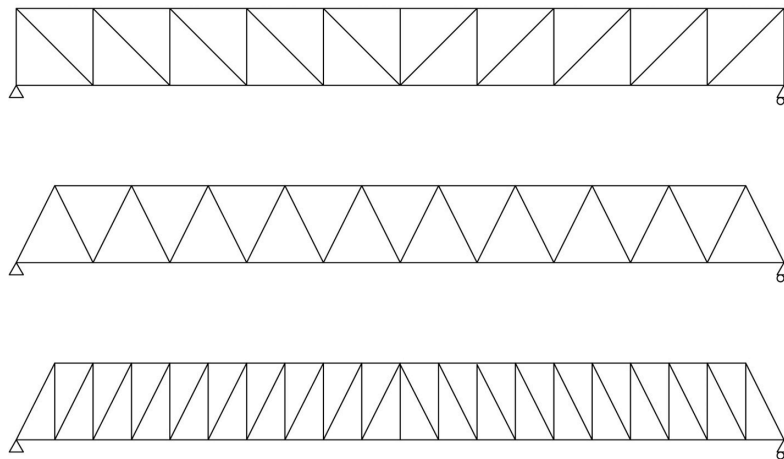


Figura 11. Tipos de celosías. Fuente: (Curso: Construcciones Industriales, s. f.)

Tras el análisis correcto de las cargas y la estructura que se desee realizar, se procederá a la elección del tipo de armadura más razonable para el desarrollo de los pórticos de la nave industrial que se va a diseñar.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster busca obtener una estructura metálica destinada para el desarrollo de la nave industrial en estudio lo más económica y sostenible posible atendiendo a la normativa establecida para su correcta construcción. Para ello, se tratará de seleccionar los materiales y perfiles para la estructura más adecuados y económicos posibles que mantengan las características adecuadas acordes a los cálculos realizados.

Por otro lado, para poder alcanzar el objetivo principal de este proyecto, el cual se ha mencionado anteriormente, se tratarán algunos objetivos secundarios. Para conseguir llegar a un proyecto lo más económico posible, se realizará una comparativa de precios del mercado para así poder realizar un presupuesto de los perfiles escogidos acorde a las necesidades del proyecto.

Además, se realizará un análisis de la ubicación de construcción final de la nave industrial, para así poder estimar todas las posibles cargas que pueda sufrir la estructura metálica, a parte de las impuestas por la empresa las cuales ayudan a realizar un correcto desarrollo de la actividad, como pueden ser las cargas de viento o nieve de la zona geográfica en la que se encuentra ubicada la nave.

Por último, se desarrollará una pequeña comparación entre los resultados obtenidos realizando los cálculos paso a paso y los resultados de CYPE, ya que actualmente se realizan todos los diseños mediante diferentes softwares y así se analizarán las diferencias con la teoría.

Capítulo 5. PLANTEAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

En este capítulo se explicarán los datos y decisiones iniciales que se deben considerar para realizar posteriormente el diseño de la estructura, tanto para los cálculos desarrollados como para el diseño con el software CYPE, además de analizar las cargas que actúan sobre la estructura.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

La necesidad de ampliación de la nave industrial actual se ve reflejada en la construcción de una nave de medidas y características similares a la actual, ya que se quiere duplicar la capacidad de la misma, teniendo en cuenta que la nave consta de una única altura, es decir, se trata de una edificación solamente de planta baja. Como se ha mencionado en el Capítulo 1. la nave se encuentra en el municipio de Épila, dentro de la provincia de Zaragoza.

Esta nueva nave industrial, al tratarse de una ampliación, debe mantener algunas de las características generales de la nave existente, por lo que se diseñará con una cubierta a dos aguas, teniendo en cuenta además la misma inclinación que la nave actual, que será del 7% aproximadamente.

Por otro lado, dados los distintos tipos de celosía explicados en el Capítulo 3. se ha escogido para este diseño la celosía de tipo Pratt, pudiendo haber escogido cualquiera de las utilizadas en la actualidad, pero ésta en específico es la celosía más habitual utilizada en las distintas construcciones industriales, sobre todo en las naves industriales, debido a que proporciona una buena resistencia tanto a la compresión como a la tracción.

Además, dadas las necesidades requeridas por la empresa, se deberán tener en cuenta las posibles sobrecargas que soportará la estructura diseñada en el caso de querer instalar tanto paneles solares en la cubierta como la posibilidad futura de instalar puentes grúa para

la distribución de los materiales dentro de la nave. Estas cargas se estudiarán posteriormente en el apartado de estudio de las cargas dentro de este mismo capítulo.

A continuación, se explicarán los distintos datos que se deben tener en cuenta de cara a realizar los cálculos de la estructura metálica de la nave industrial en estudio.

5.1.1 DATOS DE LA ESTRUCTURA

Como se ha mencionado con anterioridad, al querer duplicar la capacidad de la nave industrial existente, las medidas de la nueva nave deben ser similares, por lo que la estructura metálica a diseñar cuenta con 140,5 metros de longitud, 136 metros de ancho, también conocido como luz de la nave, y una altura máxima de cumbrera de 17,5 metros.

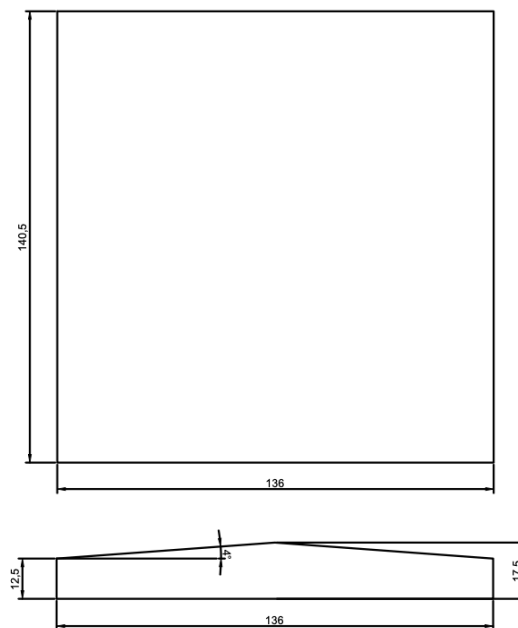


Figura 12. Planta y alzado de la nave industrial

Debido a la inclinación necesaria de aproximadamente el 7%, la altura más baja de la nave será de 12,5 metros de alto, situándose en los extremos laterales de la nave. Por ello, la inclinación real de la cubierta será de 7,4%, lo que se traduce en un ángulo de cubierta de 4,2°. Además, los pilares tendrán una altura de 10 metros, siendo los 2,5 metros restantes la altura de los montantes exteriores.

Además, dado que la luz de la nave es muy amplia, es necesario dividir la nave en cuatro para que la estructura de las celosías soporte todo el peso a considerar situado en la cubierta, teniendo así una celosía un total de cinco pilares separados entre ellos por una distancia de 34 metros, siendo dos de ellos los extremos y otro situado en el centro de la celosía, es decir, soportando la cumbrera de la nave, como se puede observar en la Figura 13.

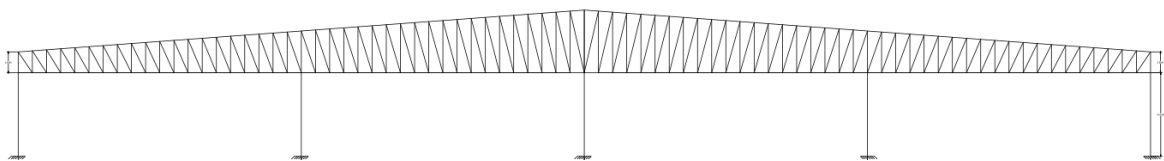


Figura 13. Estructura de las celosías

Por otro lado, ambos pórticos de fachada, tanto la fachada delantera como la trasera, no constan de una celosía, sino que están formadas por vigas soportadas por un conjunto de pilares. Para conseguir que estos pórticos puedan soportar las cargas de la cubierta, se dispondrán en cada una de las fachadas un total de veintiún pilares separados entre ellos por una distancia de 6,8 metros, como se observa en la Figura 14.

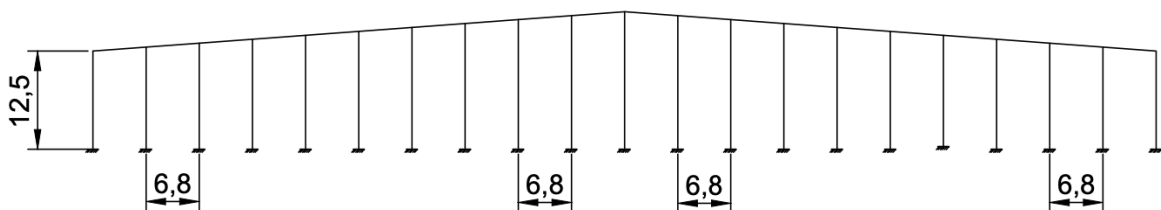


Figura 14. Pilares de fachada

5.1.2 MEDIDAS Y DISTANCIAS DE LA ESTRUCTURA

5.1.2.1 Separación entre correas de cubierta

Para el diseño de las celosías, es necesario especificar una separación entre montantes, teniendo en cuenta que las correas se situarán también a esa distancia, ya que se colocan sobre los puntos donde se encuentran los montantes. Como al tratarse de una ampliación se quiere hacer que la nueva nave industrial sea lo más similar posible a la ya existente, se utilizará la misma distancia entre las correas de la cubierta y los montantes,

siendo esta separación de 1,7 metros, es decir, se dividirán las celosías en ochenta secciones o recuadros, como se ha podido observar en la Figura 15.

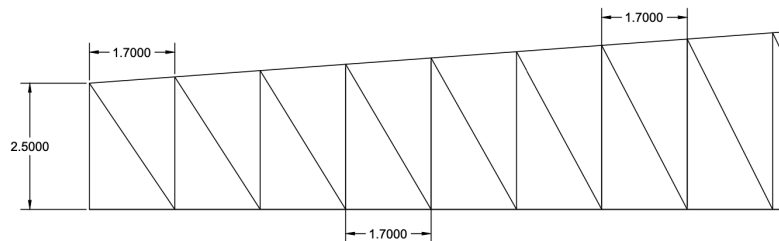


Figura 15. Separación entre correas

5.1.2.2 Altura de los montantes

Para poder realizar los posteriores cálculos, hay que conocer las distintas alturas de los montantes de la estructura de las celosías. Para ello, es necesario conocer la variación de altura con respecto a la inclinación de la cubierta, calculando esta variación según la fórmula E. 1, siendo d_{mont} la distancia entre montantes de 1,7 metros, $H_{m\acute{a}x}$ los 17,5 metros de altura máxima, $H_{m\acute{i}n}$ los 12,5 metros de altura mínima y luz los 36 metros de ancho de la nave, saliendo así una variación de altura de 0,13 metros por montante.

$$E. 1 \quad \Delta h = d_{mont} \cdot \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{\frac{luz}{2}}$$

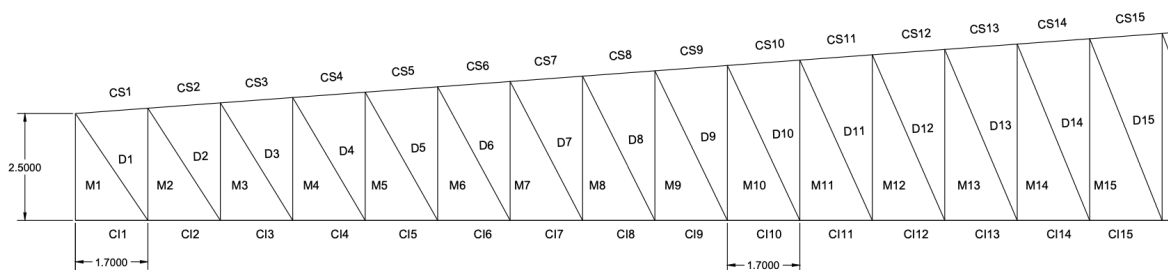


Figura 16. Detalle de la numeración de las barras de las celosías

Con todo esto, según la numeración que se mantiene en la Figura 16, las alturas de los montantes se muestran en la Tabla 4.

<i>Altura de montantes [m]</i>									
h_{mont1}	2,50	h_{mont9}	3,50	h_{mont17}	4,50	h_{mont25}	5,50	h_{mont33}	6,50
h_{mont2}	2,63	h_{mont10}	3,63	h_{mont18}	4,63	h_{mont26}	5,63	h_{mont34}	6,63
h_{mont3}	2,75	h_{mont11}	3,75	h_{mont19}	4,75	h_{mont27}	5,75	h_{mont35}	6,75
h_{mont4}	2,88	h_{mont12}	3,88	h_{mont20}	4,88	h_{mont28}	5,88	h_{mont36}	6,88
h_{mont5}	3,00	h_{mont13}	4,00	h_{mont21}	5,00	h_{mont29}	6,00	h_{mont37}	7,00
h_{mont6}	3,13	h_{mont14}	4,13	h_{mont22}	5,13	h_{mont30}	6,13	h_{mont38}	7,13
h_{mont7}	3,25	h_{mont15}	4,25	h_{mont23}	5,25	h_{mont31}	6,25	h_{mont39}	7,25
h_{mont8}	3,38	h_{mont16}	4,38	h_{mont24}	5,38	h_{mont32}	6,38	h_{mont40}	7,38
								h_{mont41}	7,50

Tabla 4. Altura de montantes

5.1.2.3 Distancia entre vanos

Es necesario diseñar la distancia entre vanos, es decir, entre las celosías de la estructura, a lo largo de la nave industrial, teniendo en cuenta los esfuerzos a flexión que sufren las correas. Por ello, es recomendable que la distancia entre apoyos de una barra no supere los 6 metros, para evitar así posibles problemas de flecha. Cuando se tienen perfiles simétricos, se tiene la misma capacidad de aguantar tanto momentos negativos como positivos, por lo que consiste en igual ambos momentos.

Por un lado, está el momento en los vanos exteriores, es decir, en los extremos y, al tratarse de una viga continúa apoyada, este vano se representa como se muestra en la Figura 17, estando en el extremo apoyada en un apoyo simple y en el corte se representa como un empotramiento.

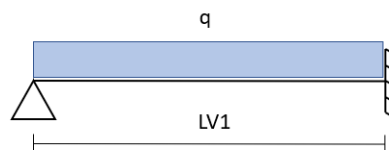


Figura 17. Vanos de tipo exterior

Dado este tipo de vanos, el momento flector que sufren se ve representado en la Figura 18, el cual cumple con la ecuación E. 2.

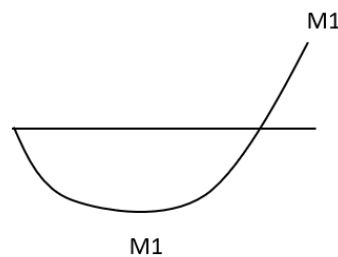


Figura 18. Diagrama de momento flector del vano exterior

$$E. 2 \quad M_1 = \frac{q \cdot L_{V1}^2}{11,67}$$

Por otro lado, está el momento en los vanos interiores, representándose como se muestra en la Figura 19, estando el vano empotrado en los dos extremos.

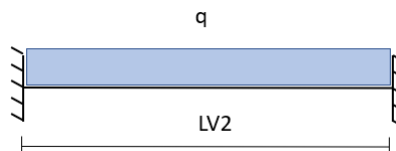


Figura 19. Vanos de tipo interior

Dado este tipo de vanos, el momento flector que sufren se ve representado en la Figura 20, el cual cumple con la ecuación E. 3.

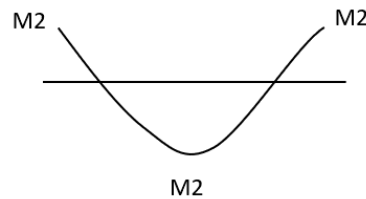


Figura 20. Diagrama de momento flector del vano interior

$$E. 3 \quad M_2 = \frac{q \cdot L_{V2}^2}{16}$$

Por tanto, al igualar los momentos, es decir, igualando las ecuaciones E. 2 y E. 3, sale una relación entre las longitudes de los vanos, la cual se muestra en la ecuación E. 4.

$$E. 4 \quad L_{V1} \approx 0,85 \cdot L_{V2}$$

Gracias a esta relación y, mediante tanteo de cantidad de vanos para que la longitud de estos no supere los 6 metros de longitud, la estructura resulta en un total de 24 vanos, es decir, dos pórticos de fachada y veintitres pórticos de tipo celosía, siendo las longitudes de los vanos exteriores de 5,04 metros y los vanos interiores de 5,93 metros, como se muestra en la Figura 21.

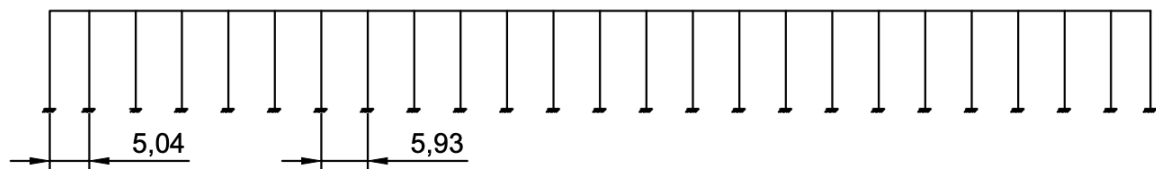


Figura 21. Distancia entre vanos

5.1.3 MATERIALES UTILIZADOS

Para el diseño de la nave industrial se va a utilizar el acero S275, según el Código Técnico de Edificación (CTE), para todos los perfiles utilizados para la construcción de la estructura metálica, tanto las vigas diseñadas para pilares y correas como los tubos utilizados para el diseño de la celosía.

Para el posterior diseño de los perfiles, es necesario conocer las características de este acero S275, recogidas del Código Técnico de Edificación (CTE-DB SE-A), el cual se trata de perfiles laminados en caliente. Dichas características se muestran en la Tabla 5.

<i>Límite Elástico (f_{yk})</i>	<i>Coeficiente Parcial de Seguridad (γ_{M0})</i>	<i>Módulo Elástico (E)</i>	<i>Límite Elástico Mayorado (f_{yd})</i>
275 N/mm ²	1,05	210.000.000 kN/m ²	261,9 N/mm ² 26,19 kN/cm ²

Tabla 5. Características del acero S275

5.1.4 ELECCIÓN DE CERRAMIENTOS

Es necesario conocer las características de los cerramientos que se utilizarán en la construcción de la nave industrial para conocer las cargas que generan los pesos de estos y que afectan a la estructura metálica que se diseñará. En este caso, existen dos tipos de cerramientos, el que se utilizará para la cubierta de la nave y el que se pondrá en las fachadas laterales y frontales.

Se ha decidido escoger un cerramiento mediante panel de tipo sándwich, ya que aporta ligereza y rigidez a la estructura, además de tratarse de un montaje rápido y sencillo, el cual está compuesto por dos chapas de acero perfilado galvanizado y prelacado en el color deseado que aportan la resistencia mecánica al conjunto de la nave, además de un núcleo de lana de roca que ejerce el aislamiento térmico y acústico a la estructura, además de una cierta resistencia al fuego, debido a que se trata de un material incombustible.

Se han seleccionado los paneles de tipo sándwich del fabricante Hiansa, los cuales se mostrarán a continuación los utilizados en cada caso, para la cubierta y para las fachadas de la nave industrial.

Para la cubierta, se ha escogido el panel de cubierta HiRock, eligiendo a su vez un panel de espesor total de 50 mm. Las características del panel se muestran en la Figura 22.

PANELES DE CUBIERTA DE LANA DE ROCA - HiRock - 125kg/m³							
Espesor	[mm]		40	50	60	80	100
Peso ⁽¹⁾	[kg/m²]		11,86	12,86	13,86	15,86	17,84
Transmitancia térmica ⁽¹⁾	[W/m²·K]	cubierta	0,814	0,661	0,555	0,422	0,340
		fachada	0,795	0,649	0,547	0,417	0,337
Reacción al fuego ⁽²⁾	UNE-EN 13.501-1		A2-s1,d0				
Resistencia al fuego ⁽²⁾	UNE-EN 13.501-2		-	EI 30	EI 30	EI 90 E 120	EI 180

⁽¹⁾ Valores para espesores nominales de chapa 0,5 mm - 0,5 mm y ancho de panel de 1 m.

⁽²⁾ Consultar certificados disponibles.

⁽¹⁾ Valores para espesores nominales de chapa 0,5 mm - 0,5 mm y ancho de panel de 1 m.

⁽²⁾ Consultar certificados disponibles.

Figura 22. Características del panel sandwich HiRock para la cubierta. Fuente: (Hiansa, s. f.-a)

Para la fachada, se ha escogido el panel de fachada HiRock, eligiendo a su vez un panel de espesor total de 50 mm. Las características se muestran en la Figura 23.

PANELES DE FACHADA DE LANA DE ROCA - HiRock - 125kg/m³							
Espesor	[mm]		40	50	60	80	100
Peso ⁽¹⁾	[kg/m²]		11,56	12,53	13,50	15,43	17,37
Transmitancia térmica ⁽¹⁾	[W/m²·K]	cubierta	0,970	0,793	0,671	0,456	0,358
		fachada	0,948	0,778	0,660	0,450	0,354
Reacción al fuego ⁽²⁾	UNE-EN 13.501-1		2-s1,d0				
Resistencia al fuego ⁽²⁾	UNE-EN 13.501-2		-	EI 30	EI 30	EI 90 E 120	EI 180

⁽¹⁾ Valores para espesores nominales de chapa 0,5 mm - 0,5 mm y ancho de panel de 1 m.

⁽²⁾ Consultar certificados disponibles.

⁽¹⁾ Valores para espesores nominales de chapa 0,5 mm - 0,5 mm y ancho de panel de 1 m.

⁽²⁾ Consultar certificados disponibles.

Figura 23. Características del panel sandwich HiRock para la fachada. Fuente: (Hiansa, s. f.-b)

5.2 ESTUDIO DE LAS CARGAS

Para conocer las cargas que actúan sobre la estructura metálica que se quiere diseñar posteriormente, es necesario dividir dichas cargas en los dos tipos de acciones existentes.

Por un lado, se encuentran las acciones permanentes sobre la estructura, las cuales se trata tanto del peso de la cubierta y la posibilidad de instalación de paneles solares fotovoltaicos como de los pesos propios de dicha estructura. Por otro lado, existen las acciones o cargas variables que actúan sobre la nave, en las que se identifican la sobrecarga de nieve y mantenimiento, la acción del viento y las posibles cargas térmicas.

Dado que las cargas que genera un puente grúa en el caso de que se quiera instalar en un futuro son cargas puntuales, no se tendrán en cuenta para el desarrollo de los cálculos

y se optará por una estructura más simple, dando la posibilidad de instalar pórticos grúa en las diferentes naves sin que estos afecten a la estructura diseñada. Sin embargo, se dispondrá en el ANEXO II. del posible diseño realizado en CYPE de la nave con puentes grúa.

5.2.1 ACCIONES PERMANENTES

Las acciones permanentes son aquellas cargas que no se ven afectadas por el entorno de la estructura, en las cuales se incluyen los pesos propios tanto de los cerramientos como de la propia estructura.

Conocidos los dos tipos de cerramientos escogidos para esta nave industrial, se necesita realizar una estimación de los posibles pesos de la estructura final, teniendo en cuenta la carga de los paneles solares fotovoltaicos, y, posteriormente a los cálculos, se comprobará que los pesos reales no excedan a los estimados, por lo que la estructura será estable e incluso estará sobredimensionada para futuras sobrecargas que pueda sufrir.

Los paneles fotovoltaicos apenas generan cargas sobre la estructura, ya que actualmente los fabricantes los realizan de materiales muy ligeros, como el aluminio, y, comparado con los pesos de la estructura metálica realizada en perfiles de acero laminado, se pueden incluir dentro de las estimaciones de cargas, por lo que se tendrá en cuenta dentro de la estimación de los pesos propios de la estructura. Con ello, las cargas permanentes son las mostradas en la Tabla 6.

<i>Panel Sándwich Cubierta</i>	<i>Panel Sándwich Fachada</i>	<i>Peso Propio Estimado Correas</i>	<i>Peso Propio Estimado Celosía</i>
12,86 kg/m ²	12,53 kg/m ²	0,15 kN/m ²	0,30 kN/m ²
0,126 kN/m ²	0,123 kN/m ²		

Tabla 6. Acciones permanentes

Por otro lado, se diferenciará el total de carga permanente utilizado para las correas y para las celosías, ya que para el cálculo de las correas no afecta el peso propio de la celosía,

teniendo así la carga permanente sobre las correas consiste en el peso del panel sándwich de la cubierta más el peso propio de las correas y, la carga permanente de la celosía se calcula de la misma manera, pero añadiéndole el peso propio de la celosía.

Además, según el Código Técnico de Edificación (CTE-DB SE), se obtienen los coeficientes parciales de seguridad tanto para las acciones permanentes como para las acciones variables, como se muestra en la Figura 24.

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad		desestabilizadora	estabilizadora
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

⁽¹⁾ Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

Figura 24. Tabla de coeficientes parciales de seguridad. Fuente: (DBSE.pdf, s. f.)

Debido a esto, en la Tabla 7 se muestran las acciones permanentes a tener en cuenta para el cálculo de la estructura metálica.

Carga Permanente Correas ($q_{kcorreas}$)	Carga Permanente Celosías ($q_{kcelosías}$)	Coeficiente Parcial de Seguridad (γ) Acción Permanente	Carga Permanente Mayorada Correas ($q_{dcorreas}$)	Carga Permanente Mayorada Celosías ($q_{dcelosías}$)
0,276 kN/m ²	0,576 kN/m ²	1,35	0,373 kN/m ²	0,778 kN/m ²

Tabla 7. Total carga permanente

5.2.2 ACCIONES VARIABLES

Las acciones variables son aquellas con las que la estructura se ve afectada o no debido a acciones climáticas, como son el viento y la nieve, o al propio uso de la estructura, como puede ser la sobrecarga de uso por mantenimiento.

5.2.2.1 Sobrecarga de uso en la cubierta

La sobrecarga de uso viene determinada por los pesos que puedan gravitar sobre la cubierta, en este caso la cubierta solo es accesible para su mantenimiento, por lo que, según se contempla en el CTE (CTE-DB SE-AE), la categoría de uso es la denominada G.

Además, al tratarse de una cubierta compuesta por el panel sándwich situado encima de las correas, se trata de una cubierta ligera sobre correas, lo que implica la subcategoría de uso denominada G1. Como se puede observar en la Figura 25, esta categoría implica una carga uniforme a considerar de 0,4 kN/m².

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ^{(4) (8)}	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Figura 25. Valores de las sobrecargas de uso. Fuente: (Seguridad Estructural, s.f.)

La sobrecarga de uso por mantenimiento no es compatible con la acción de la nieve, ya que, si se da una de estas acciones la otra no, entonces se tendrá en cuenta para los cálculos la carga mayor entre estas dos.

5.2.2.2 Acción de la nieve

La sobrecarga debida a la nieve surge por la posible acumulación de nieve en la cubierta de la nave industrial. Según el CTE (CTE-DB SE-AE), el valor de la carga de nieve que actúa sobre la proyección horizontal de la cubierta viene determinada por la ecuación E. 5, siendo μ el coeficiente de forma de la cubierta que, para cubiertas con inclinación menor

o igual a 30°, como es este caso, toma el valor de 1. Además, s_k es el valor característico de la carga de nieve dependiendo de la altitud y la zona.

$$E. 5 \quad q_n = \mu \cdot s_k$$



Figura E.2 Zonas climáticas de invierno

Figura 26. Zonas climáticas de invierno. Fuente: (Seguridad Estructural, s.f.)

Tabla E.2 Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal (kN/m²)

Altitud (m)	Zona de clima invernal, (según figura E.2)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
200	0,5	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
400	0,6	0,6	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
500	0,7	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2
600	0,9	0,9	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2
700	1,0	1,0	0,4	0,6	0,6	0,5	0,2
800	1,2	1,1	0,5	0,8	0,7	0,7	0,2
900	1,4	1,3	0,6	1,0	0,8	0,9	0,2
1.000	1,7	1,5	0,7	1,2	0,9	1,2	0,2
1.200	2,3	2,0	1,1	1,9	1,3	2,0	0,2
1.400	3,2	2,6	1,7	3,0	1,8	3,3	0,2
1.600	4,3	3,5	2,6	4,6	2,5	5,5	0,2
1.800	-	4,6	4,0	-	-	9,3	0,2
2.200	-	8,0	-	-	-	-	-

Figura 27. Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal. Fuente: (Seguridad Estructural, s.f.)

Siendo la altitud de Épila, Zaragoza, de 336 metros y situándose en la zona 2 de las zonas climáticas, según la Figura 26, mirando en la tabla de la Figura 27, el valor característico es de 0,6 kN/m², por lo que la carga de nieve tiene un valor de 0,6 kN/m².

Dado que la acción de la nieve es mayor que la sobrecarga de uso por mantenimiento, para los cálculos se tendrá en cuenta la carga de la nieve.

5.2.2.3 Acción térmica

Según el Código Técnico de Edificación (CTE-DB SE-AE), en edificios con elementos estructurales de acero, pueden resultar despreciables los efectos de las acciones térmicas cuando se introduzcan juntas de dilatación de manera que no haya ningún elemento continuo que supere los 40 metros de longitud.

Como en este diseño de la nave industrial no habrá ningún elemento continuo que mida más de 40 metros, ya que las correas que van a lo largo de la estructura no son más grandes de 12 metros de largo, no será necesario incluir juntas de dilatación ni tener en cuenta las acciones térmicas sobre la estructura metálica.

5.2.2.4 Acción del viento

La acción del viento sobre una estructura afecta en todas direcciones, ya que depende de la dirección desde donde proceda dicho viento. Según el CTE (CTE-DB SE-AE), hay que tener en cuenta todas las cargas de viento desde cualquier perspectiva, pero se utilizará la más desfavorable para cada proceso de cálculo correspondiente.

La acción del viento se define con la ecuación E. 6, donde q_e es una fuerza perpendicular a la superficie en cada punto estipulado, también conocida como presión estática, q_b es la presión dinámica del viento, establecida por el emplazamiento geográfico donde se encuentra la nave, c_e es el coeficiente de exposición, el cual depende de la altura del punto a considerar donde incide el viento y c_p es el coeficiente eólico o de presión, el cual depende de la orientación de las distintas superficies que se ven afectadas por el viento.

$$E. 6 \quad q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

5.2.2.4.1 Presión dinámica del viento

Para calcular la presión dinámica, q_b , es necesario conocer tanto la densidad del aire, la cual se establece en $1,25 \text{ kg/m}^3$, como la velocidad del viento dependiendo de la zona geográfica, siendo de 27 m/s , como se puede observar en la Figura 28.



Figura D.1 Valor básico de la velocidad del viento, v_b

Figura 28. Valor de la velocidad del viento. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

Por ello, según el CTE (CTE-DB SE-AE), la presión dinámica del viento en Zaragoza será de $0,45 \text{ kN/m}^2$.

5.2.2.4.2 Coeficiente de exposición

Por otro lado, para conocer el coeficiente de exposición en la tabla de la Figura 29, es necesario establecer el punto de incidencia del viento, el cual establece el CTE que, para paneles prefabricados de gran tamaño, como lo es el panel sándwich utilizado de cerramiento es la nave industrial, el punto a considerar es el punto medio. Cogiendo de referencia el punto más alto de la nave, 17,5 metros, el punto medio aproximadamente sería a una altura de 9 metros, por lo que el coeficiente de exposición c_e será de 1,7, siendo el grado de aspereza del entorno de IV, ya que se trata de una zona industrial.

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)								
	3	6	9	12	15	18	24	30	
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7	
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5	
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1	
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6	
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0	

Figura 29. Valores del coeficiente de exposición. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

5.2.2.4.3 Coeficientes de presión exterior

Para conseguir los valores del coeficiente de presión exterior hay que tener en cuenta las dos direcciones que puede tomar el viento, incidiendo en el lateral o en el frontal. Dentro de estos, hay que diferenciar entre la acción del viento en la cubierta o en la fachada.

Para la acción del viento en los laterales de la estructura, en el CTE especifica la siguiente Figura 30 y tabla de la Figura 31 para mostrar los coeficientes de presión dependiendo de la zona de la nave industrial.

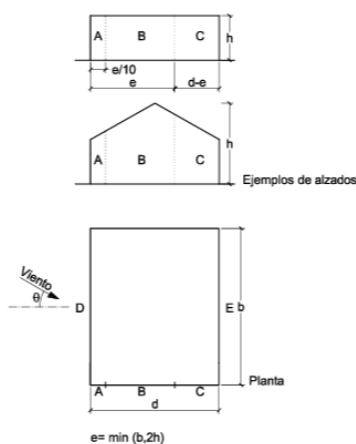


Figura 30. Identificación de zonas laterales afectadas por el viento. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

A (m ²)	h/d	Zona (según figura), $-45^\circ < \theta < 45^\circ$				
		A	B	C	D	E
≥ 10	5	-1,2	-0,8	-0,5	0,8	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	$\leq 0,25$	"	"	"	0,7	-0,3
5	5	-1,3	-0,9	-0,5	0,9	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	$\leq 0,25$	"	"	"	0,8	-0,3
2	5	-1,3	-1,0	-0,5	0,9	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	$\leq 0,25$	"	"	"	0,7	-0,3
≤ 1	5	-1,4	-1,1	-0,5	1,0	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	$\leq 0,25$	"	"	"	"	-0,3

Figura 31. Coeficientes de presión según las zonas laterales de la nave. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

Para la acción del viento lateral en la cubierta a dos aguas, en el CTE especifica la siguiente Figura 32 y tabla de la Figura 33 para mostrar los coeficientes de presión dependiendo de la zona de la nave industrial.

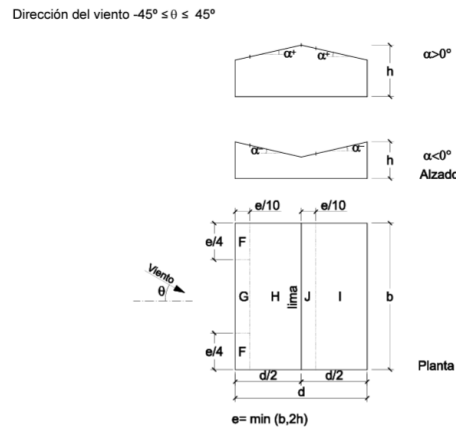


Figura 32. Identificación de zonas de la cubierta afectadas por el viento lateral. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

Pendiente de la cubierta α	A (m ²)	Zona (según figura)				
		F	G	H	I	J
-45°	≥ 10	-0.6	-0.6	-0.8	-0.7	-1
	≤ 1	-0.6	-0.6	-0.8	-0.7	-1.5
-30°	≥ 10	-1.1	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
	≤ 1	-2	-1.5	-0.8	-0.6	-1.4
-15°	≥ 10	-2.5	-1.3	-0.9	-0.5	-0.7
	≤ 1	-2.8	-2	-1.2	-0.5	-1.2
-5°	≥ 10	-2.3	-1.2	-0.8	0.2	0.2
	≤ 1	-2.5	-2	-1.2	0.2	0.2
5°	≥ 10	-1.7	-1.2	-0.6	-0.6	0.2
	≤ 1	-2.5	-2	-1.2	-0.6	0.2
15°	≥ 10	-0.9	-0.8	-0.3	-0.4	-1
	≤ 1	0.2	0.2	0.2	+0.0	+0.0
30°	≥ 10	-0.5	-0.5	-0.2	-0.4	-0.5
	≤ 1	0.7	0.7	0.4	0	0
45°	≥ 10	-0.0	-0.0	-0.0	-0.2	-0.3
	≤ 1	0.7	0.7	0.6	+0.0	+0.0
60°	≥ 10	-0.0	-0.0	-0.0	-0.2	-0.3
	≤ 1	0.7	0.7	0.7	-0.2	-0.3
75°	≥ 10	0.8	0.8	0.8	-0.2	-0.3
	≤ 1	0.8	0.8	0.8	-0.2	-0.3

Figura 33. Coeficientes de presión según las zonas de la cubierta por viento lateral. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

Para la acción del viento frontal sobre la cubierta a dos aguas, en el CTE especifica la siguiente Figura 34 y tabla de la Figura 35 para mostrar los coeficientes de presión dependiendo de la zona de la nave industrial.

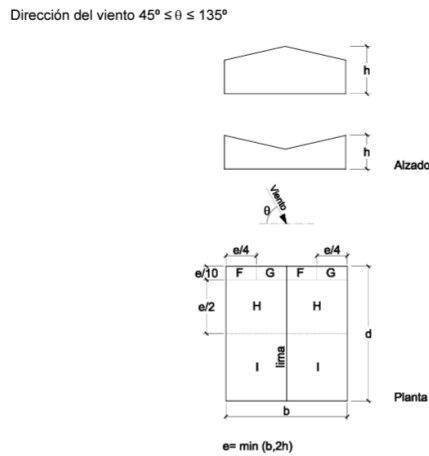


Figura 34. Identificación de zonas de la cubierta afectadas por el viento frontal. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

Pendiente de la cubierta α	A (m ²)	Zona (según figura), $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$			
		F	G	H	I
-45°	≥ 10	-1.4	-1.2	-1.0	-0.9
	≤ 1	-2.0	-2.0	-1.3	-1.2
-30°	≥ 10	-1.5	-1.2	-1.0	-0.9
	≤ 1	-2.1	-2.0	-1.3	-1.2
-15°	≥ 10	-1.9	-1.2	-0.8	-0.8
	≤ 1	-2.5	-2.0	-1.2	-1.2
-5°	≥ 10	-1.8	-1.2	-0.7	-0.6
	≤ 1	-2.5	-2.0	-1.2	-1.2
5°	≥ 10	-1.6	-1.3	-0.7	-0.6
	≤ 1	-2.2	-2.0	-1.2	-0.6
15°	≥ 10	-1.3	-1.3	-0.6	-0.5
	≤ 1	-2.0	-2.0	-1.2	-0.5
30°	≥ 10	-1.1	-1.4	-0.8	-0.5
	≤ 1	-1.5	-2.0	-1.2	-0.5
45°	≥ 10	-1.1	-1.4	-0.9	-0.5
	≤ 1	-1.5	-2.0	-1.2	-0.5
60°	≥ 10	-1.1	-1.2	-0.8	-0.5
	≤ 1	-1.5	-2.0	-1.0	-0.5
75°	≥ 10	-1.1	-1.2	-0.8	-0.5
	≤ 1	-1.5	-2.0	-1.0	-0.5

Figura 35. Coeficientes de presión según las zonas de la cubierta por viento frontal. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

Analizando cada uno de los vientos incidentes y las zonas que se ven afectadas, sabiendo que la pendiente de la cubierta es de $4,2^\circ$ y el área de incidencia del viento en cualquiera de los casos es mayor de 10 m^2 , según las tablas del Anejo D del CTE-DB SE-AE que se han mostrado anteriormente, se ha hecho un resumen con los coeficientes de presión exterior más críticos según cada caso, el cual se muestra en la Tabla 8, ya que serán los utilizados para dimensionar la nave industrial.

<i>Viento frontal</i>				<i>Viento lateral</i>			
Fachadas		Cubierta a dos aguas		Fachadas		Cubierta a dos aguas	
$c_p(+)$	$c_p(-)$	$c_p(+)$	$c_p(-)$	$c_p(+)$	$c_p(-)$	$c_p(+)$	$c_p(-)$
0,7	-1,2	-	-1,62	0,7	-1,2	0,2	-1,75

Tabla 8. Coeficientes de presión exterior críticos

Para el dimensionamiento de la estructura metálica, únicamente se tendrán en cuenta los coeficientes de presión positivos, ya que de esta forma las acciones variables serán lo más desfavorables posibles para el cálculo de la estructura.

5.2.2.4.4 Coeficiente de presión interior

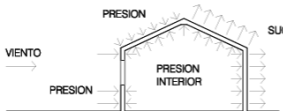
A parte de los coeficientes de presión exterior, en este caso hay que tener en cuenta también los coeficientes de presión interior, ya que la nave dispone de varios portales por los que entrarán camiones, por lo que se genera una presión interior cuando algunos de estos portales se encuentran abiertos.

Teniendo en cuenta que se dispondrá de un total de cuatro portales de 5 metros de alto por 5,5 metros de ancho, dos en cada uno de los laterales y enfrentados dos a dos, por lo que la relación entre el área de los huecos en zonas de succión respecto al área total de los huecos es de 0,5, y la esbeltez de la nave, es decir, la relación entre la altura máxima y la anchura de las fachadas de fondo, es menor que 1, según la Figura 36, el coeficiente de presión interior es de 0,1.

Tabla 3.6 Coeficientes de presión interior

Esbeltez en el plano paralelo al viento	Área de huecos en zonas de succión respecto al área total de huecos del edificio										
≤1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
≥4	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,1	0,0	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5
	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3

HUECOS A BARLOVENTO



HUECOS A SOTAVENTO

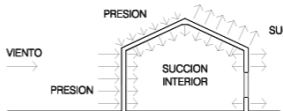


Fig. 3.1 Presiones ejercidas por el viento en una construcción diáfana

Figura 36. Coeficientes de presión interior. Fuente: (Seguridad Estructural, s.f.)

5.2.2.4.5 Presión estática del viento

Según los coeficientes de presión tanto exterior como interior mostrados en los apartados anteriores, la presión estática del viento se muestra en la Tabla 9.

<i>Presión estática para cubierta</i>		<i>Presión estática para laterales</i>	
Presión exterior	Presión interior	Presión exterior	Presión interior
0,15 kN/m ²	0,06 kN/m ²	0,54 kN/m ²	0,06 kN/m ²
Presión total		Presión total	
0,21 kN/m ²		0,6 kN/m ²	

Tabla 9. Presión estática del viento

5.2.2.5 Carga total variable

Teniendo en cuenta todas las cargas variables calculadas en los apartados anteriores, la carga total variable se observa en la Tabla 10, sabiendo que el coeficiente parcial de seguridad se saca de la Figura 24.

<i>Carga Variable ($q_{kvariable}$)</i>	<i>Coficiente Parcial de Seguridad (γ) Acción Variable</i>	<i>Carga Variable Mayorada ($q_{dvariable}$)</i>
0,962 kN/m ²	1,50	0,442 kN/m ²

Tabla 10. Total carga variable

5.2.3 CARGA TOTAL SOBRE LA ESTRUCTURA

Teniendo ya el total de las cargas tanto permanentes como variables, la carga total que actúa sobre la estructura se muestra a continuación. Además, se ha calculado también el coeficiente parcial de seguridad de la carga total, ya que posteriormente será necesario para realizar los cálculos.

<i>Carga Total Correas ($q_{kTcorreas}$)</i>	<i>Carga Total Celosías ($q_{kTcelosías}$)</i>	<i>Coficiente Parcial de Seguridad Total (γ_T)</i>	<i>Carga Total Mayorada Correas ($q_{dTcorreas}$)</i>	<i>Carga Total Mayorada Celosías ($q_{dTcelosías}$)</i>
1,238 kN/m ²	1,538 kN/m ²	1,444	1,815 kN/m ²	2,220 kN/m ²

Tabla 11. Cargas totales sobre la estructura

5.2.4 LÍMITE DE FLECHA

Según el Código Técnico de Edificación (CTE-DB SE), el límite de flecha que se debe tener en consideración tanto para el dimensionamiento de las correas como de los cordones inferiores es la siguiente.

$$E. 7 \quad \delta_{adm} \leq \frac{L}{300}$$

Capítulo 6. DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS DE LA ESTRUCTURA

En este capítulo se desarrollarán los cálculos hechos para el dimensionamiento de la estructura metálica de la nave industrial sin usar ningún tipo de software de cálculo de estructuras para ello, es decir, se han realizado los cálculos paso por paso siguiendo el Código Técnico de Edificación.

6.1 CÁLCULO DE LAS CORREAS DE CUBIERTA

Para realizar el dimensionamiento de las correas de cubierta, hace falta recordar las cargas sobre las mismas.

<i>Carga Total Correas ($q_{kTcorreas}$)</i>	<i>Carga Total Mayorada Correas ($q_{dTcorreas}$)</i>	<i>Separación entre correas/montantes</i>	<i>Carga Total Correas ($q_{kTcorreas}$)</i>	<i>Carga Total Mayorada Correas ($q_{dTcorreas}$)</i>
1,238 kN/m ²	1,815 kN/m ²	1,7 m	2,104 kN/m	3,086 kN/m

Tabla 12. Cargas que actúan sobre las correas de cubierta

Como se ha visto en el punto 5.1.2.3, entre vanos existen dos tipos de momentos, el exterior y el interior. Calculando dichos momentos vistos en las ecuaciones E. 2 y E. 3, se obtienen los siguientes.

<i>Momento Exterior (M_1)</i>	<i>Momento Interior (M_2)</i>
6,714 kNm	6,778 kNm

Tabla 13. Momentos de los vanos

Como se observa en la Tabla 13, el momento en los vanos interiores es mayor, por lo que se tomará dicho valor para dimensionar las correas, ya que se trata del valor más crítico. Sabiendo el momento y el límite elástico del acero (f_{yd}), se dimensiona el perfil de tipo IPE.

$$W_x = \frac{M_d}{f_{yd}} = 25,878 \text{ cm}^3$$

Según el prontuario de perfiles Perfiles IPE en el ANEXO III. PRONTUARIO, sabiendo que el módulo resistente de la sección debe ser mayor o igual al calculado, se escoge el perfil IPE 100 ($W_x = 34,2 \text{ cm}^3$, $I_x = 171 \text{ cm}^4$).

6.1.1 COMPROBACIÓN DE FLECHA

Es necesario realizar una comprobación de la flecha del perfil escogido, para así saber si cumple con la restricción del límite de flecha admisible. Calculando la flecha tanto de los vanos exteriores como los interiores, en este caso cogiendo la carga sobre las correas sin mayorar, ya que se trata de la carga real que sufrirán, se obtiene la Tabla 14.

<i>Flecha del Vano Exterior</i>	<i>Flecha del Vano Interior</i>
$\delta_{v1} = \frac{q_k \cdot L_{v1}^4}{185 \cdot E \cdot I}$	$\delta_{v2} = \frac{q_k \cdot L_{v2}^4}{384 \cdot E \cdot I}$
$\frac{3,49 \cdot 10^{-8}}{I}$	$\frac{3,22 \cdot 10^{-8}}{I}$

Tabla 14. Flechas de las correas de cubierta

Dimensionando con la flecha del vano exterior, ya que es la mayor, se saca la relación entre la flecha máxima admisible y la flecha del vano, obteniendo así un valor de inercia del perfil buscado. Por ello, la flecha admisible en este caso se trata de la longitud del vano exterior entre 300.

$$\frac{3,49 \cdot 10^{-8}}{I} \leq \frac{5,04}{300} \rightarrow I \geq 207,88 \text{ cm}^4$$

Según el prontuario de perfiles Perfiles IPE en el ANEXO III. PRONTUARIO, sabiendo que la inercia en el eje X debe ser mayor o igual a la calculada, se escoge el perfil **IPE 120** ($W_x = 53 \text{ cm}^3$, $I_x = 318 \text{ cm}^4$).

6.1.2 REPERCUSIÓN POR METRO CUADRADO DEL PESO PROPIO

Elegido el perfil que se utilizará para las correas de la cubierta, es necesario comprobar que la hipótesis tomada sobre la carga generada por el peso de las correas es correcta, es decir, la carga real no puede superar la estimación inicial tomada, ya que si no habría que rehacer todos los cálculos.

Sabiendo que el perfil escogido (IPE 120) tiene un peso de 10,40 kp/m, teniendo en cuenta que hay que dividirlo entre la distancia entre correas de 1,7 metros, sale un peso propio real de las correas de $0,060 \text{ kN/m}^2$, con lo cual, la estimación inicial está bien tomada ya que es muy superior a la carga real.

6.1.3 UNIONES DE LAS CORREAS EN MOMENTO NULO

Dado que el alma del perfil es el responsable de soportar el cortante que sufre la viga, se trata de que dicho cortante no sea máximo, el cual coincide con el máximo momento flector. Para conseguir el objetivo, se busca realizar los empalmes de las correas en los puntos de momento nulo.

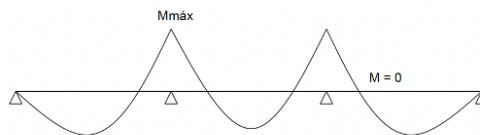


Figura 37. Diagrama del momento flector

Para conseguir la distancia desde el inicio de las correas al punto de momento nulo, se siguen las fórmulas de la Figura 38. Con ello se obtiene una distancia desde los apoyos hasta el momento nulo, es decir, b , de 0,871 metros.

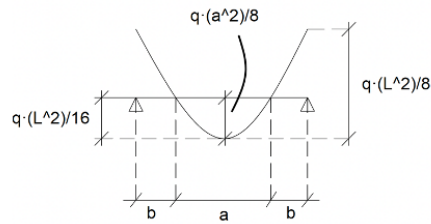


Figura 38. Momento flector en función de distancias

Como las medidas estándar de las vigas comerciales es de 12 metros de longitud, se obtendrán 1 correa de 11,835 metros de longitud, 10 correas de 11,857 metros y una restante de 10,099 metros, completando así los 140,5 metros de longitud de la nave industrial.

6.2 CÁLCULO DE LAS CELOSÍAS

Para realizar el cálculo de las celosías, es necesario recordar las cargas estimadas que sufre dicha celosía, para así poder obtener los esfuerzos cortantes y flectores que sufren las barras que componen dicha estructura metálica.

<i>Carga Total Celosías ($q_{kTcelosías}$)</i>	<i>Coficiente Parcial de Seguridad Total (γ_T)</i>	<i>Carga Total Mayorada Celosías ($q_{dTcelosías}$)</i>	<i>Distancia entre vanos</i>	<i>Carga Total Celosías ($q_{kTcelosías}$)</i>
1,538 kN/m ²	1,444	2,220 kN/m ²	5,93 m	9,116 kN/m

Tabla 15. Cargas totales sobre la celosía

La numeración tomada para cada tipo de barra se mostraba en la Figura 16.

6.2.1 ESFUERZOS CORTANTES Y FLECTORES DE LAS CELOSÍAS

Debido al cálculo de los esfuerzos cortantes y flectores de la estructura, es necesario conocer las reacciones en los apoyos de la celosía, es decir, en los cinco pilares que soportan la estructura. Para conseguir esto, la carga distribuida que sufre la estructura metálica es traducida a cargas puntuales en las correas. Por ello, estas cargas puntuales y las reacciones obtenidas de los apoyos se muestran en la Tabla 16, según la Figura 39. Además, para

realizar la comprobación de flecha posteriormente, es necesario conocer las cargas y esfuerzos virtuales de la estructura.

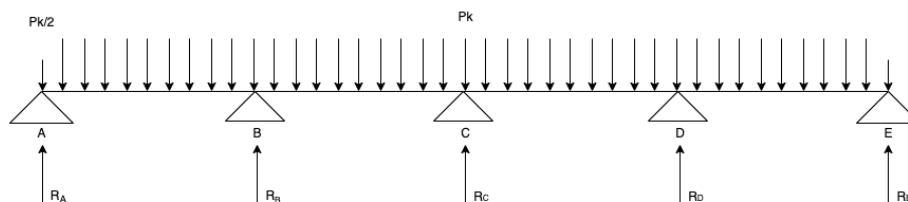


Figura 39. Boceto de las reacciones de la celosía

<i>Carga Puntual P</i>	<i>Reacción en A (R_A)</i>	<i>Reacción en B (R_B)</i>	<i>Reacción en C (R_C)</i>	<i>Reacción en D (R_D)</i>	<i>Reacción en E (R_E)</i>
15,497 kN	121,845 kN	354,107 kN	287,857 kN	354,107 kN	121,845 kN
1 kN (Virtual)	0,339 kN (Virtual)	1,214 kN (Virtual)	0,893 kN (Virtual)	1,214 kN (Virtual)	0,339 kN (Virtual)

Tabla 16. Reacciones en los apoyos de la celosía

Dadas las reacciones en los apoyos, se calculan los diagramas de los esfuerzos cortantes y flectores de cada una de las secciones de la celosía, es decir, los 80 recuadros en los que se divide esta estructura metálica, obteniendo así las siguientes tablas.

Esfuerzos cortantes [kN]

V ₁	114,096	V ₁₅	-102,856	V ₂₉	34,298	V ₄₃	105,203	V ₅₇	-111,750	V ₇₁	25,405
V ₂	98,600	V ₁₆	-118,353	V ₃₀	18,802	V ₄₄	89,706	V ₅₈	-127,246	V ₇₂	9,908
V ₃	83,103	V ₁₇	-133,849	V ₃₁	3,305	V ₄₅	74,210	V ₅₉	-142,743	V ₇₃	-5,589
V ₄	67,607	V ₁₈	-149,346	V ₃₂	-12,192	V ₄₆	58,713	V ₆₀	-158,239	V ₇₄	-21,085
V ₅	52,110	V ₁₉	-164,842	V ₃₃	-27,688	V ₄₇	43,216	V ₆₁	180,371	V ₇₅	-36,582
V ₆	36,613	V ₂₀	-180,339	V ₃₄	-43,185	V ₄₈	27,720	V ₆₂	164,874	V ₇₆	-52,078
V ₇	21,117	V ₂₁	158,271	V ₃₅	-58,681	V ₄₉	12,223	V ₆₃	149,377	V ₇₇	-67,575
V ₈	5,620	V ₂₂	142,774	V ₃₆	-74,178	V ₅₀	-3,273	V ₆₄	133,881	V ₇₈	-83,072
V ₉	-9,876	V ₂₃	127,278	V ₃₇	-89,674	V ₅₁	-18,770	V ₆₅	118,384	V ₇₉	-98,568
V ₁₀	-25,373	V ₂₄	111,781	V ₃₈	-105,171	V ₅₂	-34,267	V ₆₆	102,888	V ₈₀	-114,065
V ₁₁	-40,870	V ₂₅	96,285	V ₃₉	-120,668	V ₅₃	-49,763	V ₆₇	87,391		
V ₁₂	-56,366	V ₂₆	80,788	V ₄₀	-136,164	V ₅₄	-65,260	V ₆₈	71,894		
V ₁₃	-71,863	V ₂₇	65,291	V ₄₁	136,196	V ₅₅	-80,756	V ₆₉	56,398		
V ₁₄	-87,359	V ₂₈	49,795	V ₄₂	120,699	V ₅₆	-96,253	V ₇₀	40,901		

Tabla 17. Esfuerzos cortantes sobre la celosía

Esfuerzos flectores [kNm]

M ₁	0	M ₁₅	318,171	M ₂₉	288,726	M ₄₃	-313,585	M ₅₇	-207,083	M ₇₁	755,765
M ₂	193,964	M ₁₆	143,316	M ₃₀	347,033	M ₄₄	-134,741	M ₅₈	-397,057	M ₇₂	798,953
M ₃	361,584	M ₁₇	-57,883	M ₃₁	378,996	M ₄₅	17,760	M ₅₉	-613,376	M ₇₃	815,796
M ₄	502,859	M ₁₈	-285,426	M ₃₂	384,614	M ₄₆	143,916	M ₆₀	-856,038	M ₇₄	806,296
M ₅	617,790	M ₁₉	-539,314	M ₃₃	363,889	M ₄₇	243,728	M ₆₁	-1.125,045	M ₇₅	770,451
M ₆	706,377	M ₂₀	-819,546	M ₃₄	316,819	M ₄₈	317,196	M ₆₂	-818,415	M ₇₆	708,262
M ₇	768,620	M ₂₁	-1.126,122	M ₃₅	243,405	M ₄₉	364,320	M ₆₃	-538,129	M ₇₇	619,729
M ₈	804,519	M ₂₂	-857,061	M ₃₆	143,647	M ₅₀	385,099	M ₆₄	-284,188	M ₇₈	504,851
M ₉	814,073	M ₂₃	-614,345	M ₃₇	17,544	M ₅₁	379,534	M ₆₅	-56,591	M ₇₉	363,630
M ₁₀	797,283	M ₂₄	-397,973	M ₃₈	-134,902	M ₅₂	347,625	M ₆₆	144,662	M ₈₀	196,064
M ₁₁	754,149	M ₂₅	-207,944	M ₃₉	-313,693	M ₅₃	289,372	M ₆₇	319,571	M ₈₁	2,154
M ₁₂	684,671	M ₂₆	-44,261	M ₄₀	-518,828	M ₅₄	204,775	M ₆₈	468,136		
M ₁₃	588,849	M ₂₇	93,079	M ₄₁	-750,307	M ₅₅	93,833	M ₆₉	590,357		
M ₁₄	466,682	M ₂₈	204,075	M ₄₂	-518,774	M ₅₆	-43,453	M ₇₀	686,233		

Tabla 18. Esfuerzos flectores sobre la celosía

Obtenidos los esfuerzos que sufre la estructura de la celosía, en los siguientes apartados se dispone a calcular los esfuerzos más críticos de cada tipo de barra que compone esta celosía.

6.2.2 ESFUERZOS EN LAS BARRAS DE LAS CELOSÍAS

Dados los esfuerzos que sufre la celosía calculados en el punto anterior, se va a proceder a mostrar la barra con el esfuerzo más restrictivo para dimensionar cada una de las barras que componen la estructura metálica de la celosía.

6.2.2.1 Cordón inferior

Se conoce que el cordón inferior sufre un esfuerzo normal de tracción (+). Conocida la fórmula con la que se calcula dicho esfuerzo normal, la ecuación E. 8, donde M_{viga} es el esfuerzo flector de dicho tramo y h_{mont} la altura del montante al comienzo del tramo, se procede a calcular cada uno de los esfuerzos, obteniendo así el mayor de ellos, el cual se utilizará para dimensionar el cordón ya que es el esfuerzo más restrictivo.

$$E. 8 \quad N_{CI} = \frac{M_{viga}}{h_{mont}}$$

El mayor esfuerzo normal calculado es el correspondiente al cordón inferior denominado CI₇₄. Dicho esfuerzo, N_{CI74} tiene un valor de 238,902 kN. En la Tabla 19, se mostrará el esfuerzo mayorado utilizado para el posterior dimensionamiento de las barras del cordón inferior.

Máximo Esfuerzo Normal (N_{kCI74})	Coficiente Parcial de Seguridad Total (γ_T)	Máximo Esfuerzo Normal Mayorado (N_{dCI74})
238,902 kN	1,444	344,926 kN

Tabla 19. Esfuerzo normal para dimensionamiento del cordón inferior

6.2.2.2 Cordón superior

Se sabe que el cordón superior sufre un esfuerzo normal de compresión (-). Conocida la fórmula con la que se calcula dicho esfuerzo normal, la ecuación E. 9, donde M_{viga} es el esfuerzo flector de dicho tramo, h_{mont} la altura del montante al final del tramo y β es el ángulo de la cubierta 4,2°, se procede a calcular cada uno de los esfuerzos, obteniendo así el mayor de ellos, el cual se utilizará para dimensionar el cordón ya que es el esfuerzo más restrictivo.

$$E. 9 \quad N_{CS} = \frac{M_{viga}}{h_{mont} \cdot \cos \beta}$$

El mayor esfuerzo normal calculado es el correspondiente al cordón superior denominado CS₇₃. Dicho esfuerzo, N_{CS73} tiene un valor de -239,547 kN, siendo negativo debido a la compresión. En la Tabla 20, se mostrará el esfuerzo mayorado utilizado para el posterior dimensionamiento de las barras del cordón superior.

Máximo Esfuerzo Normal (N_{kCS73})	Coficiente Parcial de Seguridad Total (γ_T)	Máximo Esfuerzo Normal Mayorado (N_{dCS73})
-239,547 kN	1,444	-345,857 kN

Tabla 20. Esfuerzo normal para dimensionamiento del cordón superior

6.2.2.3 Diagonales

Las diagonales sufren un esfuerzo normal de tracción (+). Conocida la fórmula con la que se calcula dicho esfuerzo normal, la ecuación E. 10, donde V_{viga} es el esfuerzo cortante de dicho tramo, N_{CS} el esfuerzo normal del cordón superior correspondiente a dicho tramo, α es el ángulo que forma la diagonal con la proyección del cordón superior en cada uno de los tramos y β es el ángulo de la cubierta 4,2°, se procede a calcular cada uno de los esfuerzos, obteniendo así el mayor de ellos, el cual se utilizará para dimensionar las diagonales ya que es el esfuerzo más restrictivo.

$$E. 10 \quad N_{Diag} = \frac{V_{viga} - N_{CS} \cdot \sin \beta}{\sin \alpha_i}$$

El mayor esfuerzo normal calculado es el correspondiente a la diagonal denominada Diag₆₁, siendo habitual que los mayores esfuerzos de las diagonales correspondan con los apoyos sobre los pilares. Dicho esfuerzo, N_{Diag61} tiene un valor de 204,096 kN. En la Tabla 21, se mostrará el esfuerzo mayorado utilizado para el posterior dimensionamiento de las barras de las diagonales.

Máximo Esfuerzo Normal ($N_{kDiag61}$)	Coficiente Parcial de Seguridad Total (γ_T)	Máximo Esfuerzo Normal Mayorado ($N_{dDiag61}$)
204,096 kN	1,444	294,673 kN

Tabla 21. Esfuerzo normal para dimensionamiento las diagonales

6.2.2.4 Montantes

Los montantes sufren un esfuerzo normal de compresión (-). Conocida la fórmula con la que se calcula dicho esfuerzo normal, la ecuación E. 11, donde N_{Diag} el esfuerzo normal de la diagonal correspondiente a dicho tramo y α es el ángulo que forma la diagonal con la proyección del cordón superior en cada uno de los tramos, se procede a calcular cada uno de los esfuerzos, obteniendo así el mayor de ellos, el cual se utilizará para dimensionar los montantes ya que es el esfuerzo más restrictivo.

$$E. 11 \quad N_{mont} = -N_{Diag} \cdot \text{sen} \alpha_i$$

Por otro lado, los esfuerzos de los montantes que coinciden con los pilares de la celosía corresponden a la reacción que sufre dicho punto, mostradas en la Tabla 16. Dichos esfuerzos serán los utilizados para dimensionar los pilares correspondientes, cogiendo el mayor ya que es el más desfavorable.

El mayor esfuerzo normal calculado es el correspondiente al montante denominado Mont₆₂. Dicho esfuerzo, N_{Mont62} tiene un valor de -192,715 kN. En la Tabla 22, se mostrará el esfuerzo mayorado utilizado para el posterior dimensionamiento de las barras de los montantes.

Máximo Esfuerzo Normal ($N_{kmont62}$)	Máximo Esfuerzo Normal para Dimensionar Pilares ($N_{kmont61}$)	Coficiente Parcial de Seguridad Total (γ_T)	Máximo Esfuerzo Normal Mayorado ($N_{dDiag61}$)
-192,725 kN	-354,107 kN	1,444	-278,241 kN

Tabla 22. Esfuerzo normal para dimensionamiento los montantes

6.2.3 DIMENSIONADO DE BARRAS COMPRIMIDAS

Para realizar el dimensionamiento de las barras comprimidas, es necesario estudiar el pandeo de las mismas, por lo que se seguirá el Código Técnico de Edificación para el acero (CTE-DB SE-A) para seleccionar las barras más acordes respecto a resistencia para la estructura metálica de las celosías.

Utilizando la fórmula E. 12, el axil calculado debe ser mayor que el mayor esfuerzo normal calculado en el anterior apartado, sabiendo que A es el área del perfil, f_{yd} es límite elástico del acero y χ es el coeficiente de pandeo.

$$E. 12 \quad N_{b,d} = A \cdot f_{yd} \cdot \chi$$

El coeficiente de pandeo se obtiene según el CTE con las curvas de la Figura 40, sabiendo que las curvas que hay que seleccionar vienen dadas según la sección transversal del perfil que se pretende utilizar dentro también del CTE-DB SE-A.

Para escoger el coeficiente de pandeo adecuado, es necesario conocer la esbeltez reducida la cual viene determinada por la siguiente ecuación.

$$E. 13 \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_E}$$

La esbeltez λ viene determinada por la longitud de pandeo, siendo $\beta = 1$ por ser una barra biapoyada, por lo que se trata de la longitud de la barra correspondiente, además de i que es el radio de giro de la sección.

$$E. 14 \quad \lambda = \frac{L_k}{i} = \frac{L_R \cdot \beta}{i}$$

Por otro lado, λ_E se refiere al material utilizado, es decir, el acero S275, por lo que quedaría según la ecuación siguiente.

$$E. 15 \quad \lambda_E = 93,91 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 86,81$$

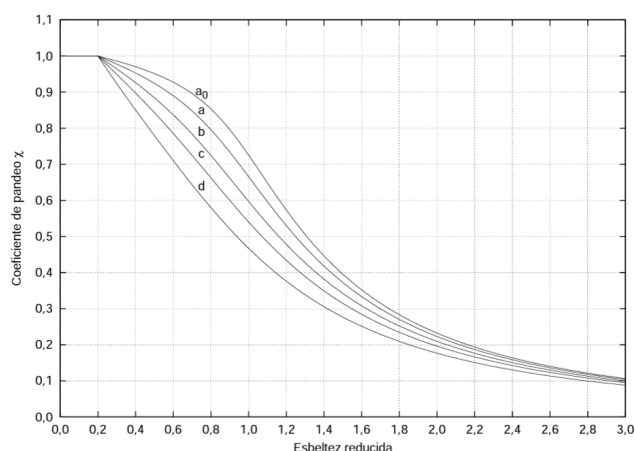


Figura 6.3 Curvas de pandeo

Figura 40. Curvas de pandeo. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

Tabla 6.3 Valores del coeficiente de pandeo (χ)

Esbellez reducida	Curva de pandeo				
	a_0	a	b	c	d
Coeficiente (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 arriostramiento

Figura 41. Valores del coeficiente de pandeo. Fuente: (Seguridad Estructural, s. f.)

6.2.3.1 Montantes

Según el esfuerzo normal más desfavorable obtenido anteriormente, el montante es el correspondiente a la denominación Mont₆₂, por lo que la altura de dicho montante corresponde a 4,875 metros, siendo este L_k .

Tras realizar varias iteraciones hasta obtener el perfil que cumple con todas las características deseadas, es decir, su esfuerzo axial es mayor o igual que el calculado anteriormente, se obtiene que el perfil más adecuado para los montantes es el cuadrado #120.6 ($A = 26,10 \text{ cm}^2$, $i = 4,59 \text{ cm}$), según el prontuario Perfiles Huecos Cuadrados en el ANEXO III. PRONTUARIO.

6.2.3.2 Cordón superior

Según el esfuerzo normal más desfavorable obtenido anteriormente, el cordón superior es el correspondiente a la denominación CS₇₃, por lo que la longitud de dicho cordón corresponde a la longitud de la separación entre correas proyectada en horizontal, por lo que tendrán una longitud de 1,705 metros, siendo esta L_k .

Tras realizar varias iteraciones hasta obtener el perfil que cumple con todas las características deseadas, es decir, su esfuerzo axil es mayor o igual que el calculado anteriormente, se obtiene que el perfil más adecuado para el cordón superior es el cuadrado **#120.4** ($A = 18,00 \text{ cm}^2$, $i = 4,70 \text{ cm}$).

Sin embargo, como los montantes van unidos a los cordones mediante soldadura, se dispondrá de cordones iguales o mayores que el perfil de los montantes, por lo que se utilizará para los cordones superiores un perfil cuadrado **#120.6** ($A = 26,10 \text{ cm}^2$, $i = 4,59 \text{ cm}$), según el prontuario Perfiles Huecos Cuadrados en el ANEXO III. PRONTUARIO.

6.2.4 DIMENSIONADO DE BARRAS TRACCIONADAS

Para realizar el dimensionamiento de las barras traccionadas, solamente se necesita saber el área de las mismas, calculado de la forma que se muestra en la ecuación E. 16, sabiendo que el área del perfil escogido debe ser mayor o igual al calculado.

$$E. 16 \quad A = \frac{N_d}{f_{yd}}$$

6.2.4.1 Cordón inferior

Sabiendo el esfuerzo normal más desfavorable que sufre el cordón inferior calculado anteriormente, se obtiene que el área del perfil debe ser mayor o igual a $13,17 \text{ cm}^2$, por lo que se escoge para el cordón inferior un perfil cuadrado **#100.4** ($A = 14,80 \text{ cm}^2$).

Al igual que en el cordón superior, como los montantes van unidos a los cordones mediante soldadura, se dispondrá de cordones iguales o mayores que el perfil de los montantes, por lo que se utilizará para los cordones inferiores un perfil cuadrado **#120.6** (A

= 26,10 cm²), según el prontuario Perfiles Huecos Cuadrados en el ANEXO III. PRONTUARIO.

6.2.4.2 Diagonales

Sabiendo el esfuerzo normal más desfavorable que sufren las diagonales calculado anteriormente, se obtiene que el área del perfil debe ser mayor o igual a 11,251 cm², por lo que se escoge para las diagonales un perfil cuadrado #80.4 (A = 11,60 cm²), según el prontuario Perfiles Huecos Cuadrados en el ANEXO III. PRONTUARIO.

6.2.5 COMPROBACIÓN DE FLECHA

Mediante el método de los esfuerzos virtuales, se comprueba que la flecha de la estructura de las celosías no supera la flecha máxima admisible. Calculando los esfuerzos virtuales de cada sección de las barras y cada una de sus flechas correspondientes, se llega a la flecha total de la celosía.

<i>Flecha total de las barras</i>	<i>Flecha máxima admisible</i>
$\delta_T = \sum \frac{N_{real} \cdot N_{virtual} \cdot L}{E \cdot A}$	$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{300}$
0,16 m	0,453 m

Tabla 23. Flecha total de la celosía

Como se puede observar en la Tabla 23, la flecha máxima de la celosía es menor que la admisible, por lo que no habrá ningún problema en la estructura.

6.2.6 REPERCUSIÓN POR METRO CUADRADO DEL PESO PROPIO

Elegidos los perfiles que se utilizarán para la estructura de la celosía, es necesario comprobar que la hipótesis tomada sobre la carga generada por el peso de las celosías es correcta, es decir, la carga real no puede superar la estimación inicial tomada, ya que si no habría que rehacer todos los cálculos.

	<i>Cordón inferior</i>	<i>Cordón superior</i>	<i>Diagonales</i>	<i>Montantes</i>
Perfil	#120.6	#120.6	#80.4	#120.6
PP perfil	20,50 kp/m	20,50 kp/m	9,11 kp/m	20,50 kp/m
Longitud total	136 m	135,634 m	419,677 m	492,50 m
PP total	2.788,00 kp	2.780,494 kp	3.823,254 kp	8.251,250 kp

Tabla 24. Pesos propios de las barras de las celosías

Por tanto, en total se obtiene un peso de 17.642,998 kp y, sabiendo que la celosía tiene un área de 806,245 m², se obtiene una carga de 0,215 kN/m², la cual es menor que la estimada de 0,3 kN/m², por lo que la hipótesis tomada inicialmente es correcta.

6.3 CÁLCULO DE LOS ARRIOSTRAMIENTOS

Para dimensionar los arriostramientos de la nave industrial, es necesario recordar la carga que genera el viento frontal sobre la estructura, teniendo en cuenta en este caso tanto el coeficiente de presión como de succión, ya que este tipo de estructura soporta ambas fuerzas.

Teniendo en cuenta los dos coeficientes de presión, tanto presión 0,7 como succión -1,2, los más desfavorables en la fachada, se conoce que la fuerza del viento es como se muestra en la ecuación E. 17.

$$E. 17 \quad q_{eT} = q_b \cdot c_e \cdot (c_{pp} + c_{ps}) + q_i = 1,51 \text{ kN/m}^2$$

Por otro lado, el área de la fachada sobre el que actúa dicha fuerza del viento es de 39,67 m², teniendo en cuenta la separación entre pilares de 6,8 metros y una tercera parte de la altura, es decir, 5,83 metros. Conocido el área, la fuerza que ejerce el viento sobre esa

sección es de 59,98 kN, que, traducido al total de la fachada, es decir, multiplicado por veinte, la fuerza es de 1.199,52 kN.

6.3.1 DIMENSIONADO DE LOS ARRIOSTRAMIENTOS

Es necesario conocer el área de sección del perfil para dimensionar los arriostramientos, como se muestra en la ecuación E. 18.

$$E. 18 \quad A \geq \frac{N_{d\text{diag}}}{f_{yd}}$$

Sabiendo que el esfuerzo axil es como se muestra en la ecuación E. 19, el ángulo es aquel que se forma entre la distancia entre vanos y el doble de separación entre correas de cubierta, ya que los arriostramientos se colocan cada dos correas, por lo que dicho ángulo es de 60,16°.

$$E. 19 \quad N_{d\text{diag}} = \frac{R - \frac{P}{2}}{\text{sena}}$$

Además, la fuerza puntual P se saca de dividir la fuerza total que ejerce el viento entre el número de divisiones que ocupa el arriostramiento en el ancho de la nave que, colocándose cada dos correas, existen un total de 40 divisiones. Por tanto, P_k es una fuerza de 29,99 kN y, mayorándola con su coeficiente correspondiente a una acción variable 1,5, P_d es una fuerza de 44,98 kN.

La reacción R_k es aquella que soporta la mitad de fuerza P, por lo que R_k es veinte veces P_k. Por ello, la reacción mayorada R_d es una fuerza de 899,64 kN.

Con todas estas fuerzas, de la ecuación E. 18 sale un área de 38,61 cm² y, seleccionando en el prontuario de perfiles una pletina que tenga un área mayor o igual que la calculada, se escoge una **PLETINA 100.40**, con un área de 40 cm² y un peso de 31,40 kp/m, según el prontuario Perfiles Rectangulares en el ANEXO III. PRONTUARIO

6.3.2 NORMAL AÑADIDO POR LOS ARRIOSTRAMIENTOS

Debido a la reacción que sufren los arriostramientos causada por la fuerza que ejerce el viento, la carga vertical que sufren los pilares que tienen arriostramientos aumenta. Para

conseguir la carga añadida, se calcula el momento 0 en la base de un pilar, como se puede observar en la Figura 42, sale una reacción añadida de 1.896,93 kN.

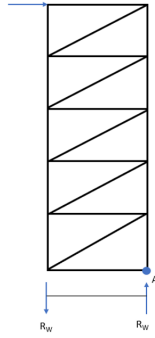


Figura 42. Momento en el punto A

6.4 CÁLCULO DE PILARES

Los pilares tienen dos tipos de carga, por un lado, la carga vertical que viene determinada por el peso de la estructura metálica que soportan y, por otro, la carga que genera el viento sobre ellos. Debido a esto, hay que estudiar tanto el pandeo como el flector de los perfiles utilizados.

Para dimensionar los pilares se utilizará la siguiente fórmula E. 20, en la cual se tiene en cuenta tanto la carga vertical como horizontal. Según la ecuación, la carga admisible es la correspondiente al material, en este caso el acero, es decir, 26,19 kN/cm² que, pasado a kilopondios será 2.669,77 kp/cm². Por otro lado, la normal N_d es la correspondiente a la carga vertical que sufre el pilar y M_d el momento flector que genera la carga de viento. También se sabe que A es el área del perfil escogido y χ el coeficiente de pandeo calculado, además de W_x es el módulo resistente de la sección del perfil seleccionado.

$$E. 20 \quad \sigma_{\max} = \frac{N_d}{A \cdot \chi} + \frac{M_d}{W_x} \leq \sigma_{\text{adm}}$$

Para calcular el pandeo del perfil, al igual que se ha realizado en el punto 6.2.3, es necesario conocer el coeficiente de pandeo, el cual se obtiene según el CTE con las curvas de la Figura 40, sabiendo que las curvas que hay que seleccionar vienen dadas según la sección transversal del perfil que se pretende utilizar dentro también del CTE-DB SE-A.

Para escoger el coeficiente de pandeo adecuado, es necesario conocer la esbeltez reducida la cual viene determinada por la siguiente ecuación.

$$E. 21 \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_E}$$

La esbeltez λ viene determinada por la longitud de pandeo, la cual varía según el eje del pilar, además de i que es el radio de giro de la sección.

$$E. 22 \quad \lambda = \frac{L_k}{i} = \frac{L_R \cdot \beta}{i}$$

Por otro lado, λ_E se refiere al material utilizado, es decir, el acero S275, por lo que quedaría según la ecuación siguiente.

$$E. 23 \quad \lambda_E = 93,91 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 86,81$$

6.4.1 PILARES DE LAS CELOSÍAS

Conocida la fuerza que ejerce el viento sobre los laterales de la nave industrial, la cual es de 5,28 kN/m, se sabe que el esfuerzo flector mayorado que genera dicha carga es de 66,03 kNm, y en kilopondios 673.049,01 kpcm.

La fuerza normal que sufren estos pilares, la cual se trata de la normal que sufre debido a la carga de la celosía y la normal debida a los pesos de la fachada, se traduce en una fuerza normal total mayorada de 523,55 kN, siendo en kilopondios una fuerza de 53.369,43 kp.

Por otro lado, es necesario comprobar ambos ejes del perfil, tanto el eje X como el eje Y, por lo que es necesario conocer las longitudes de pandeo para cada uno de los planos.

Para el plano perpendicular a la fachada, es decir, el eje X, se escoge como longitud más desfavorable de los pilares de las celosías su longitud total, es decir, 10 metros, sabiendo que β en ese caso es de 1.

Para el plano paralelo a la fachada, es decir, el eje Y, hay que tener en cuenta la división entre las correas laterales, las cuales se encuentran separadas entre ellas por 2 metros, siendo esta la longitud de pandeo, sabiendo que β en este caso es de 1 también.

Dentro de las dos comprobaciones según los ejes X e Y, se escoge el coeficiente de pandeo menor entre ambos, ya que así será más restrictivo para el cálculo del perfil necesario.

Tras realizar varias iteraciones hasta obtener el perfil que cumple con todas las características deseadas, es decir, su carga máxima es menor o igual que la carga admisible del material, se obtiene que el perfil más adecuado para los pilares de las celosías es el perfil **HEB 220** ($A = 91 \text{ cm}^2$, $W_x = 736 \text{ cm}^3$), según el prontuario Perfiles HEB en el ANEXO III. PRONTUARIO.

6.4.2 PILARES DE LA FACHADA

Conocida la fuerza que ejerce el viento sobre los frontales de la nave industrial, la cual es de 5,05 kN/m, se sabe que el esfuerzo flector mayorado que genera dicha carga es de 193,28 kNm, y en kilopondios 1.970.255,16 kpcm.

La fuerza normal que sufren estos pilares, la cual se trata de la normal que sufre debido a la carga de la cubierta y la normal debida a los pesos de la fachada, se traduce en una fuerza normal total mayorada de 52,87 kN, siendo en kilopondios una fuerza de 5.389,01 kp.

Por otro lado, es necesario comprobar ambos ejes del perfil, tanto el eje X como el eje Y, por lo que es necesario conocer las longitudes de pandeo para cada uno de los planos.

Para el plano perpendicular a la fachada, es decir, el eje X, se escoge como longitud más desfavorable de los pilares de las fachadas su longitud mayor, es decir, 7,5 metros, sabiendo que β en ese caso es de 1.

Para el plano paralelo a la fachada, es decir, el eje Y, hay que tener en cuenta la división entre las correas frontales, las cuales se encuentran separadas entre ellas por 2 metros, siendo esta la longitud de pandeo, sabiendo que β en este caso es de 1 también.

Dentro de las dos comprobaciones según los ejes X e Y, se escoge el coeficiente de pandeo menor entre ambos, ya que así será más restrictivo para el cálculo del perfil necesario.

Tras realizar varias iteraciones hasta obtener el perfil que cumple con todas las características deseadas, es decir, su carga máxima es menor o igual que la carga admisible del material, se obtiene que el perfil más adecuado para los pilares de las fachadas es el perfil **HEB 240** ($A = 106 \text{ cm}^2$, $W_x = 938 \text{ cm}^3$), según el prontuario Perfiles HEB en el ANEXO III. PRONTUARIO.

6.5 CÁLCULO DE LAS CORREAS DE FACHADA

Para realizar el dimensionamiento de las correas de fachada, se tendrán en cuenta el peso propio real de las correas de la cubierta, el cual es de $0,06 \text{ kN/m}^2$, además del peso propio del panel sándwich de la fachada, el cual era $0,123 \text{ kN/m}^2$. Estas cargas son permanentes, por lo que se mayoran con el coeficiente 1,35.

Además, hace falta añadir por seguridad una sobrecarga puntual de 1 kN debido al peso de una persona. También es necesario recurrir a la carga de viento frontal, de $0,6 \text{ kN/m}^2$, ya que afecta a la estructura de la fachada. Estas cargas, la carga puntual y de viento, son cargas variables, por lo que se mayoran con el coeficiente 1,35, visto en la Figura 24.

Por otro lado, se tendrá en cuenta que habrá una separación de 2 metros entre las correas, por lo que habrá un total de cinco correas en los pilares, ya que se trata de pilares de 10 metros de alto, excluyendo la altura de 2,5 metros de los montantes exteriores.

<i>Carga Total Mayorada Fachada ($q_{dTfachada}$)</i>	<i>Separación entre pilares de fachada de fondo</i>	<i>Carga Total Mayorada Fachada ($q_{dTfachada}$)</i>	<i>Carga Puntual Variable Mayorada (P_d)</i>	<i>Separación entre correas de fachada</i>	<i>Carga Mayorada Viento Lateral ($q_{dviento}$)</i>
0,247 kN/m ²	6,8 m	1,679 kN/m	1,50 kN	2 m	1,782 kN/m

Tabla 25. Cargas que actúan sobre las correas de cubierta

El momento en el eje Y del perfil IPE que sufren las correas de fachadas viene determinado por las cargas verticales, es decir, la carga de fachada y la carga puntual. Además, el momento en el eje X viene determinado por la carga de viento.

<i>Momento en Y</i>	<i>Momento en X</i>
$M_{dy} = \frac{q_{dfachada} \cdot L^2}{16} + \frac{P_d \cdot L}{8}$	$M_{dx} = \frac{q_{dviento} \cdot L^2}{16}$
6,128 kNm	5,150 kNm

Tabla 26. Momentos según los ejes

Sabiendo ambos momentos y el límite elástico del acero (f_{yd}), se dimensiona el perfil de tipo IPE.

$$W_{eje} = \frac{M_d}{f_{yd}}$$

<i>Módulo Resistente en Y</i>	<i>Módulo Resistente en X</i>
23,399 cm ³	19,664 cm ³

Tabla 27. Módulos resistentes calculados

Según el prontuario de perfiles Perfiles IPE en el ANEXO III. PRONTUARIO, sabiendo que el módulo resistente de ambos ejes debe ser mayor o igual a los calculados, se escoge el perfil IPE 200 ($W_x = 194 \text{ cm}^3$, $I_x = 1.940 \text{ cm}^4$, $W_y = 28,5 \text{ cm}^3$, $I_y = 142 \text{ cm}^4$).

6.5.1 COMPROBACIÓN DE FLECHA

Es necesario realizar una comprobación de la flecha del perfil escogido, para así saber si cumple con la restricción del límite de flecha admisible. Calculando la flecha en el eje Y, en este caso cogiendo la carga sobre las correas sin mayorar, ya que se trata de la carga real que sufrirán, se obtiene la Tabla 28.

<i>Flecha en Y</i>
$\delta_y = \frac{q_k \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} + \frac{P_k \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$
$\frac{6,42 \cdot 10^{-8}}{I_y}$

Tabla 28. Flechas de las correas de cubierta

Dimensionando, se saca la relación entre la flecha máxima admisible y la flecha calculada, obteniendo así un valor de inercia en el eje Y del perfil buscado. Por ello, la flecha admisible en este caso se trata de la longitud del vano exterior entre 300.

$$\frac{6,42 \cdot 10^{-8}}{I_y} \leq \frac{6,8}{300} \rightarrow I_y \geq 283,13 \text{ cm}^4$$

Según el prontuario de perfiles Perfiles IPE en el ANEXO III. PRONTUARIO, sabiendo que la inercia en el eje Y debe ser mayor o igual a la calculada, se escoge el perfil **IPE 270** ($W_x = 429 \text{ cm}^3$, $I_x = 5.790 \text{ cm}^4$, $W_y = 62,2 \text{ cm}^3$, $I_y = 420 \text{ cm}^4$).

6.5.2 REPERCUSIÓN POR METRO CUADRADO DEL PESO PROPIO

Sabiendo que el perfil escogido (IPE 270) tiene un peso de 36,10 kp/m, teniendo en cuenta que hay que dividirlo entre la distancia entre correas de 2 metros, sale un peso propio real de las correas de fachada de 0,177 kN/m².

Capítulo 7. DESARROLLO DEL DISEÑO CON EL SOFTWARE CYPE

En este capítulo se explicará el proceso de diseño y cálculo de la estructura metálica de la nave industrial mediante el software de cálculo para ingenieros CYPE, en concreto con CYPE 3D.

7.1 INTRODUCCIÓN DE HIPÓTESIS INICIALES

Según el desarrollo del programa, se comienza completando los datos generales para el desarrollo de la estructura que se quiere diseñar. Por ello, se debe seleccionar la normativa adecuada con respecto al Código Técnico de la Edificación en España, el cual se denomina Código Técnico de Edificación EHE-08.

Además, es necesario definir el tipo de material que se desea emplear en cada una de las estructuras, tomando para este diseño el acero S-275 para el acero laminado, el acero S-235 para el acero conformado y el hormigón HA-25 para los elementos de cimentación calculados por el programa.

Dentro de los datos generales, también se requiere introducir una serie de hipótesis iniciales que se deben tener en cuenta para el desarrollo de la estructura metálica, como son el peso propio de los perfiles, las cargas muertas, sobrecargas de uso donde se incluye la carga por mantenimiento y la carga de nieve y, por último, la carga que genera el viento sobre la nave industrial. Adicionalmente, se ha incluido la resistencia al fuego de revestimiento R30 con pintura intumescente, para evitar así posibles fallos en la estructura.

7.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

De cara a la construcción de la estructura, se introdujeron distintas capas en las cuales se diferencia cada tipo de barra de la estructura, para así facilitar el desarrollo y la legibilidad de toda la estructura, pudiendo así diferenciar las distintas partes que la componen.

Tras esto, se ha procedido a realizar la construcción de la estructura metálica de la celosía, ya que es la más compleja de toda la nave industrial. Para conseguirlo, se definieron cada uno de los elementos que conforman la estructura de una de las celosías con sus medidas respectivamente, siendo estos elementos los montantes, las diagonales, el cordón inferior y el cordón superior. Posteriormente, se tuvo que articular las barras en sus extremos para una correcta unión, además de introducir las características tanto de pandeo como de flexión correspondientes. Con todo ello, la estructura de la celosía obtenida es la mostrada en la Figura 43.

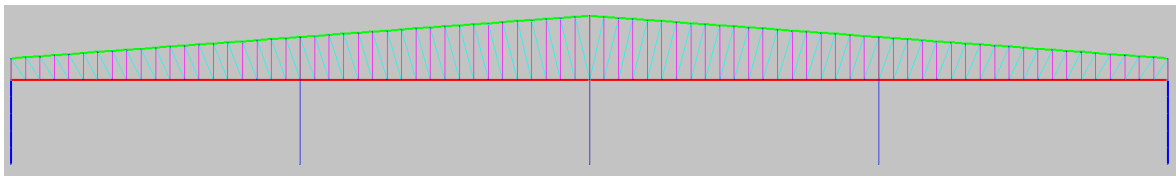


Figura 43. Estructura metálica de las celosías

Posteriormente, se procede a duplicar esta estructura por 23, que es el número de pórticos de tipo celosía que componen la nave industrial planteada y diseñada, separados por una distancia de 5,93 metros.

Después de realizar los pórticos de tipo celosía, se construyen ambos pórticos de fachada, los cuales están compuestos por las vigas de fachada y los pilares correspondientes. Como se ha diseñado, en la fachada hay un total de 21 pilares, ya que se divide en 20 vanos de fachada, con una separación de 6,8 metros. Estos pórticos están separados respectivamente por 5,04 metros de los pórticos de tipo celosía, como se calculó en el punto 5.1.2.3 de este proyecto.

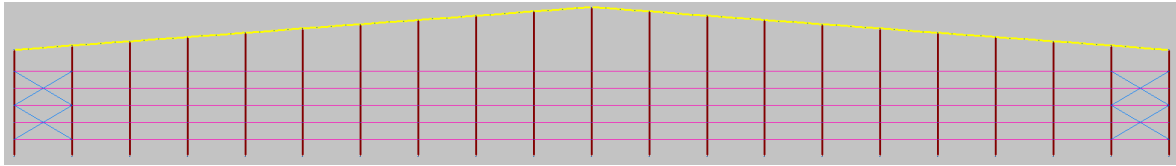


Figura 44. Estructura metálica del pórtico de fachada

Además, se definieron las correas tanto de fachada como laterales y de cubierta a lo largo de toda la estructura y, por último, se introdujeron los arriostramientos.

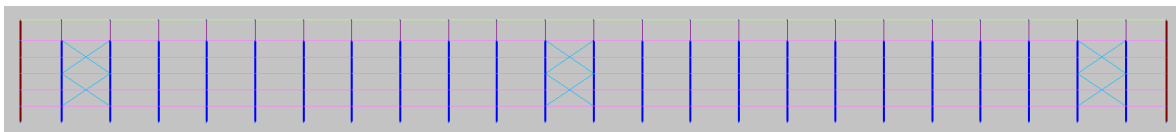


Figura 45. Vista lateral de la nave industrial

Debido a todo este diseño descrito, se obtiene la nave industrial deseada, de 140,5 metros de longitud y 136 metros de ancho, como se puede observar en la Figura 46. Estructura metálica completa

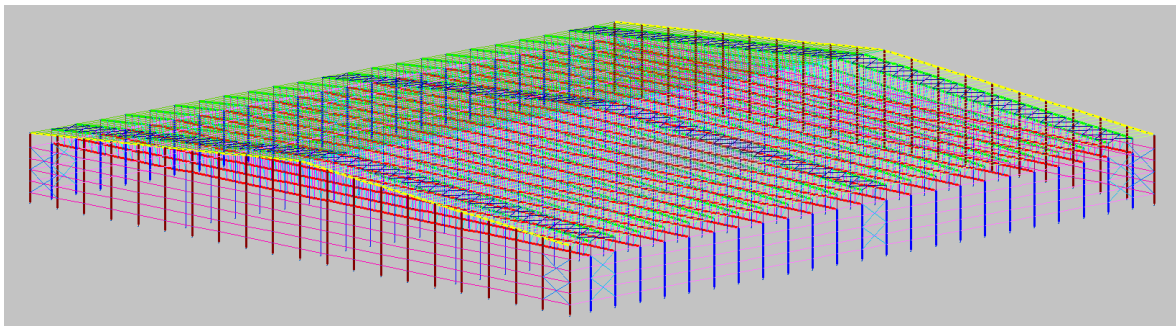


Figura 46. Estructura metálica completa

7.3 INTRODUCCIÓN DE CARGAS

Para el cálculo de la estructura en el programa de CYPE, es necesario introducir algunas de las cargas manualmente, aunque algunas de ellas las toma el programa por defecto como el peso propio de todos los perfiles que componen la estructura. Sin embargo, es necesario introducir las cargas tanto de viento como de nieve que sufre la estructura en cada una de sus caras.

Para la introducción de estas cargas, como están repartidas uniformemente a lo largo de cada una de las caras, se generan paños de cargas en dichas caras para introducir las cargas tanto de viento como de nieve.

Por un lado, se introducen tanto en un lateral como en uno de los frontales de la nave industrial paños que distribuyen la carga de viento calculada anteriormente en el punto 5.2.2.4 correspondiente a cada una de las caras respectivamente, diferenciando entre viento frontal y lateral.

Por otro lado, se insertan paños en ambas aguas de la cubierta donde se especifica la sobrecarga de nieve máxima que puede sufrir la cubierta, teniendo en cuenta además el peso de los posibles paneles fotovoltaicos que se podrán instalar y la carga de viento más desfavorable que sufre dicha cubierta.

Introducidas ya todas las cargas que sufre la estructura metálica, se procede calcular la estructura y se van modificando uno a uno los perfiles hasta conseguir aquellos que cumplen con todas las restricciones impuestas en este proyecto.

7.4 DIMENSIONADO DE LA CIMENTACIÓN

Antes de obtener los perfiles finales con los que la estructura quedaría completamente definida, es necesario dimensionar la cimentación de todos los pilares que componen la nave industrial.

Para ello, el propio programa CYPE tiene un apartado para el cálculo de las cimentaciones de la estructura, donde se puede dimensionar las zapatas y vigas de atado automáticamente para, posteriormente, modificarlas como se desee.

Tras realizar el dimensionado mínimo de dichas cimentaciones, se igualan las zapatas según los pilares de la estructura para reducir las diferencias de construcción y simplificar el trabajo, es decir, se han igualado por filas de pilares en los cuales se tienen las mismas

características. Con ello, se obtiene las siguientes zapatas especificadas en las siguientes figuras, siendo las de los tres pilares centrales que sostienen las celosías del mismo tamaño.

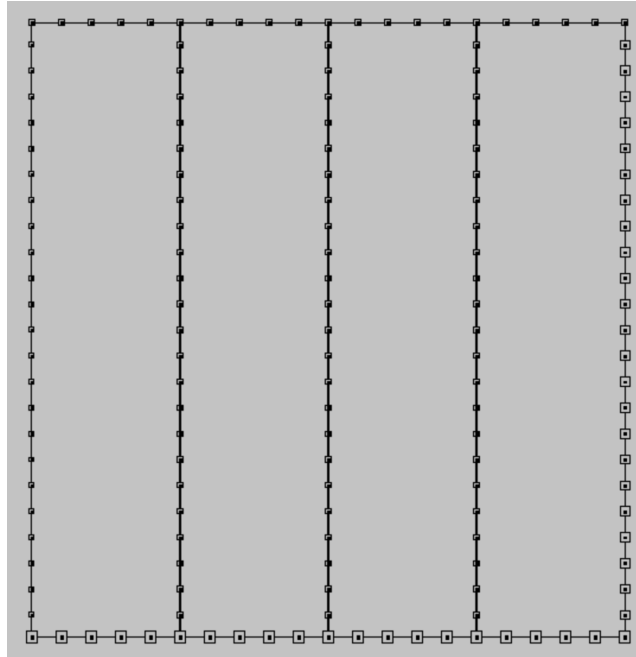


Figura 47. Zapatas de la nave industrial

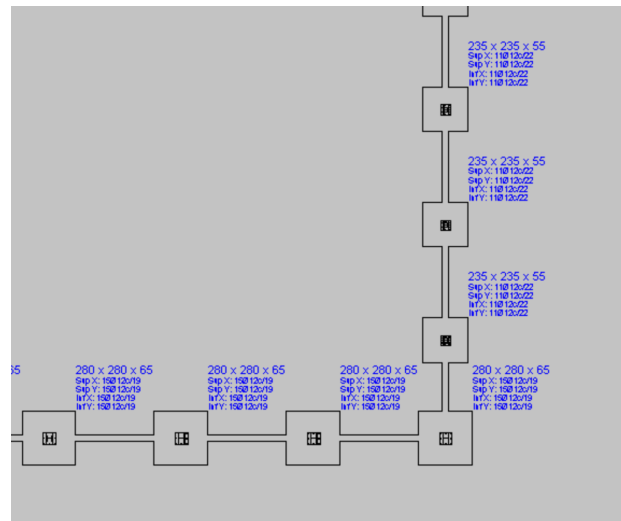


Figura 48. Zapatas parte inferior y derecha

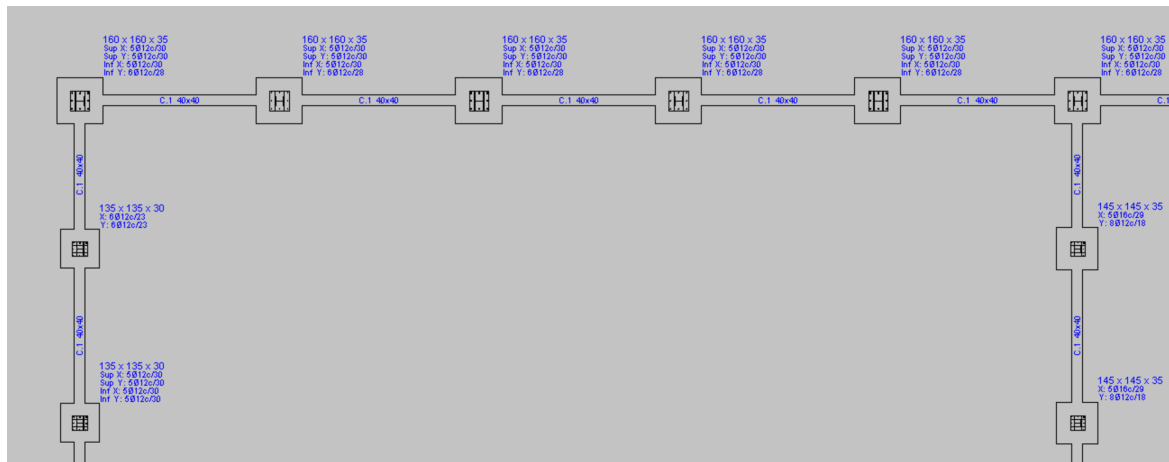


Figura 49. Zapatas parte superior, izquierda y central

7.5 RESULTADOS

Según los cálculos finales que se realizan en el programa para obtener la estructura metálica lo más optimizada posible, teniendo en cuenta todas las cargas que sufre la estructura, se muestran en las siguientes tablas. Los planos correspondientes a la estructura se mostrarán posteriormente en el ANEXO I. PLANOS.

Según como se puede ver en la siguiente figura de forma detallada, las fachadas de fondo son las formadas por los perfiles que se muestran en la Tabla 29.

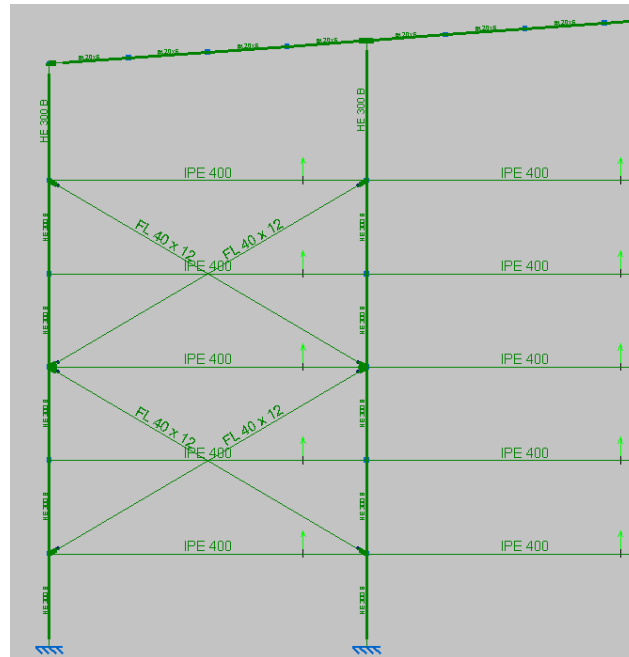


Figura 50. Detalle de las fachadas de fondo de la nave industrial

<i>Partes de la estructura de fachada de fondo</i>	<i>Perfiles seleccionados</i>
Pilares de Fachada	HEB 300
Correas de Fachada	IPE 400
Vigas de Fachada	#120.6
Arriostramientos de Fachada	FL 40x12

Tabla 29. Componentes de las fachadas de fondo de la estructura metálica

<i>Partes de la estructura de cubierta</i>	<i>Perfiles seleccionados</i>
Correas de Cubierta	IPE 400
Correa de Cumbre de Cubierta	IPE 330
Arriostramientos de Cubierta	FL 40x12

Tabla 30. Componentes de la cubierta de la estructura metálica

En la siguiente figura se pueden apreciar de forma detallada los perfiles seleccionados que componen la estructura de las celosías de la nave industrial estudiada.

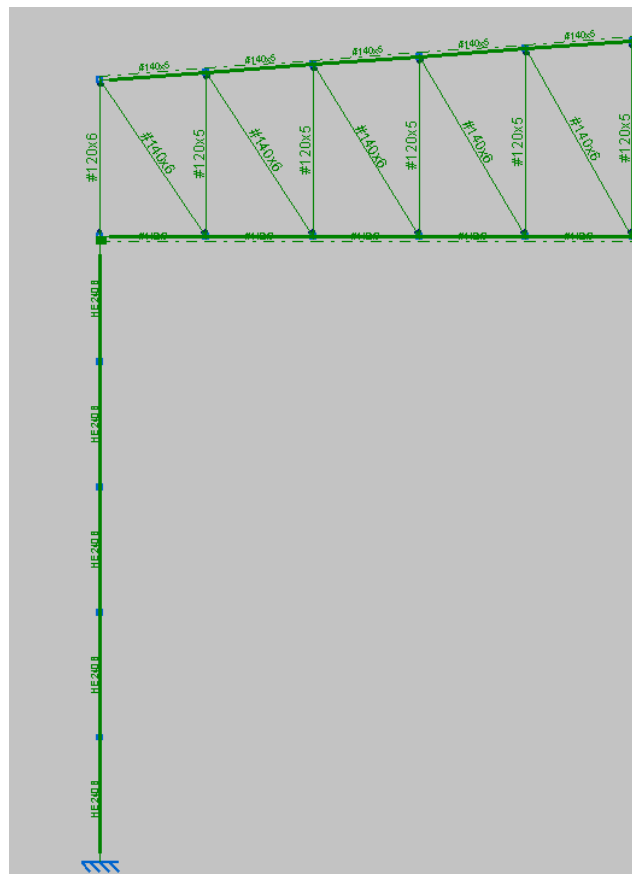


Figura 51. Detalle de las celosías de la nave industrial

<i>Partes de la estructura de las celosías</i>	<i>Perfiles seleccionados</i>
Pilares de Celosías	HEB 240
Cordón Inferior	#140.8
Cordón Superior	#140.5
Montantes Exteriores	#120.6
Montantes Interiores	#120.5
Diagonales	#140.6

Tabla 31. Componentes de las celosías de la estructura metálica

Como se muestra en la siguiente figura, se pueden observar de forma detallada los perfiles que componen la estructura de las fachadas laterales de la nave industrial.

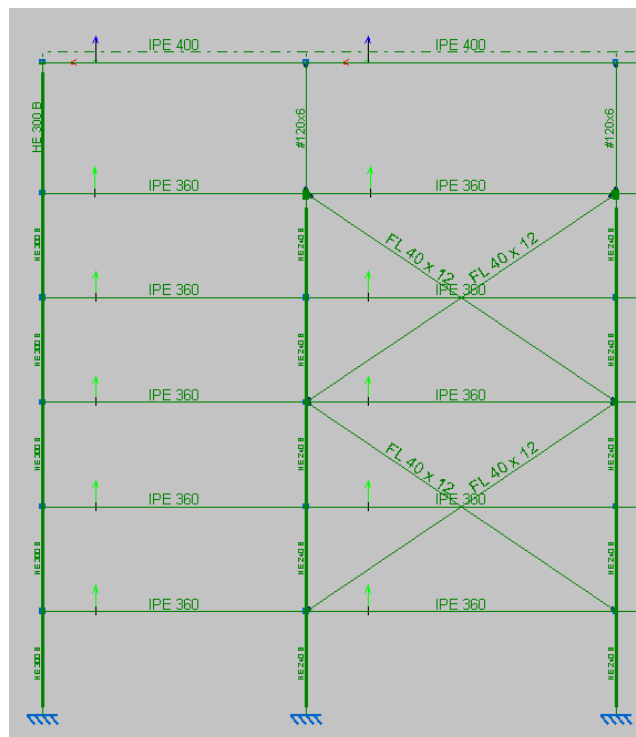


Figura 52. Detalle de fachada lateral de la nave industrial

<i>Partes de la estructura de las fachadas laterales</i>	<i>Perfiles seleccionados</i>
Correas Laterales	IPE 360
Arriostramientos Laterales	FL 40x12

Tabla 32. Componentes de las fachadas laterales de la estructura metálica

7.6 COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE CÁLCULOS Y CYPE

En la actualidad, los cálculos estructurales se realizan directamente mediante programas de cálculo, como en este caso se utilizó el programa CYPE para ingenieros, y se ha dejado en desuso la realización de dichos cálculos paso por paso, aunque siempre es necesario ir realizando durante el proceso de cálculo del software pequeñas comprobaciones en las cuales se verifica que se está cumpliendo correctamente con el Código Técnico de la Edificación (CTE).

Por ello, se quiere realizar una pequeña comparación entre los cálculos realizados y los perfiles obtenidos mediante CYPE, ya que siempre existen algunas diferencias debido a los fallos humanos de cálculo o a la consideración de ciertas cargas que no son necesarias tener en cuenta, pero el programa siempre las toma en consideración.

Por tanto, dicha comparación de resultados se ve reflejada en la Tabla 33, donde se verán las distintas diferencias que surgen en cada uno de los perfiles seleccionados en ambos casos.

<i>Partes de la estructura</i>	<i>Perfiles de los cálculos</i>	<i>Perfiles de CYPE</i>
Pilares de Fachada	HEB 240	HEB 300
Pilares de Celosías	HEB 220	HEB 240
Correas Laterales	IPE 270	IPE 360
Correas de Fachada	IPE 270	IPE 400
Correas de Cubierta	IPE 120	IPE 400
Correa de Cumbra de Cubierta	IPE 120	IPE 330
Arriostramientos	FL 100x40	FL 40x12
Montantes Exteriores	#120.6	#120.6
Montantes Interiores	#120.6	#120.5
Diagonales	#80.4	#140.6
Cordón Inferior	#120.6	#140.5
Cordón Superior	#120.6	#140.8

Tabla 33. Comparación de resultados de cálculo y CYPE

Como se puede observar en la tabla anterior, en la mayoría de los casos los perfiles calculados por el programa CYPE son mayores que los calculados paso a paso. Esto se debe a que el software tiene en cuenta todos y cada uno de los pesos propios de cada una de las barras que componen la estructura, con lo que tiene datos más precisos.

Además, el programa también toma en cuenta todas las cargas que puede sufrir la estructura metálica, incluyendo la resistencia al fuego, la cual no se tiene en cuenta en los

cálculos normales. Sin embargo, los arriostramientos calculados a mano salen mucho mayores que los calculados por CYPE y esto se debe a que los arriostramientos en el software no se definen de la misma manera que calculándolos.

Dado que todos los proyectos actuales se realizan mediante programas de cálculo y, además, CYPE tiene en consideración muchas más restricciones que las tomadas en los cálculos realizados paso a paso, la propuesta final del proyecto es la obtenida mediante el programa para ingenieros CYPE.

7.7 DESARROLLO DE UN PROTOTIPO EN 3D

Como se ha mencionado con anterioridad, se ha realizado un desarrollo en 3D para el prototipado de la estructura metálica de la nave industrial diseñada a lo largo de este proyecto.

Para poder realizar dicho diseño en 3D para la posterior impresión del prototipo, es necesario realizarlo en un archivo de CAD. Por ello, se ha utilizado el programa de CAD Solid Edge, en el cual se han ido diseñando barra por barra que conforman los pórticos para la construcción de los mismos.

Como se puede observar en la Figura 53, se ha realizado el sólido en 3D que corresponde a la fachada de fondo de la nave industrial diseñada, teniendo en cuenta una escala de 1:1000.

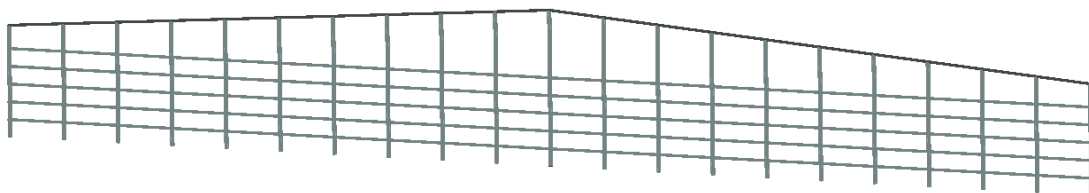


Figura 53. Diseño de prototipo en 3D de la fachada de fondo

Por otro lado, en la Figura 54, se puede apreciar el sólido en 3D de un pórtico de celosía de la estructura metálica diseñada, realizado en una escala 1:1000, del cual se realizarían las impresiones necesarias para conformar la nave industrial al completo.

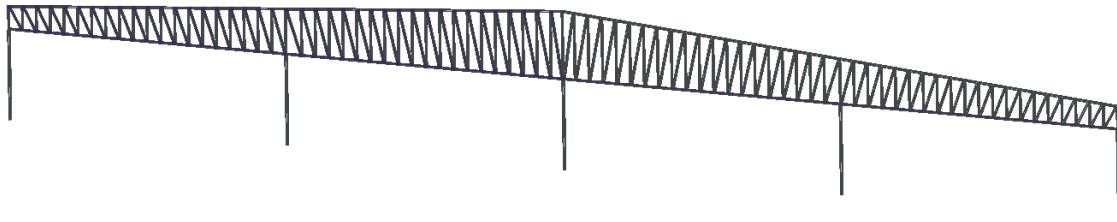


Figura 54. Diseño de prototipo en 3D de un pórtico de celosía

Realizados ambos sólidos en 3D de los pórticos diseñados que conforman la nave industrial, dichos archivos estarían disponibles para la posibilidad de impresión en 3D de una maqueta final de la nave industrial diseñada a lo largo de este proyecto.

Capítulo 8. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

En este capítulo se desarrollará un presupuesto de la estructura metálica de la nave industrial diseñada, comparando a varios proveedores españoles.

8.1 RESUMEN DE PERFILES UTILIZADOS

Para saber cuánto va a costar la estructura metálica, es necesario conocer los perfiles que se van a utilizar. Según el diseño de la estructura metálica de la nave industrial realizado mediante el programa para ingenieros CYPE 3D, se han obtenido los siguientes perfiles para la construcción de la nave industrial propuesta.

<i>Partes de la estructura</i>	<i>Perfiles escogidos</i>	<i>Partes de la estructura</i>	<i>Perfiles escogidos</i>
Pilares de Fachada	HEB 300	Vigas de Fachada	#120.6
Pilares de Celosías	HEB 240	Montantes Exteriores	#120.6
Correas Laterales	IPE 360	Montantes Interiores	#120.5
Correas de Fachada	IPE 400	Diagonales	#140.6
Correas de Cubierta	IPE 400	Cordón Inferior	#140.5
Correa de Cumbra de Cubierta	IPE 330	Cordón Superior	#140.8
Arriostramientos	FL 40x12		

Tabla 34. Resumen de perfiles de la estructura metálica

8.2 LONGITUD TOTAL DE CADA PERFIL

Dado que en el mercado se ofertan los precios según los metros que se requieran de cada uno de los perfiles, es necesario conocer las longitudes totales de cada perfil que se utilizan para la construcción de la estructura metálica.

<i>Partes de la estructura</i>	<i>Longitud total</i>	<i>Partes de la estructura</i>	<i>Longitud total</i>
Pilares de Fachada	625 m	Vigas de Fachada	271,27 m
Pilares de Celosías	1.150 m	Montantes Exteriores	517,50 m
Correas Laterales	1.405 m	Montantes Interiores	8.740 m
Correas de Fachada	1.360 m	Diagonales	9.652,56 m
Correas de Cubierta	11.240 m	Cordón Inferior	3.128 m
Correa de Cumbre de Cubierta	140,5 m	Cordón Superior	3.119,58 m
Arriostramientos	1.939,50 m		

Tabla 35. Longitud total de cada perfil

8.3 PESO DE CADA PERFIL

Dependiendo del tipo de perfil que se requiera, en el mercado se puede vender tanto por metros necesarios de cada uno de los perfiles como por toneladas requeridas. Por ello, es necesario conocer el peso de cada tipo, gracias al prontuario de perfiles de el ANEXO III. PRONTUARIO

<i>Tipo de perfil</i>	<i>Peso</i>	<i>Peso total</i>
HEB 300	117 kg/m	73,125 tn
HEB 240	83,20 kg/m	95,680 tn
IPE 360	57,10 kg/m	80,226 tn
IPE 400	66,30 kg/m	835,380 tn
IPE 330	49,10 kg/m	6,899 tn
FL 40x12	3,77 kg/m	7,312 tn
#120.6	20,50 kg/m	16,170 tn
#120.5	17,40 kg/m	152,076 tn
#140.5	20,50 kg/m	63,951 tn
#140.6	24,30 kg/m	234,557 tn
#140.8	31,40 kg/m	98,219 tn

Tabla 36. Pesos totales de los perfiles

8.4 COMPARATIVA DE PRECIOS DEL MERCADO

Según el diseño realizado de la nave industrial y los perfiles escogidos para la construcción de su estructura metálica, se realizará una comparación de precios entre los que ofertan actualmente las grandes fábricas españolas que se dedican a la fabricación de cada uno de los tipos de perfiles y tubos requeridos.

Para los perfiles metálicos de tipo IPE para las correas de la nave industrial y de tipo HEB para los pilares, los precios en el mercado se miden por euros por tonelada, siendo los

mayores productores en España las empresas Compañía Española de Laminación (CELSA Group) y, por otro lado, ArcelorMittal. La comparativa de precios se aprecia en la Tabla 37, donde se elegirá el precio menor para cada uno de los perfiles.

<i>Tipo de perfil</i>	<i>CELSA Group</i>	<i>ArcelorMittal</i>
HEB 300	765 €/tn	770 €/tn
HEB 240	765 €/tn	770 €/tn
IPE 360	765 €/tn	770 €/tn
IPE 400	765 €/tn	770 €/tn
IPE 330	765 €/tn	770 €/tn

Tabla 37. Comparación de precios para perfiles laminados

Por tanto, para todos los perfiles laminados utilizados en este proyecto se propone como proveedor la empresa CELSA Group, ya que los precios actuales de mercado son menores.

Por otro lado, para los perfiles planos utilizados para los arriostramientos, es decir, las pletinas FL 40x12, midiéndose los precios también en euros por tonelada, dos de los mayores productores en España son la empresa MEGASA Siderúrgica y, al igual que para los perfiles laminados anteriores, CELSA Group. La comparativa de precios para el perfil de arriostramientos escogido se muestra en la Tabla 38, donde se escogerá el menor precio posible.

<i>Tipo de perfil</i>	<i>CELSA Group</i>	<i>MEGASA</i>
FL 40x12	629 €/tn	650 €/tn

Tabla 38. Comparación de precios para perfiles planos

Por ello, para el perfil plano FL 40x12 utilizado en este proyecto para el diseño de los arriostramientos a lo largo de toda la nave industrial se propone como proveedor la empresa CELSA Group, ya que los precios actuales de mercado son menores.

Por último, los tubos cuadrados utilizados para las barras de la celosía se venden en el mercado en euros por metro. Comparando los precios actuales de mercado de dos grandes fabricantes españoles de tubos como son la empresa Tubos del Mediterráneo (TUMESA) y Tubos Aranda, se realiza la comparación de precios en la Tabla 39, eligiendo los menores precios posibles para cada tipo de tubo utilizado en el diseño propuesto dentro de este proyecto.

<i>Tipo de perfil</i>	<i>TUMESA</i>	<i>Tubos Aranda</i>
#120.6	17,71 €/m	18,05 €/m
#120.5	14,79 €/m	15,07 €/m
#140.5	17,55 €/m	17,89 €/m
#140.6	21,08 €/m	21,49 €/m
#140.8	29,41 €/m	29,97 €/m

Tabla 39. Comparación de precios para tubos

Como se puede observar en la tabla anterior, los precios ofrecidos por la empresa TUMESA en el mercado actual son menores que los del resto, por lo que se escogerá dicha empresa como proveedora de los tubos cuadrados escogidos para el diseño de las celosías.

8.5 PRESUPUESTO FINAL

Habiendo realizado anteriormente, dentro de este capítulo, la comparativa de distintos precios del mercado actual de varias empresas españolas dedicadas a la fabricación de perfiles metálicos laminados y tubos estructurales, el presupuesto que se propone a

continuación está basado en los menores precios de mercado que existen actualmente, como se pudo observar en este capítulo.

<i>Tipo de perfil</i>	<i>Precio final por producto</i>
HEB 300	55.940,63 €
HEB 240	73.195,20 €
IPE 360	61.372,51 €
IPE 400	639.065,70 €
IPE 330	5.277,39 €
FL 40x12	4.599,19 €
#120.6	13.969,08 €
#120.5	129.264,60 €
#140.5	65.760,61 €
#140.6	169.402,49 €
#140.8	91.994,48 €
TOTAL	1.309.841,96 €

Tabla 40. Presupuesto de la estructura metálica

Por tanto, el presupuesto final de la estructura metálica de la nave industrial diseñada en este proyecto es de **UN MILLÓN TRESCIENTOS NUEVE MIL OCHOCIENTOS CUARENTA Y UN EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS.**

Capítulo 9. OBJETIVOS DE DESARROLLO

SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) consisten en una serie de objetivos globales propuestos en el año 2015 por todos los países que conforman la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los cuales deberían cumplirse en los próximos 15 años, es decir, en el año 2030 deberán haberse cumplido cada uno de los objetivos.

Estos ODS están formados por 17 objetivos globales para ayudar al planeta, erradicar la pobreza global y ayudar a la vida y la prosperidad de todas las personas del mundo. Para conseguir dichos objetivos, es necesario que todo el mundo colabore, por lo que los proyectos deben alinearse con los objetivos correspondientes a su actividad. [13]

Este proyecto se identifica principalmente con el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructuras) y el ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), teniendo en cuenta también los ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante) y ODS 8 (Trabajo Decente y Crecimiento Económico).

9.1 ODS 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURAS

Siendo éste el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster es también definido como “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación”, gracias a lo cual se pueden desarrollar economías dinámicas y competitivas para así conseguir generar empleo e ingresos. Debido a este objetivo, se pueden promover las nuevas tecnologías, hacer un uso eficiente de recursos y ayudar al comercio internacional, como se promueve con la realización de este proyecto. [14]

9.2 ODS 11: CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES

También definido como “Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles”, ya que cada vez hay más zonas urbanizadas y menos rurales, sobre un 60% de la población mundial vive o vivirá para el 2030 en ciudades. Por ello, representan más o menos el 70% de las emisiones de CO₂ y más del 60% del uso de recursos. [15]

9.3 ODS 7: ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE

También definido como “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna”, ya que el uso de energía afecta directamente al cambio climático, ya que es el 60% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, por lo que se trata de realizar energías renovables en la medida de lo posible. Debido a este proyecto, como se instalarán paneles solares, se ayuda a generar energía no contaminante para el medioambiente. [16]

9.4 ODS 8: TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO

También definido como “Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos”, porque con ello, se puede progresar y crear empleos, por lo que se mejora el nivel de vida de la gente. Una de las metas relacionadas con este proyecto es: “Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación”. [17]

Capítulo 10. CONCLUSIONES

Como se ha visto con anterioridad, tras realizar el proyecto de dos distintas formas, la forma metódica de realizar los cálculos en base a la normativa y mediante un programa de cálculo de estructuras, se han comparado los resultados de ambos diseños, para así ver cuál de las dos formas es la manera más fiable de calcular una estructura metálica, ya que actualmente solo se diseña mediante programas de cálculo y se ha dejado en desuso la manera tradicional de calcular dichas construcciones.

Por un lado, se ha realizado el diseño y cálculo de la estructura metálica de la nave industrial siguiendo paso por paso cada uno de los cálculos teniendo en cuenta todos los requisitos impuestos por las normativas existentes de construcción, siendo en este caso el Código Técnico de la Edificación (CTE). Con ello, se han obtenido una serie de perfiles metálicos para cada una de las partes que componen la estructura de la nave, los cuales cumplen con todas las especificaciones tanto de cargas que sufre la estructura y las impuestas por la utilización final impuesta por la empresa como la normativa requerida para asegurar la estabilidad y resistencia de la nave industrial final.

Por otro lado, se ha diseñado la estructura metálica propuesta mediante un programa de cálculo de estructuras, siendo en este caso el software para ingenieros CYPE, en específico CYPE 3D, con el cual se ha obtenido la estructura deseada. Posteriormente, el programa ha calculado la estructura óptima para soportar las cargas que sufre la nave industrial.

Tras realizar dichos cálculos, se ha comprobado que al comparar los perfiles metálicos que corresponden a cada una de las partes que componen la nave industrial, dichos perfiles varían considerablemente. Esto se debe a que el programa de cálculo tiene en cuenta la totalidad del peso propio de todos y cada uno de los perfiles que conforman la estructura. En cambio, en los cálculos realizados de forma manual solo se considera el cálculo de una única estructura, es decir, un único pórtico de celosía, una única fachada, una sola correa,

etc., escogiendo siempre la estructura más desfavorable para dimensionar los perfiles, además de la posibilidad de existencia de errores humanos de cálculo y análisis.

Por tanto, con este análisis se quiere concluir que el mejor método para realizar el diseño y los cálculos de una estructura metálica de una nave industrial es mediante la utilización de un programa de cálculo de estructuras como lo es el software CYPE para ingenieros, siempre y cuando se siga comprobando paso por paso el cumplimiento con la normativa de construcción actualizada, ya que mediante el programa se consigue realizar un diseño de la forma más rápida, eficiente y económica posible.

Capítulo 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Hierro y arquitectura: Un material para la Revolución Industrial*. (s. f.). masdearte. Información de exposiciones, museos y artistas. <https://masdearte.com/especiales/hierro-y-arquitectura-un-material-para-la-revolucion-industrial/>
- [2] CUBA, D. P. R. D. (s. f.). *Palacio de Cristal—Ayuntamiento de Madrid*. <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Cultura-ocio-y-deporte/Cultura-y-ocio/Direcciones-y-telefonos/Palacio-de-Cristal/?vgnextfmt=default&vgnextoid=113f29ea9281c010VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=76f3efff228fe410VgnVCM2000000c205a0aRCRD>
- [3] *El primer gigante de hierro y cristal. Crystal Palace por Joseph Paxton | Sobre Arquitectura y más | Desde 1998*. (s. f.). <https://www.metalocus.es/es/noticias/el-primer-gigante-de-hierro-y-cristal-crystal-palace-por-joseph-paxton>
- [4] Nieto, R. R. (1900). *Las estructuras de los pabellones de la Exposición Universal de París de 1900*. 47.
- [5] *La Torre Eiffel: La construcción de un coloso*. (2023, marzo 31). [historia.nationalgeographic.com.es. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/la-torre-eiffel-la-construccion-de-un-coloso_11345](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/la-torre-eiffel-la-construccion-de-un-coloso_11345)
- [6] *Biblioteca de Santa Genoveva, Labrouste | La guía de Historia del Arte*. (s. f.). <https://arte.laguia2000.com/arquitectura/biblioteca-de-santa-genoveva-labrouste>
- [7] *Puente Don Luis I en Oporto: Historia y arquitectura*. (s. f.). *Guía Nómada de Oporto*. <https://www.oporto.es/que-ver/puente-don-luis-i/>
- [8] *Curso: Construcciones Industriales [DIM-MII-515] (2021-2022)*. (s. f.). <https://sifo.comillas.edu/course/view.php?id=36018>

- [9] *Seguridad Estructural.* (s. f.).
<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/SeguridadEstructural.html>
- [10] *DBSE.pdf.* (s. f.). <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE.pdf>
- [11] Hiansa. (s. f.-a). *Panel HiRock Cubierta—Hiansa.*
<https://www.hiansa.com/productos/panel-sandwich-lana-roca/panel-hirock-cub/>
- [12] Hiansa. (s. f.-b). *Panel HiRock Fachada—Hiansa.*
<https://www.hiansa.com/productos/panel-sandwich-lana-roca/panel-hirock-fachada/>
- [13] Gamez, M. J. (s. f.). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. *Desarrollo Sostenible.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [14] *Infraestructura—Desarrollo Sostenible.* (s. f.).
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- [15] Moran, M. (s. f.-a). Ciudades. *Desarrollo Sostenible.*
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- [16] Moran, M. (s. f.-b). Crecimiento económico. *Desarrollo Sostenible.*
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/>
- [17] Moran, M. (s. f.-c). Energía. *Desarrollo Sostenible.*
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

ANEXO I. PLANOS

En este anexo se incluyen los planos del proyecto obtenido con el programa de cálculo de estructuras CYPE para ingenieros, en los cuales:

- Plano 1: Alzado de celosía y detalles
- Plano 2: Alzado de fachada frontal y detalles
- Plano 3: Perfil de fachada lateral y detalles
- Plano 4: Planta de cimentaciones
- Planos 5, 6 y 7: Tipos de cimentaciones y zapatas

1 2 3 4 5 6 7 8

A A

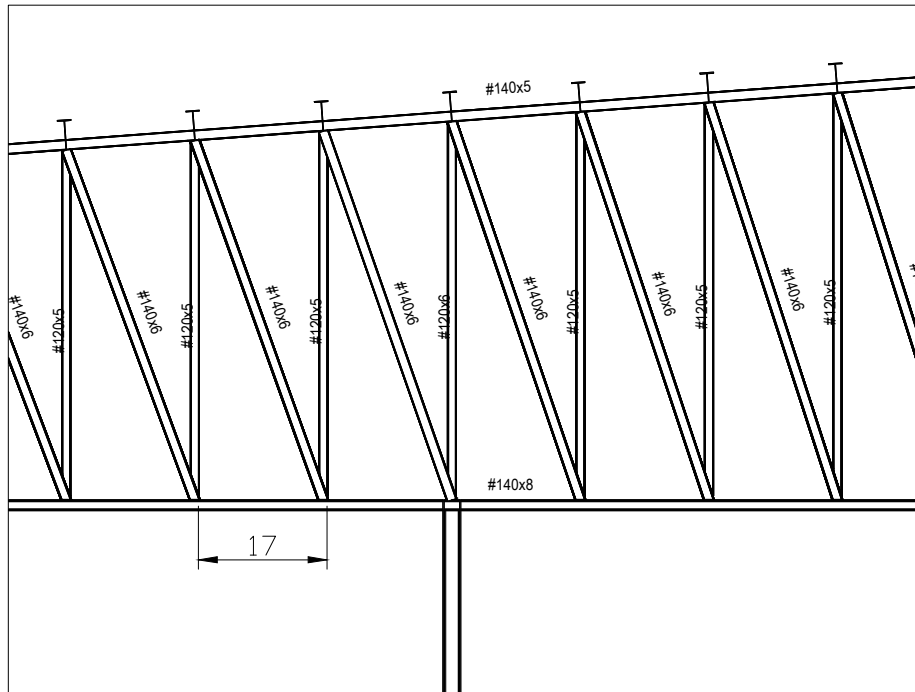
B B

C C

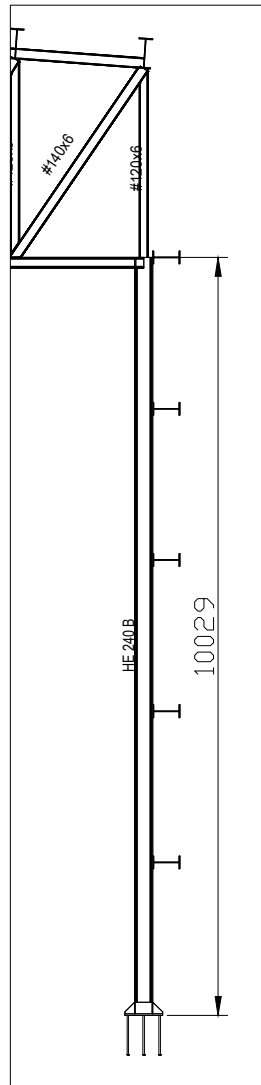
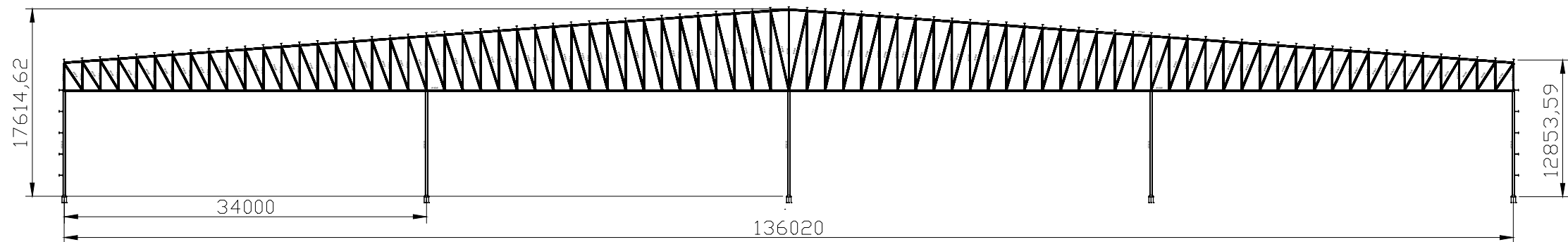
D D

E E

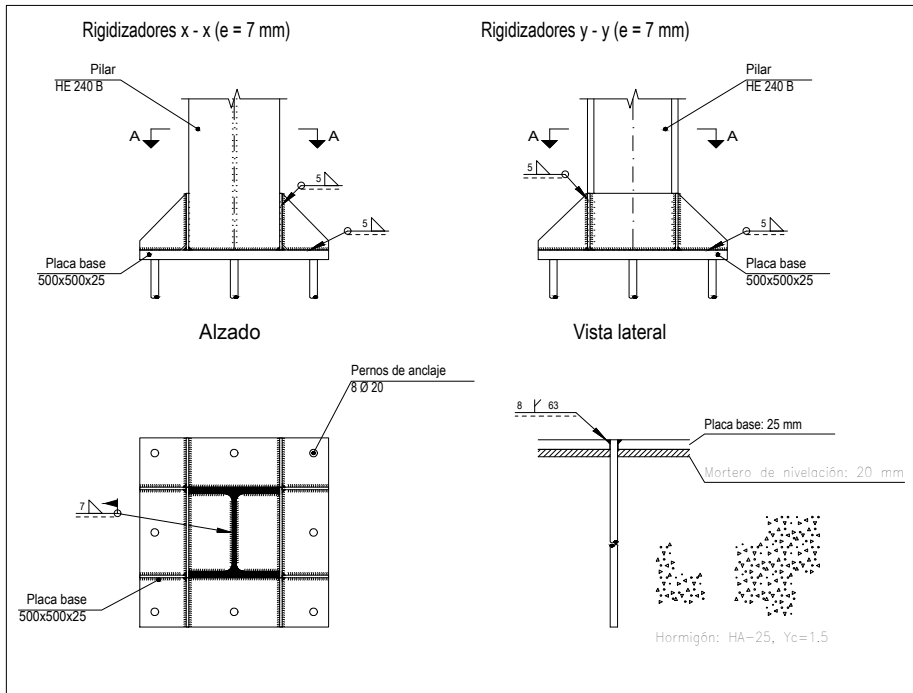
F F



DETALLE BARRAS CELOSÍA ESCALA 1:100



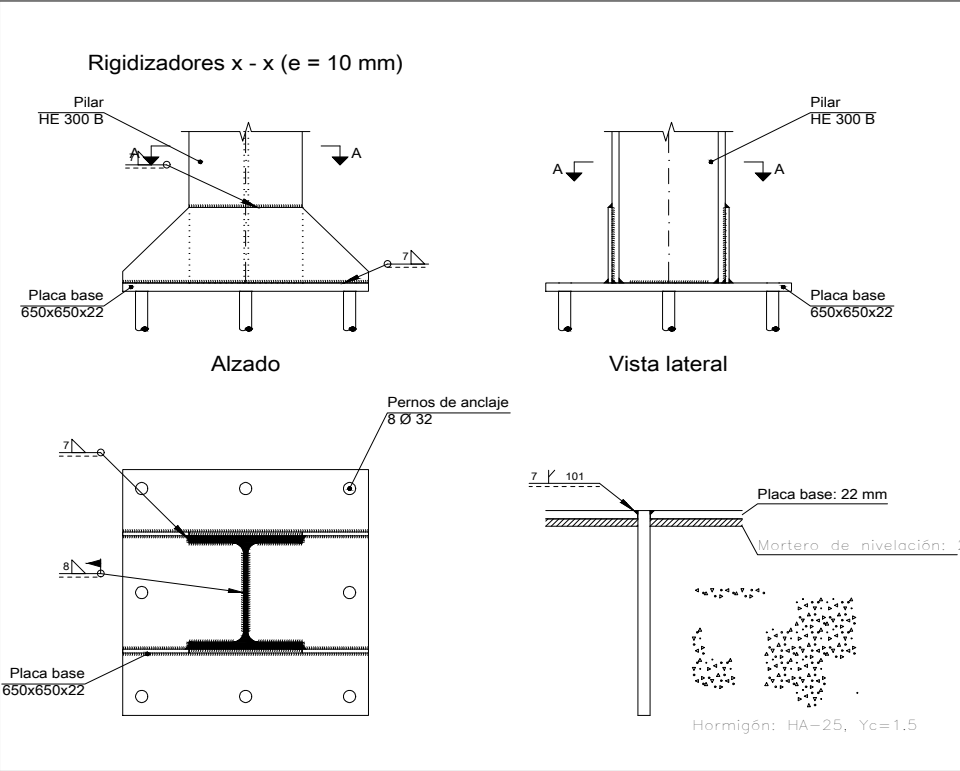
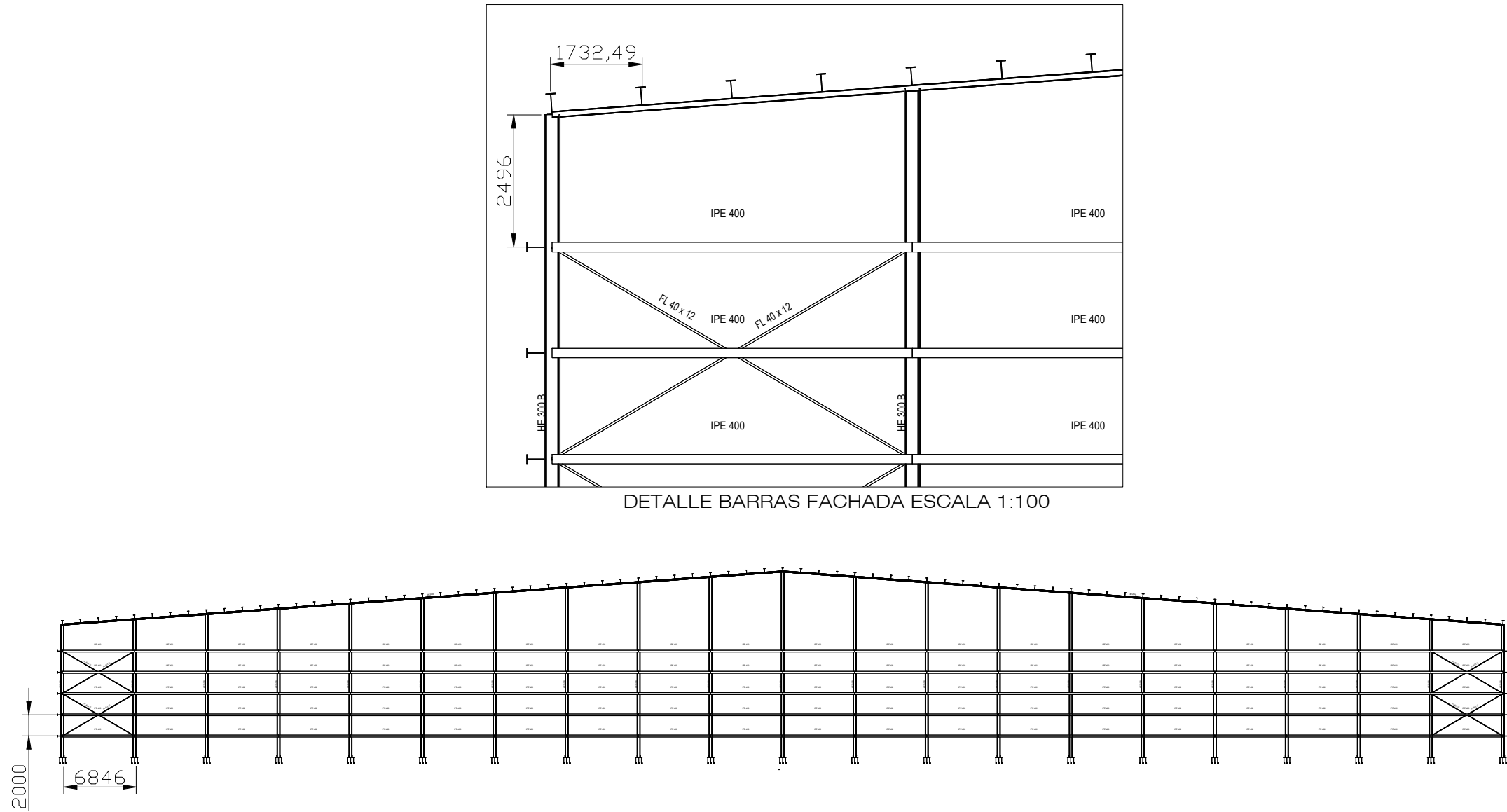
DETALLE PILARES CELOSÍA
ESCALA 1:100



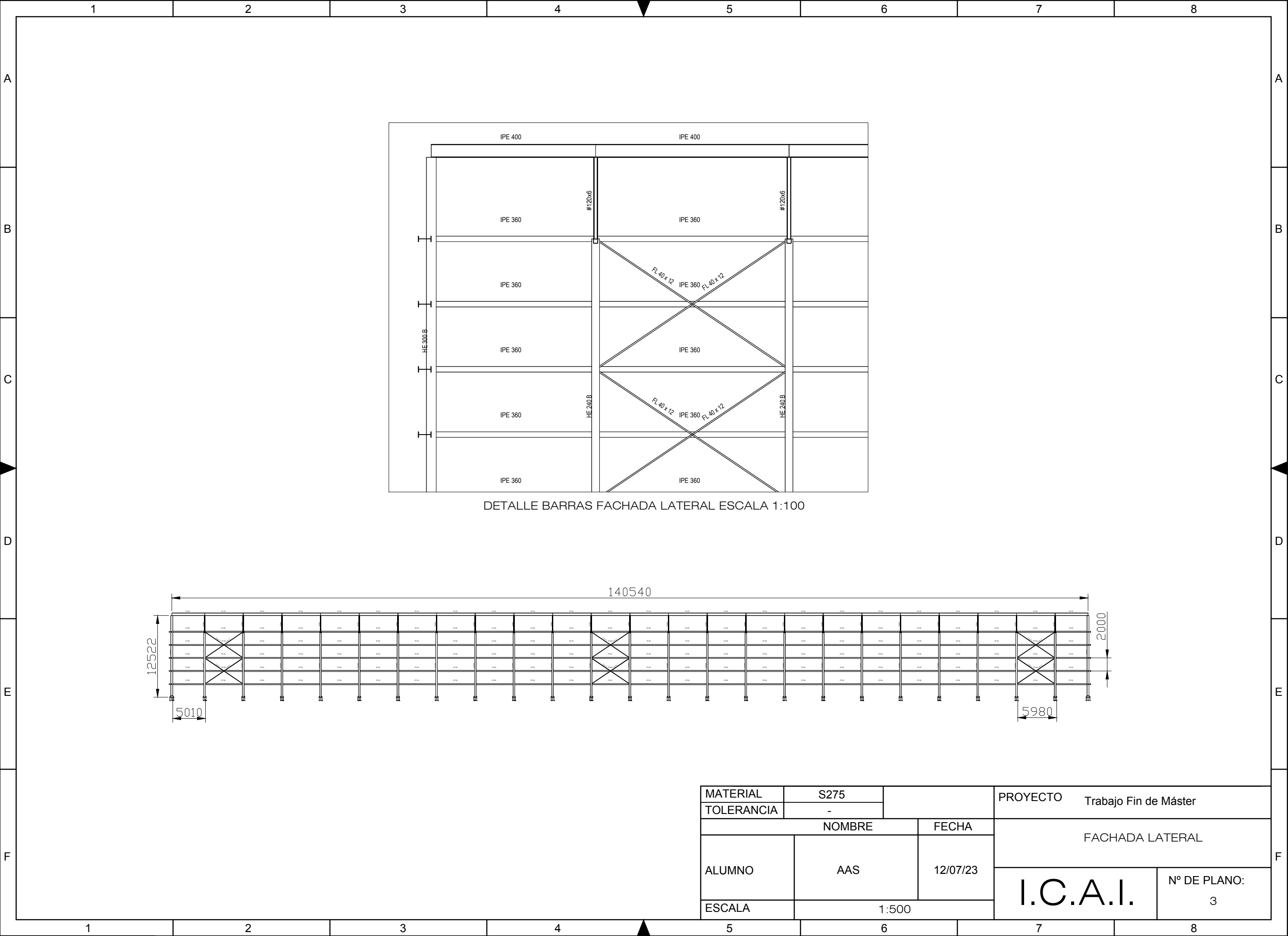
DETALLE PLACAS DE ANCLAJE ESCALA 1:20

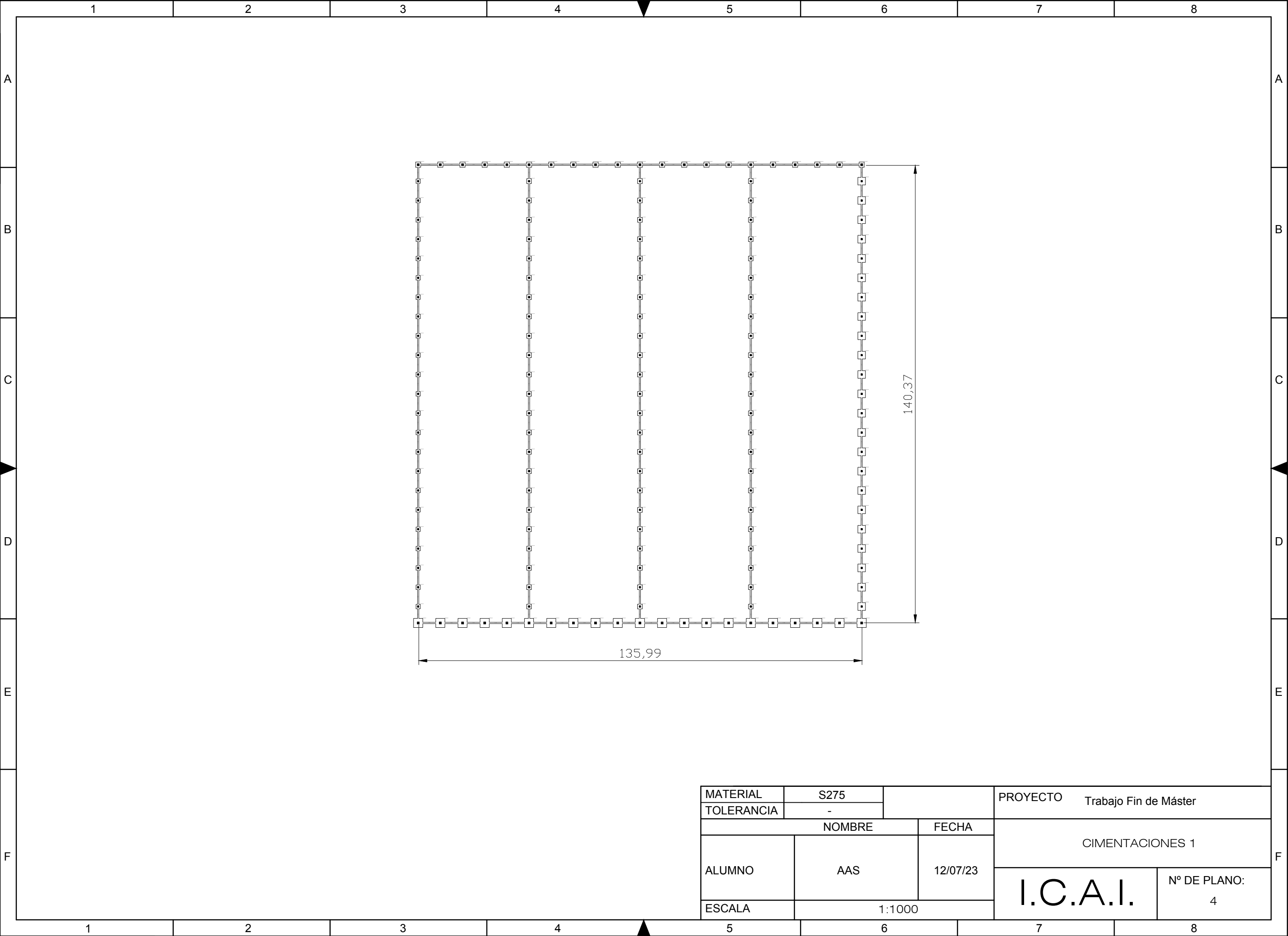
MATERIAL	S275	PROYECTO	Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	-			
NOMBRE		FECHA	PÓRTICO DE CELOSÍA	
ALUMNO	AAS	12/07/23		
ESCALA	1:500	I.C.A.I.		Nº DE PLANO: 1

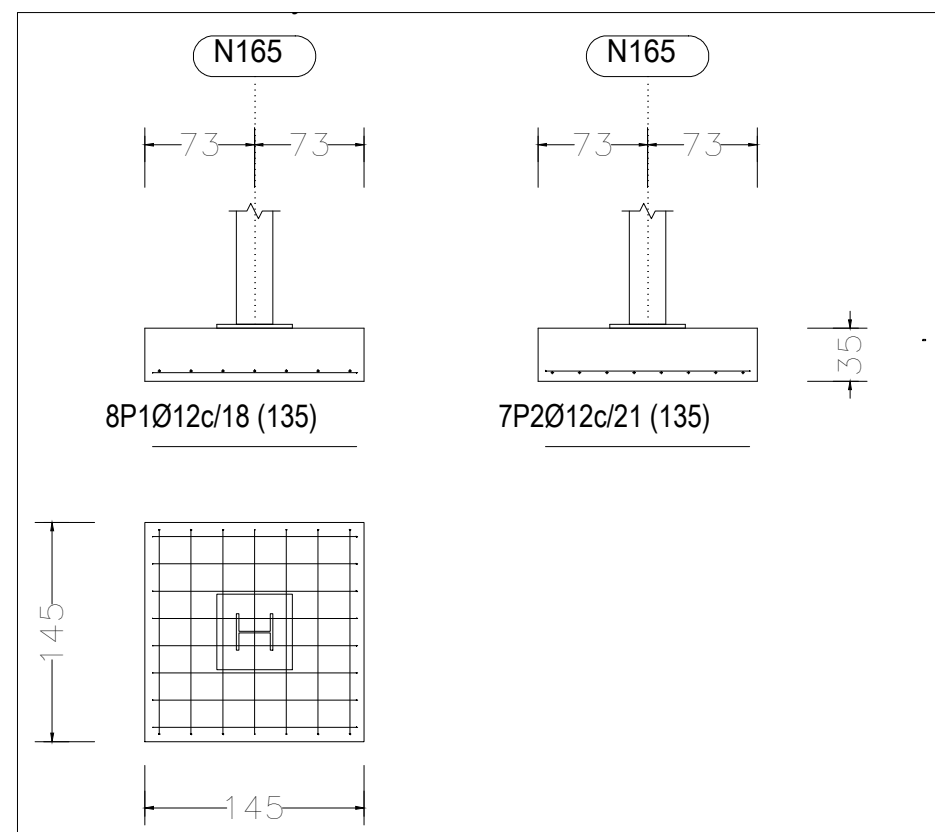
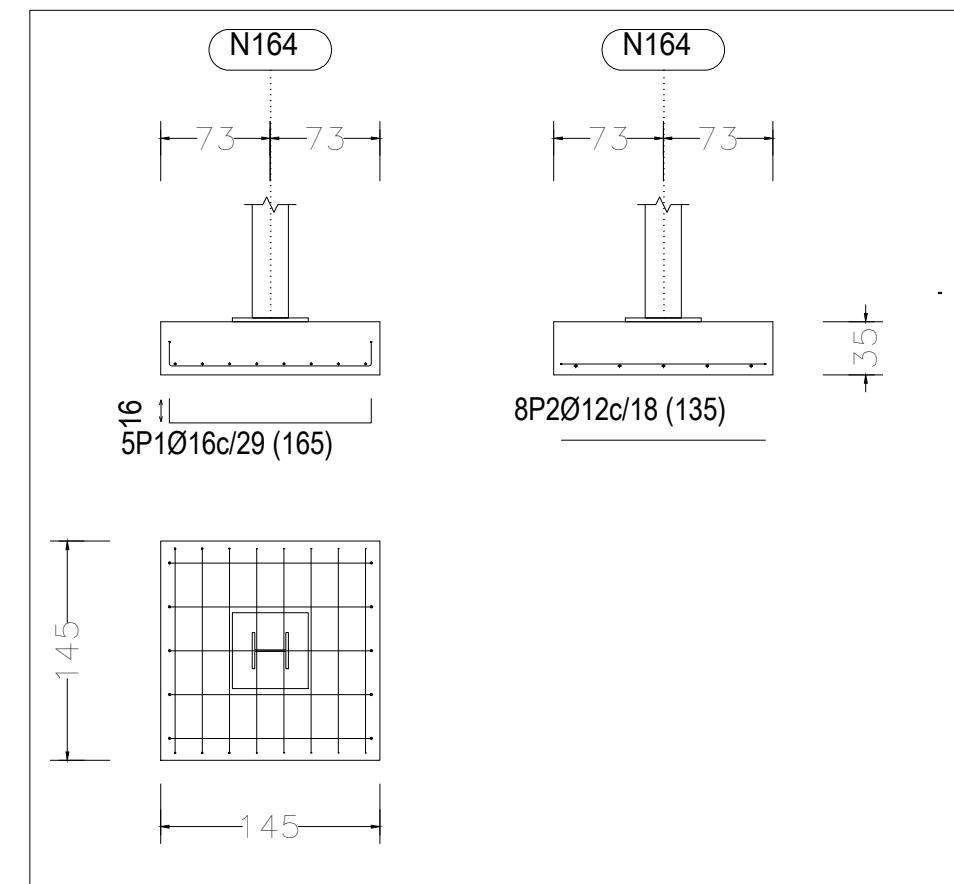
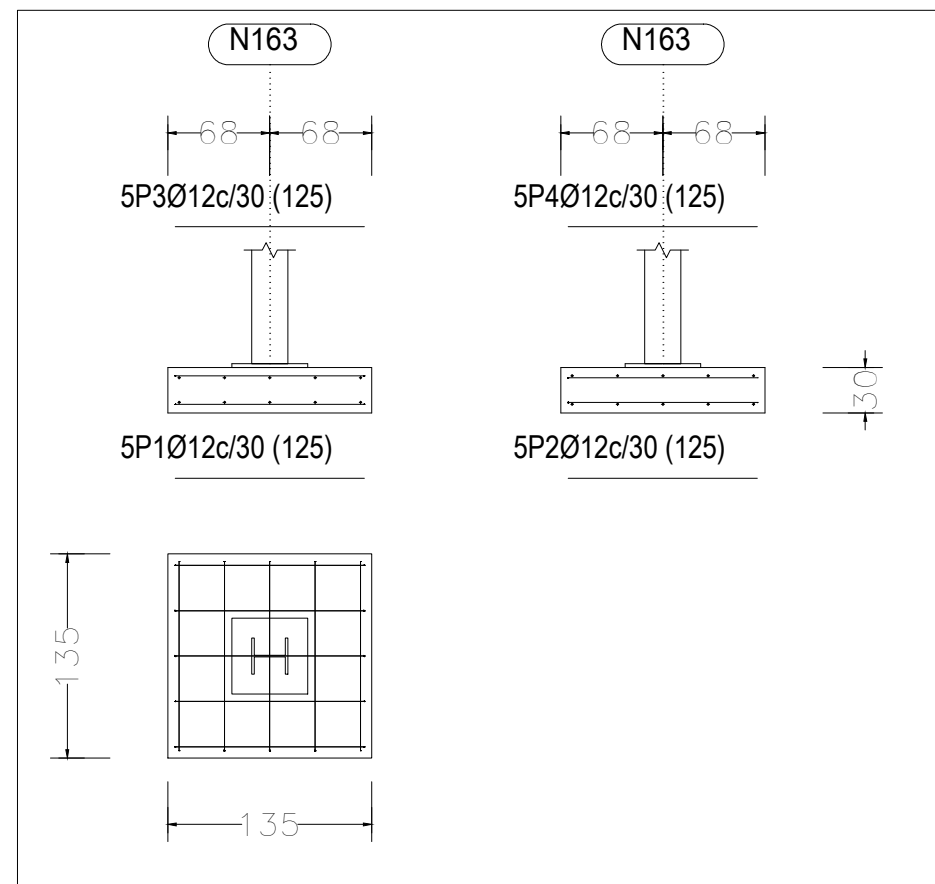
1 2 3 4 5 6 7 8



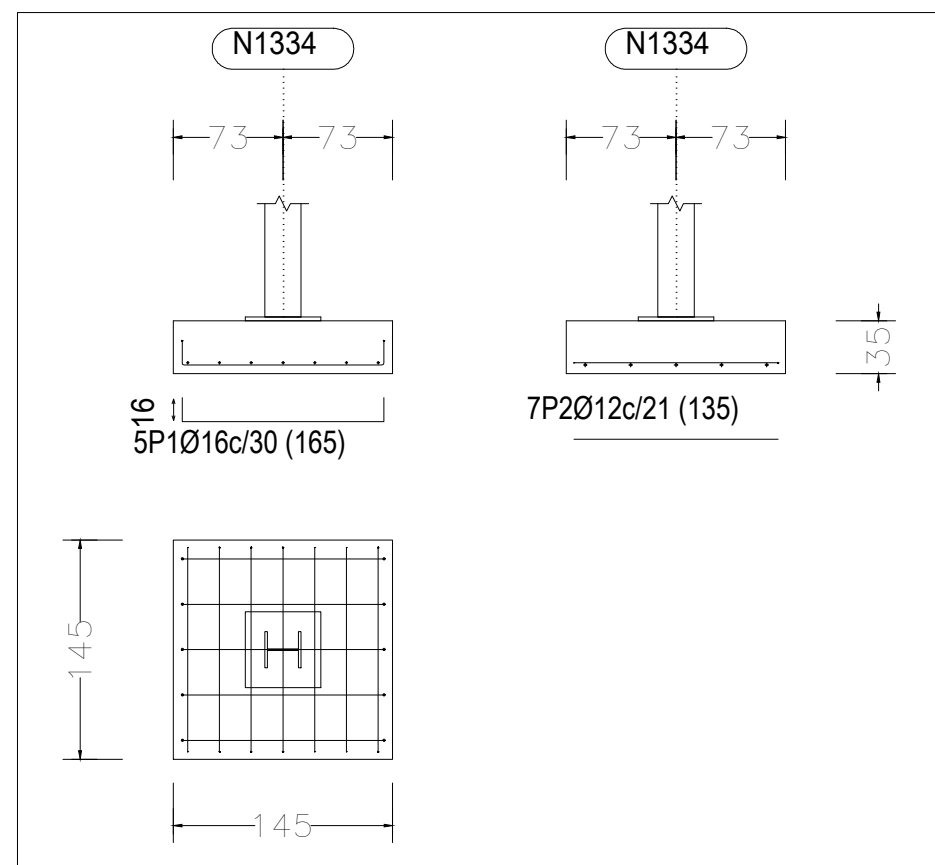
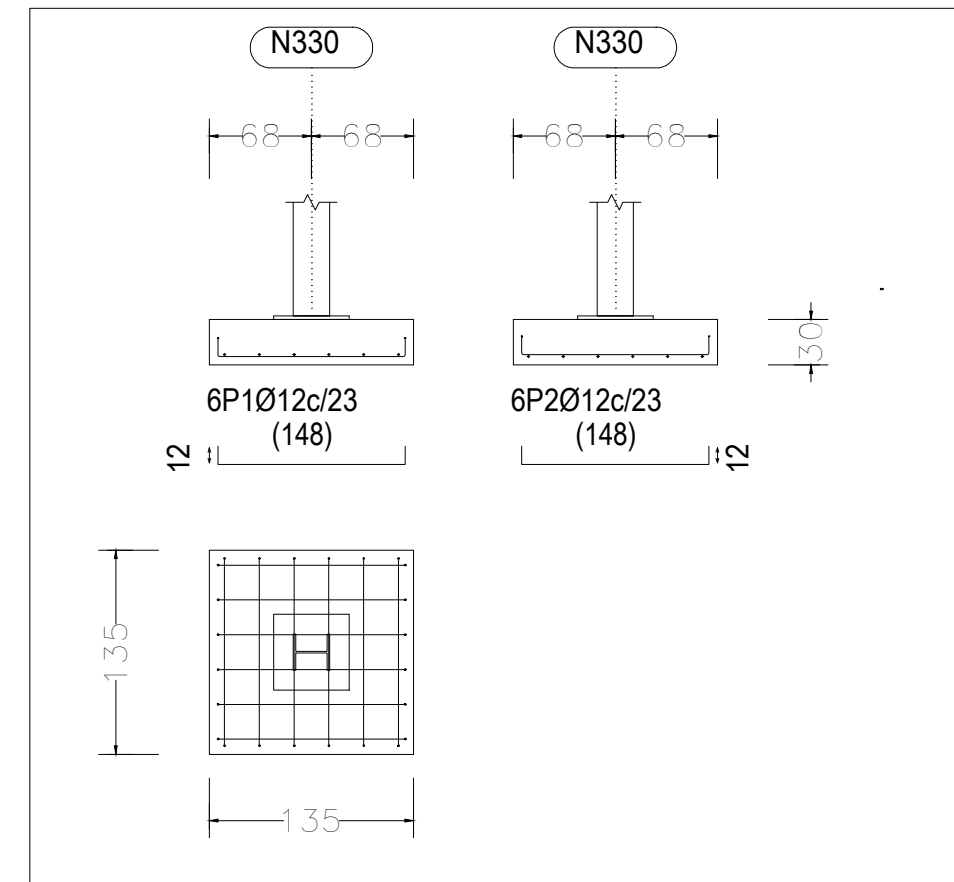
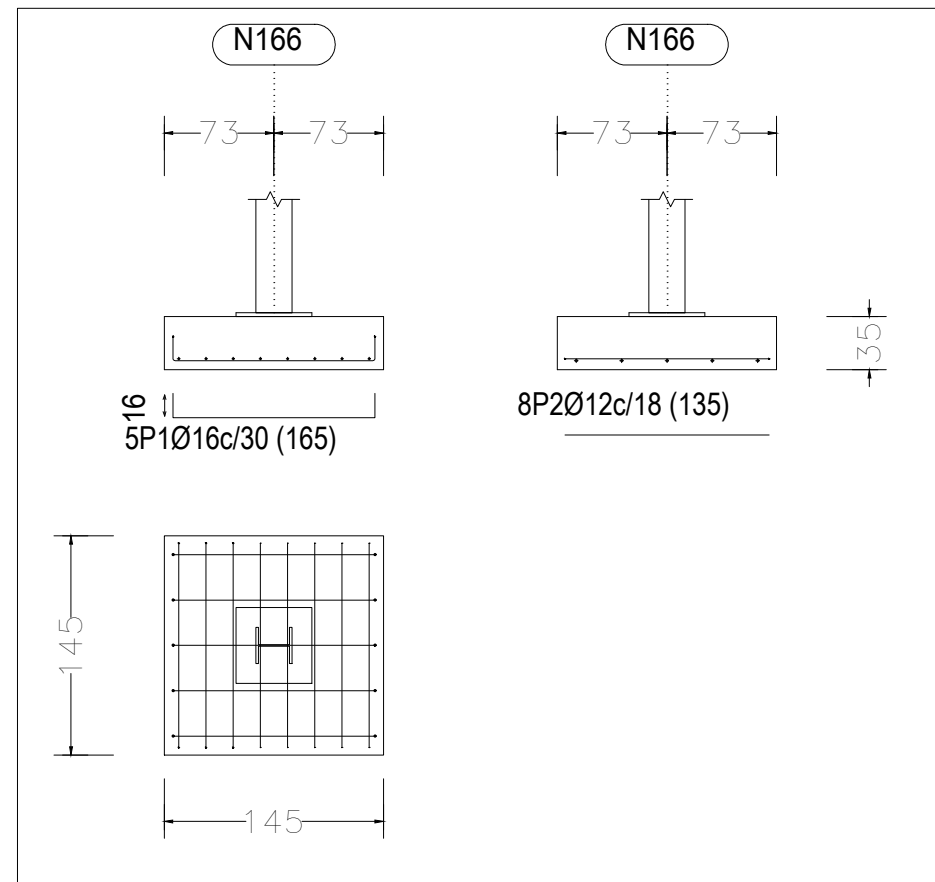
MATERIAL	S275	PROYECTO	Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	-			
NOMBRE		FECHA	PÓRTICO DE FACHADA FRONTAL	
ALUMNO	AAS	12/07/23		
ESCALA	1:500	I.C.A.I.		Nº DE PLANO: 2



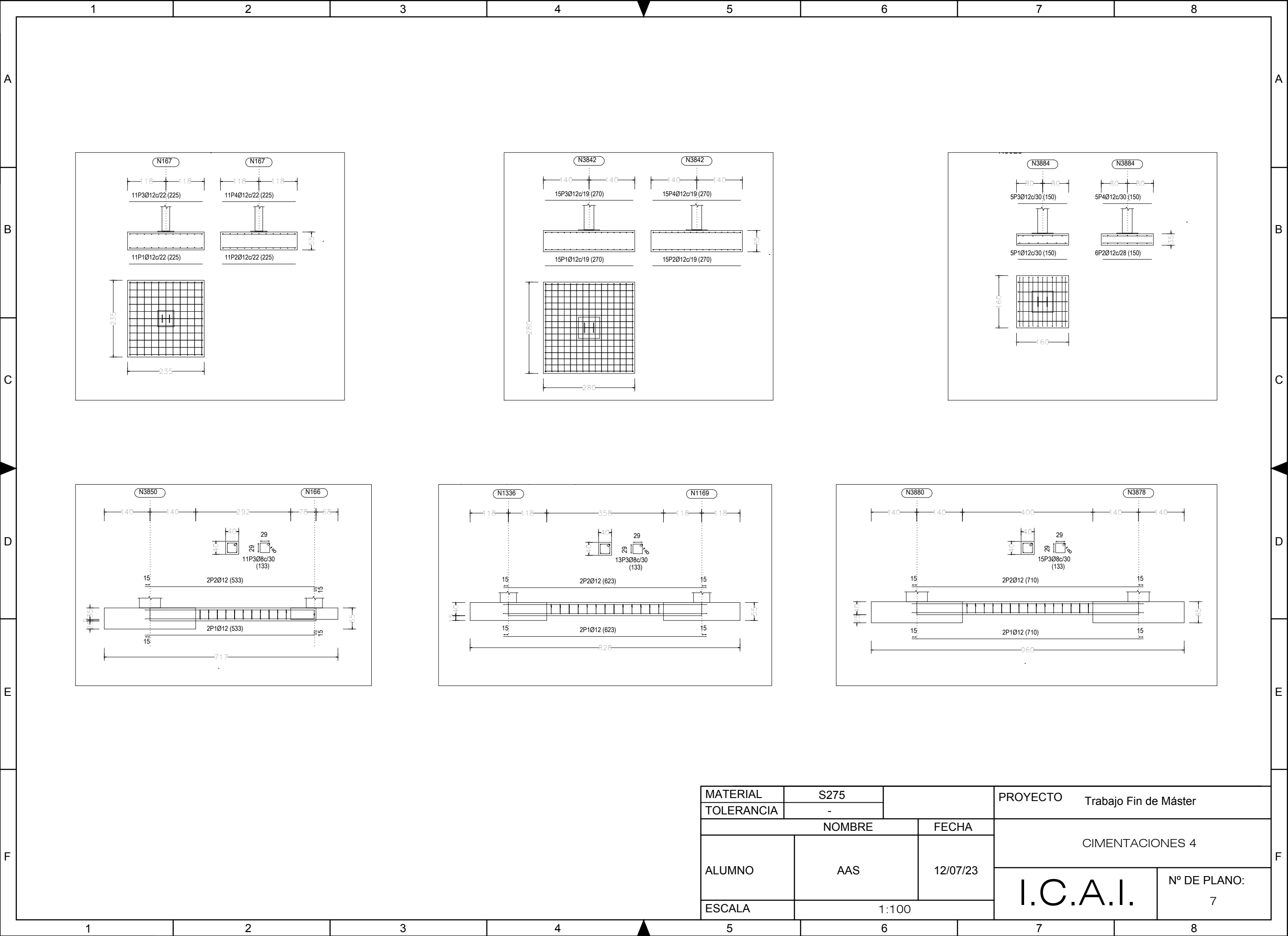




MATERIAL	S275		PROYECTO	Trabajo Fin de Máster
TOLERANCIA	-			
NOMBRE		FECHA	CIMENTACIONES 2	
ALUMNO	AAS	12/07/23		
ESCALA	1:50		I.C.A.I.	Nº DE PLANO: 5



MATERIAL	S275		PROYECTO	Trabajo Fin de Máster
TOLERANCIA	-			
NOMBRE		FECHA	CIMENTACIONES 3	
ALUMNO	AAS	12/07/23		
ESCALA	1:50		I.C.A.I.	Nº DE PLANO: 6



MATERIAL	S275		PROYECTO Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	-			
NOMBRE		FECHA	CIMENTACIONES 4	
ALUMNO	AAS	12/07/23		
ESCALA	1:100	I.C.A.I.		Nº DE PLANO: 7

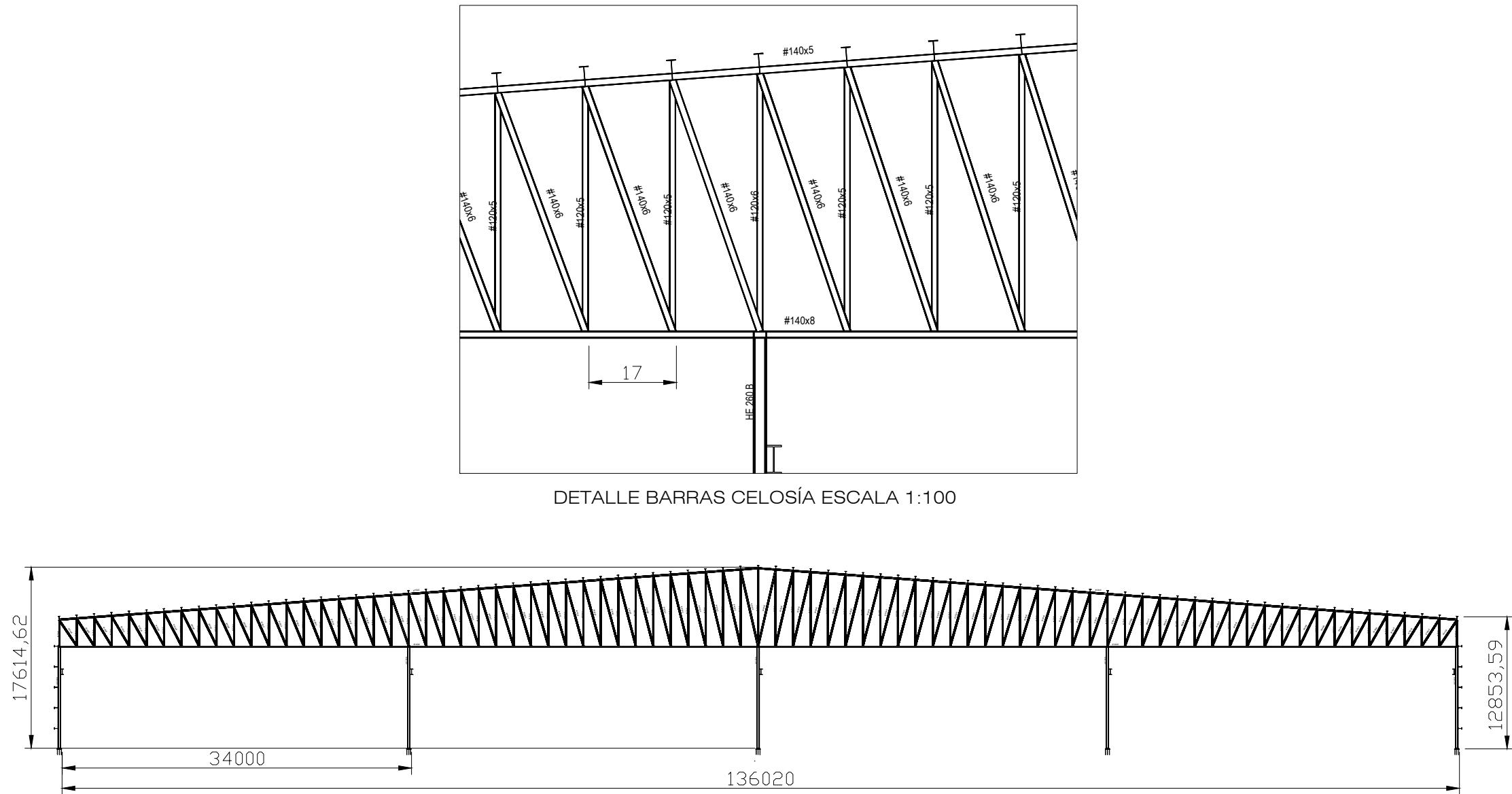
ANEXO II. NAVE CON PUENTE GRÚA

Como se ha mencionado anteriormente, se ha realizado otro diseño de la nave industrial mediante el programa de cálculo de estructuras CYPE para ingenieros, añadiendo en este caso las vigas carrileras del puente grúa y las cargas que genera este elemento sobre toda la estructura metálica.

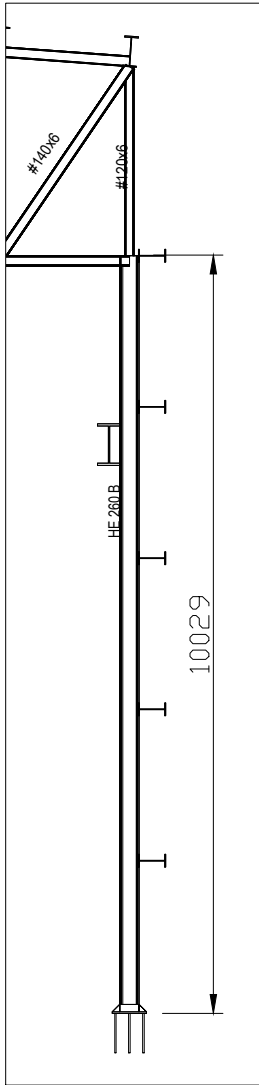
El único cambio que ha sufrido la estructura tras añadirle los puentes grúa son los perfiles de los pilares de las celosías, los cuales son los que sufren toda la carga generada.

Se mostrarán a continuación los planos de este nuevo diseño, en los cuales:

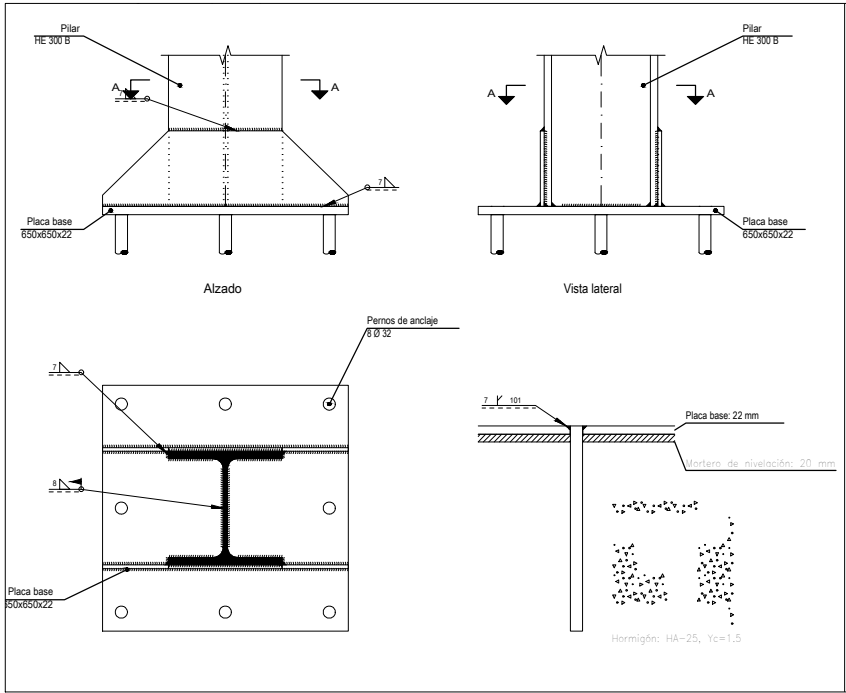
- Plano 1: Alzado de celosía y detalles
- Plano 2: Alzado de fachada frontal y detalles
- Plano 3: Perfil de fachada lateral y detalles
- Plano 4: Planta de cimentaciones
- Planos 5, 6 y 7: Tipos de cimentaciones y zapatas



DETALLE BARRAS CELOSÍA ESCALA 1:100

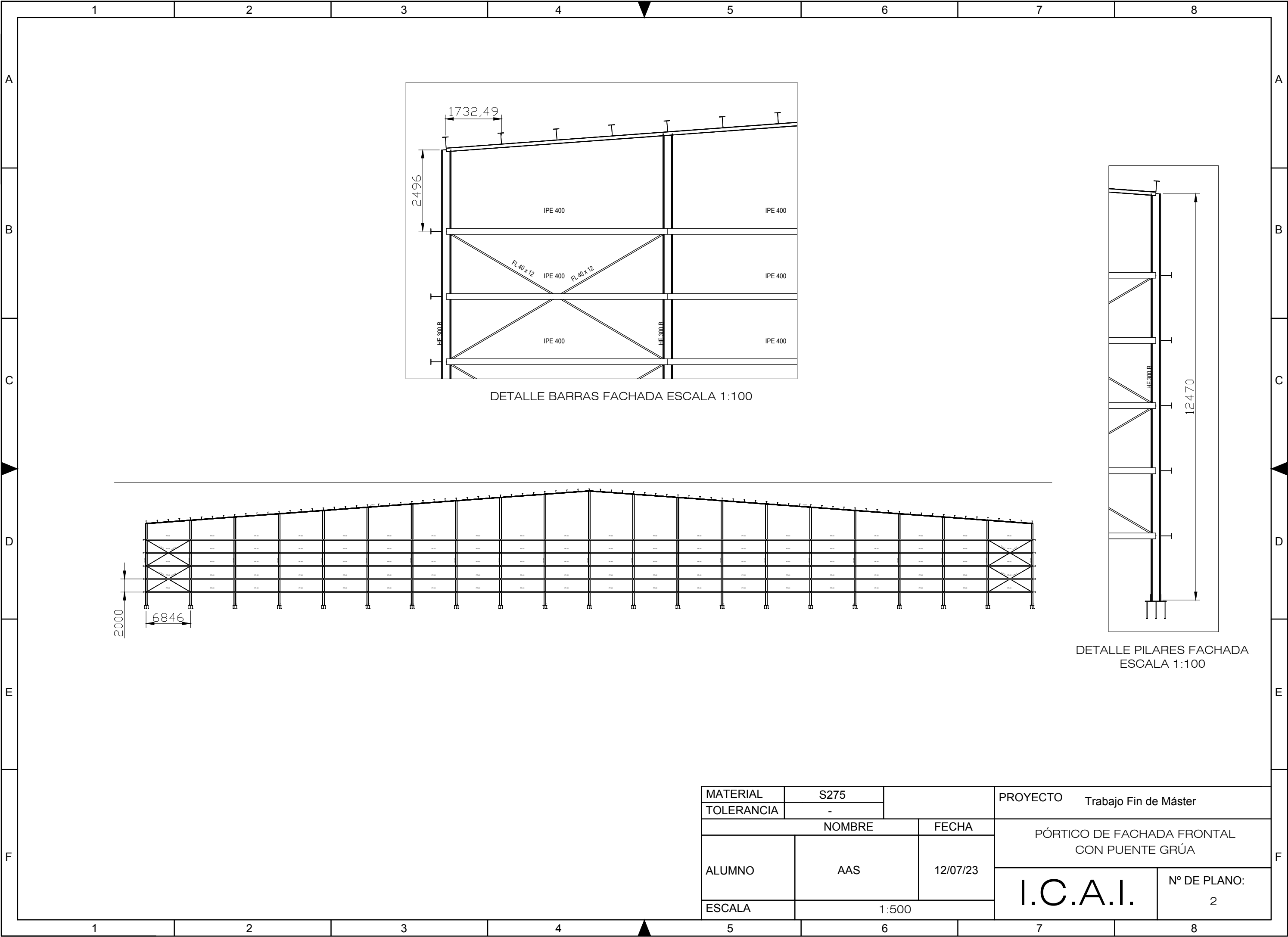


DETALLE PILARES CELOSÍA
ESCALA 1:100

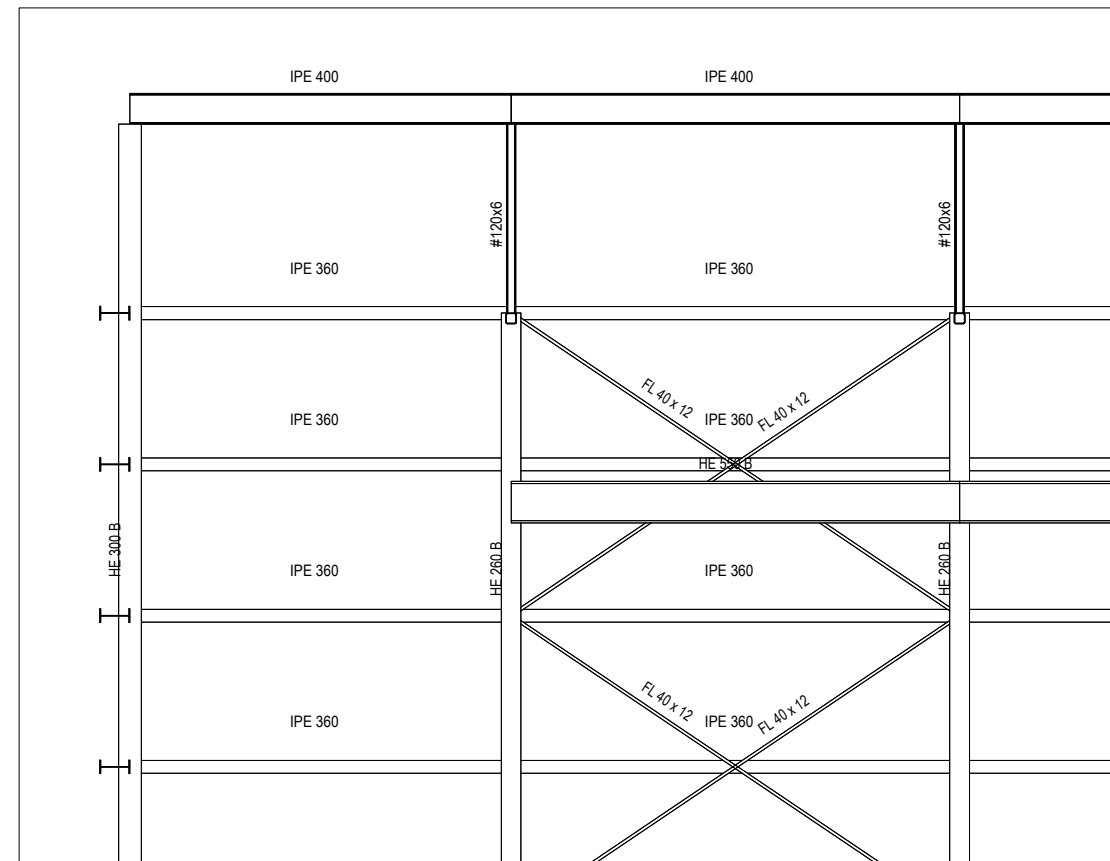


DETALLE PLACAS DE ANCLAJE ESCALA 1:20

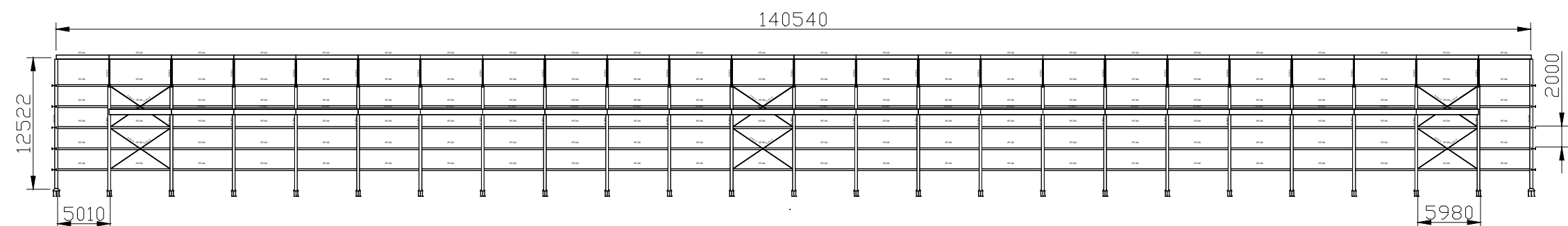
MATERIAL	S275	PROYECTO	Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	-			
NOMBRE		FECHA	PÓRTICO DE CELOSÍA CON PUENTE GRÚA	
ALUMNO	AAS	12/07/23		
ESCALA	1:500	I.C.A.I.		Nº DE PLANO: 1



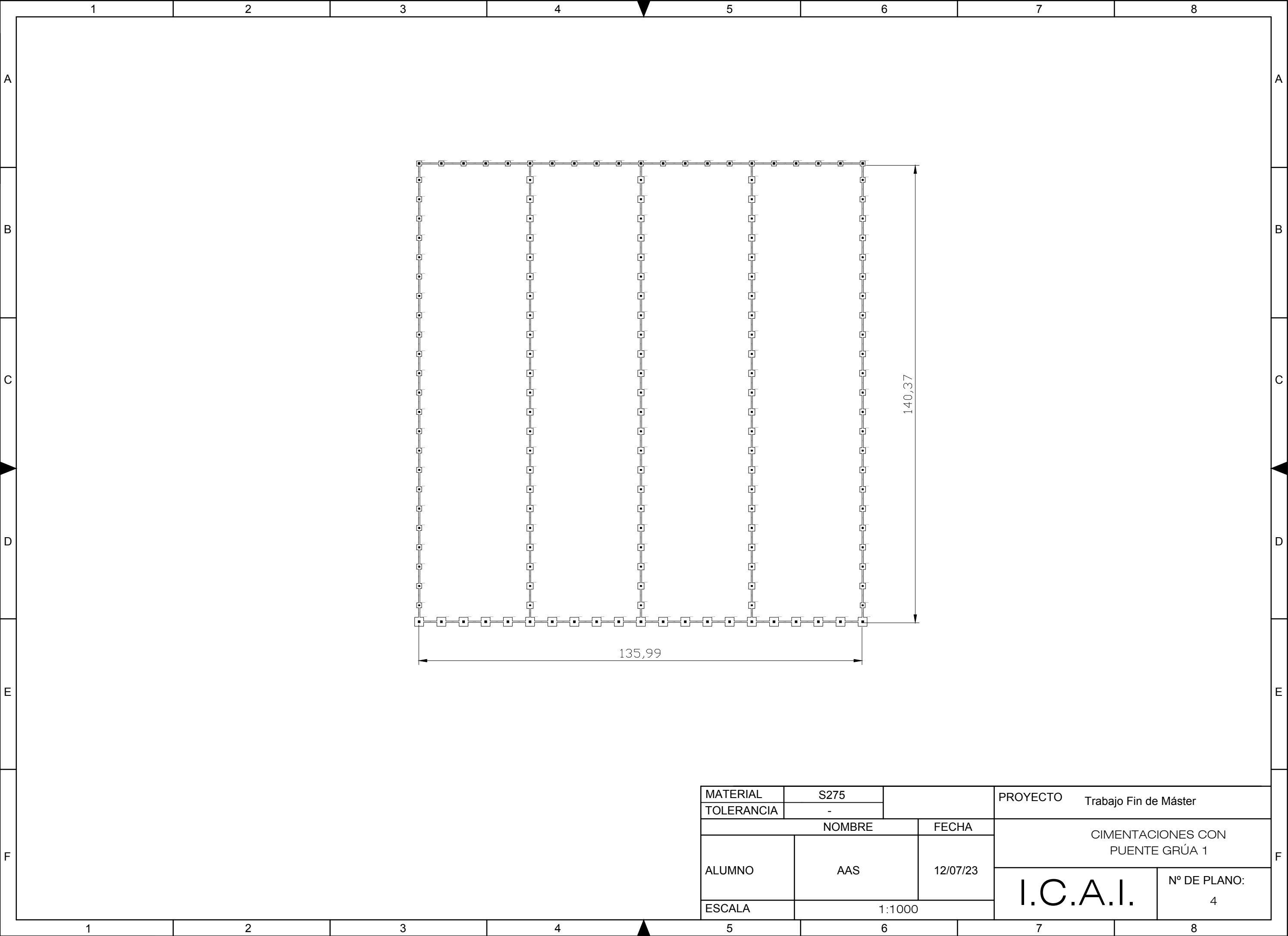
MATERIAL	S275		PROYECTO Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	-			
NOMBRE		FECHA	PÓRTICO DE FACHADA FRONTAL CON PUENTE GRÚA	
ALUMNO	AAS	12/07/23		
ESCALA	1:500		I.C.A.I.	Nº DE PLANO: 2



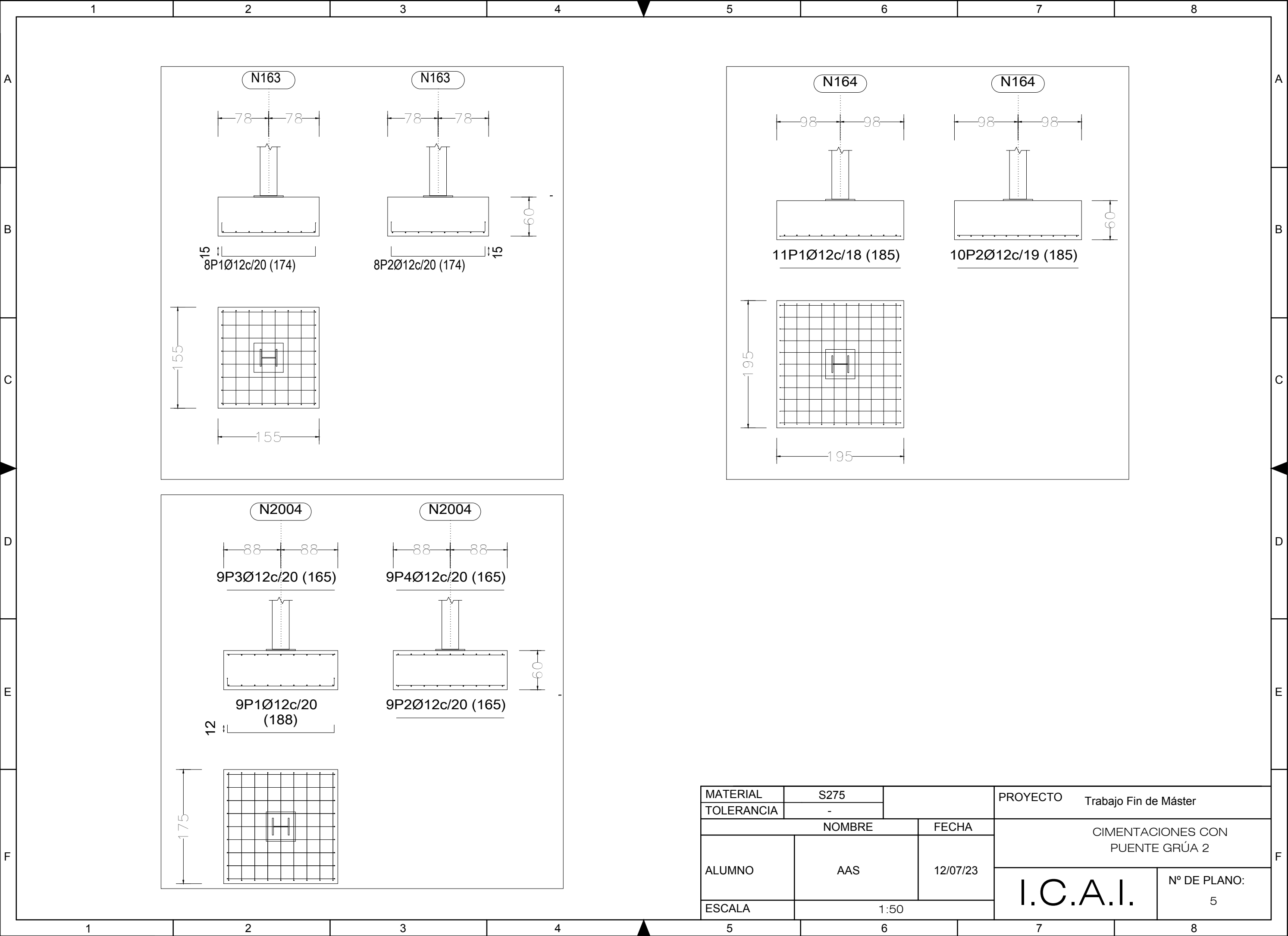
DETALLE BARRAS FACHADA LATERAL ESCALA 1:100



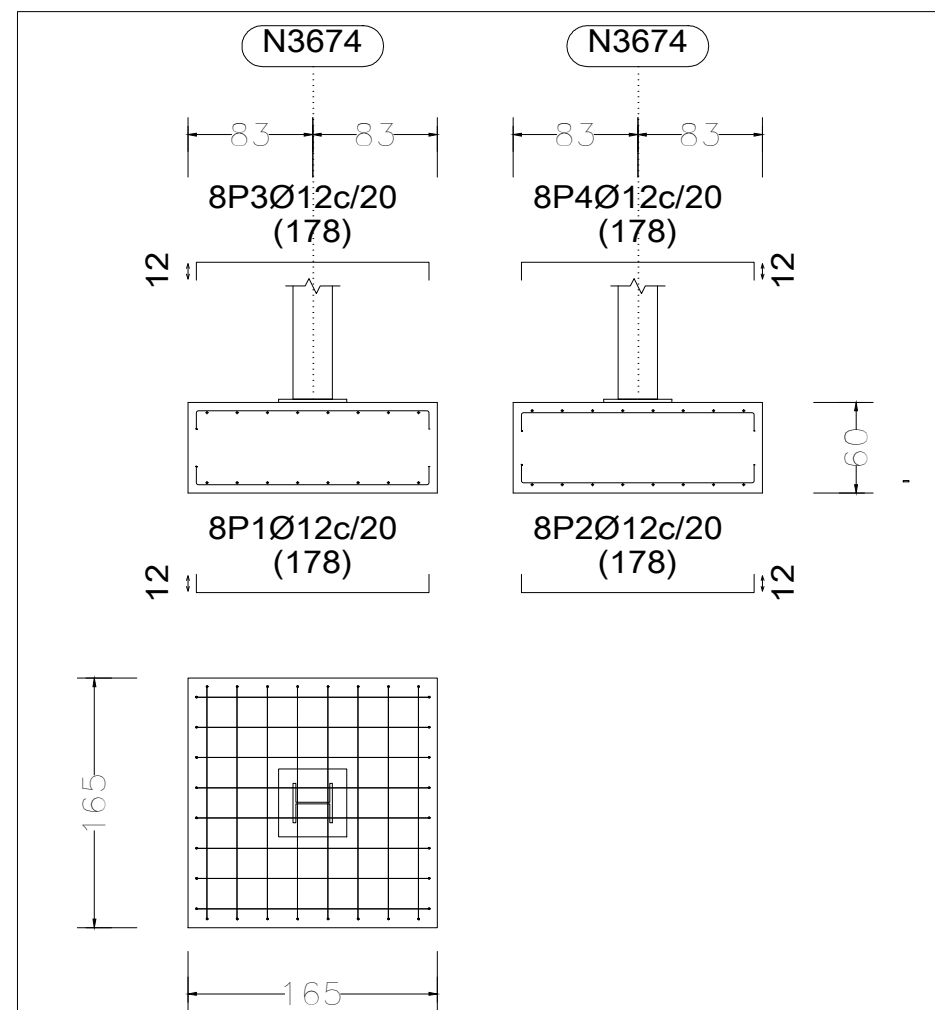
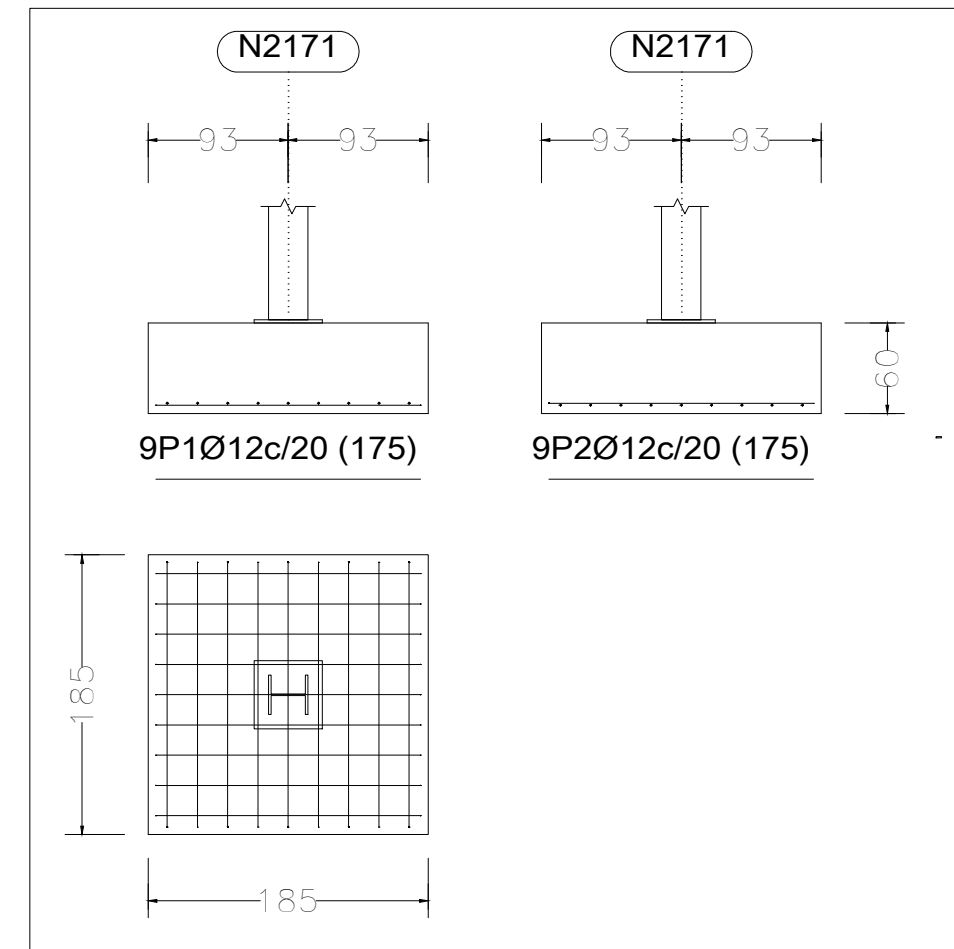
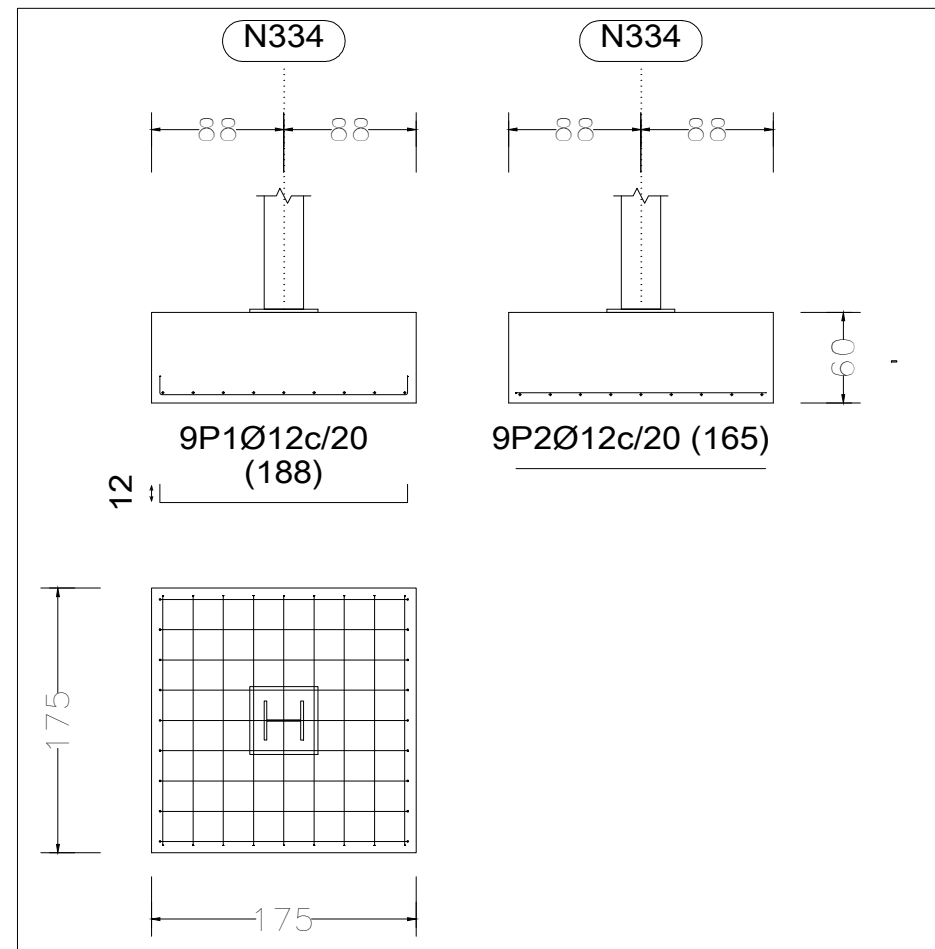
MATERIAL	S275		PROYECTO	Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	-				
NOMBRE		FECHA	FACHADA LATERAL CON PUENTE GRÚA		
ALUMNO	AAS	12/07/23			
ESCALA	1:500		I.C.A.I.		Nº DE PLANO: 3



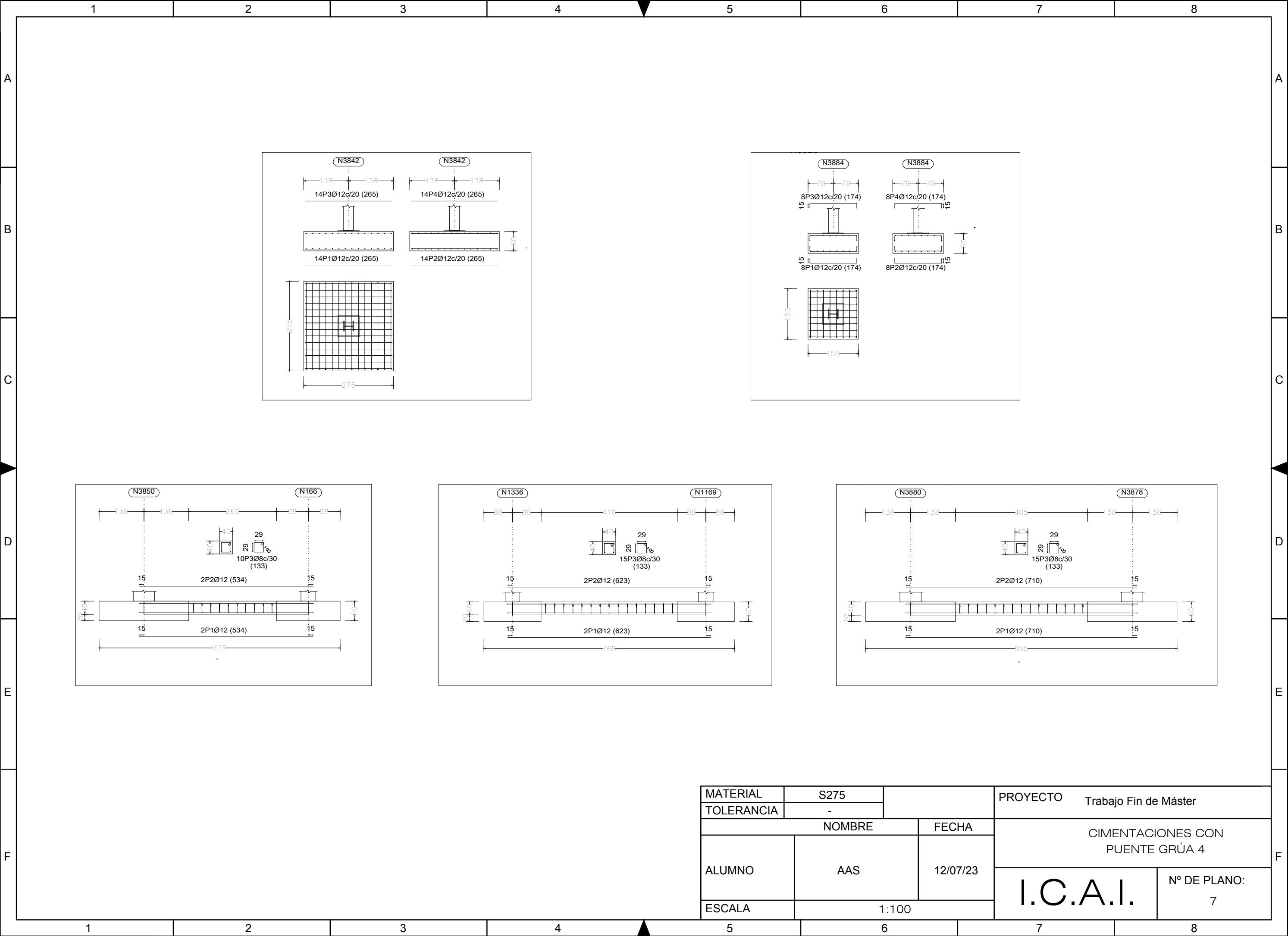
MATERIAL	S275		PROYECTO	Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	-				
NOMBRE		FECHA	CIMENTACIONES CON PUENTE GRÚA 1		
ALUMNO	AAS	12/07/23			
ESCALA	1:1000		I.C.A.I.		Nº DE PLANO: 4



MATERIAL	S275		PROYECTO Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	-			
NOMBRE		FECHA	CIMENTACIONES CON PUENTE GRÚA 2	
ALUMNO	AAS	12/07/23		
ESCALA	1:50	I.C.A.I.		Nº DE PLANO: 5



MATERIAL	S275		PROYECTO	Trabajo Fin de Máster
TOLERANCIA	-			
NOMBRE		FECHA	CIMENTACIONES CON PUENTE GRÚA 3	
ALUMNO	AAS	12/07/23		
ESCALA	1:50		I.C.A.I.	Nº DE PLANO: 6

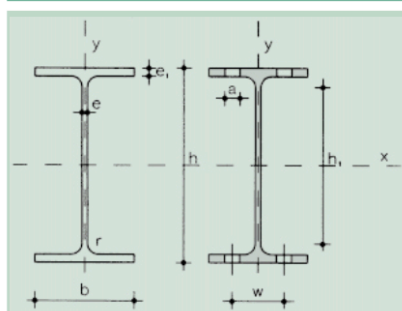


ANEXO III. PRONTUARIO

Dentro de este Anexo se encuentran los perfiles del prontuario utilizados para la realización de este proyecto.

I. PERFILES IPE

Tabla 2.A1.2. Perfiles IPE

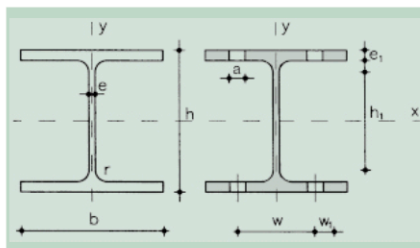


A = Área de la sección
 S_x = Momento estático de media sección, respecto a X
 I_x = Momento de inercia de la sección, respecto a X
 $W_x = 2I_x : h$: Módulo resistente de la sección, respecto a X
 $i_x = \sqrt{I_x : A}$: Radio de giro de la sección, respecto a X
 I_y = Momento de inercia de la sección,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

Perfil	Dimensiones							Términos de sección										Agujeros			Peso
	h mm	b mm	e mm	e ₁ mm	r ₁ mm	h ₁ mm	u mm	A cm ²	S_x cm ³	I_x cm ⁴	W_x cm ³	i_x cm	I_y cm ⁴	W_y cm ³	i_y cm	I_t cm ⁴	I_a cm ⁵	w mm	a mm	e ₂ mm	p kp/m
IPE 80	80	46	3,8	5,2	5	60	328	7,64	11,6	80,1	20,0	3,24	8,49	3,69	1,05	0,721	118	—	—	3,8	6,00 C
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7	75	400	10,30	19,7	171,0	34,2	4,07	15,90	5,79	1,24	1,140	351	—	—	4,1	8,10 C
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7	93	475	13,20	30,4	318,0	53,0	4,90	27,70	8,65	1,45	1,770	890	35	—	4,4	10,40 C
IPE 140	140	73	4,7	6,9	7	112	551	16,40	44,2	541,0	77,3	5,74	44,90	12,30	1,65	2,630	1.981	40	11	4,7	12,90 C
IPE 160	160	82	5,0	7,4	9	127	623	20,10	61,9	869,0	109,0	6,58	68,30	16,70	1,84	3,640	3.959	44	13	5,0	15,80 P
IPE 180	180	91	5,3	8,0	9	146	698	23,90	83,2	1.320,0	146,0	7,42	101,00	22,20	2,05	5,060	7.431	48	13	5,3	18,80 P
IPE 200	200	100	5,6	8,5	12	159	788	28,50	110,0	1.940,0	194,0	8,26	142,00	28,50	2,24	6,670	12.990	52	13	5,6	22,40 P
IPE 220	220	110	5,9	9,2	12	178	848	33,40	143	2.770	252	9,11	205	37,3	2,48	9,15	22.670	58	17	5,9	26,20 P
IPE 240	240	120	6,2	9,8	15	190	922	39,10	183	3.890	324	9,97	284	47,3	2,69	12,00	37.390	65	17	6,2	30,70 P
IPE 270	270	135	6,6	10,2	15	220	1.040	45,90	242	5.790	429	11,20	420	62,2	3,02	15,40	70.580	72	21	6,6	36,10 P
IPE 300	300	150	7,1	10,7	15	249	1.160	53,80	314	8.360	557	12,50	604	80,5	3,35	20,10	125.900	80	23	7,1	42,20 P
IPE 330	330	160	7,5	11,5	18	271	1.250	62,60	402	11.770	713	13,70	788	98,5	3,55	26,50	199.100	85	25	7,5	49,10 P
IPE 360	360	170	8,0	12,7	18	299	1.350	72,70	510	16.270	904	15,00	1.040	123,0	3,79	37,30	313.600	90	25	8,0	57,10 P
IPE 400	400	180	8,6	13,5	21	331	1.470	84,50	654	23.130	1.160	16,50	1.320	146,0	3,95	48,30	490.000	95	28	8,6	66,30 P
IPE 450	450	190	9,4	14,6	21	379	1.610	98,80	851	33.740	1.500	18,50	1.680	176,0	4,12	65,90	791.000	100	28	9,4	77,60 P
IPE 500	500	200	10,2	16,0	21	426	1.740	116,00	1.100	48.200	1.930	20,40	2.140	214,0	4,31	91,80	1.249.000	110	28	10,2	90,70 P
IPE 550	550	210	11,1	17,2	24	468	1.880	134,00	1.390	67.120	2.440	22,30	2.670	254,0	4,45	122,00	1.884.000	115	28	11,1	106,00 C
IPE 600	600	220	12,0	19,0	24	514	2.010	155,00	1.760	92.080	3.070	24,30	3.390	308,0	4,66	172,00	2.846.000	120	28	12,0	122,0 C

II. PERFILES HEB

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

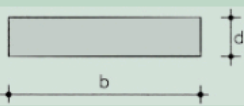


A = Área de la sección
 S_x = Momento estático de media sección, respecto a X
 I_x = Momento de inercia de la sección, respecto a X
 $W_x = 2I_x/h$: h. Módulo resistente de la sección, respecto a X
 $i_x = \sqrt{I_x/A}$: A. Radio de giro de la sección, respecto a X
 I_y = Momento de inercia de la sección,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

Perfil	Dimensiones							Términos de sección										Agujeros			Peso
	h	b	e	e ₁	r ₁	h ₁	u	A	S _x	I _x	W _x	i _x	I _y	W _y	i _y	I _t	I _a	w	w ₁	a	
HEB 100	100	100	6,0	10,0	12	56	567	26,0	52,1	450	90	4,16	167	33	2,53	9,34	3.375	55	—	13	20,4 P
HEB 120	120	120	6,5	11,0	12	74	686	34,0	82,6	864	144	5,04	318	53	3,06	14,90	9.410	65	—	17	26,7 P
HEB 140	140	140	7,0	12,0	12	92	805	43,0	123,0	1.509	216	5,93	550	79	3,58	22,50	22.480	75	—	21	33,7 P
HEB 160	160	160	8,0	13,0	15	104	918	54,3	177,0	2.492	311	6,78	889	111	4,05	33,20	47.940	85	—	23	42,6 P
HEB 180	180	180	8,5	14,0	15	122	1.040	65,3	241,0	3.831	426	7,66	1.363	151	4,57	46,50	93.750	100	—	25	51,2 P
HEB 200	200	200	9,0	15,0	18	134	1.150	78,1	321,0	5.696	570	8,54	2.003	200	5,07	63,40	171.100	110	—	25	61,3 P
HEB 220	220	220	9,5	16,0	18	152	1.270	91,0	414,0	8.091	736	9,43	2.843	258	5,59	84,40	295.400	120	—	25	71,5 P
HEB 240	240	240	10,0	17,0	21	164	1.380	106,0	527,0	11.259	938	10,30	3.923	327	6,08	110,00	486.900	90	35	25	83,2 P
HEB 260	260	260	10,0	17,5	24	177	1.500	118,4	641,0	14.919	1.150	11,20	5.135	395	6,58	130,00	753.700	100	40	25	93,0 P
HEB 280	280	280	10,5	18,0	24	196	1.620	131,4	767,0	19.270	1.380	12,10	6.595	471	7,09	153,00	1.130.000	110	45	25	103,0 P
HEB 300	300	300	11,0	19,0	27	208	1.730	149,1	934,0	25.166	1.680	13,00	8.563	571	7,58	192,00	1.688.000	120	50	25	117,0 P
HEB 320	320	300	11,5	20,5	27	225	1.770	161,3	1.070,0	30.823	1.930	13,80	9.239	616	7,57	241,00	2.069.000	120	50	25	127,0 P
HEB 340	340	300	12,0	21,5	27	243	1.810	170,9	1.200,0	36.656	2.160	14,60	9.690	646	7,53	278,00	2.454.000	120	50	25	134,0 P
HEB 360	300	300	12,5	22,5	27	261	1.850	180,6	1.340,0	43.193	2.400	15,50	10.140	676	7,49	320,00	2.883.000	120	50	25	142,0 P
HEB 400	400	300	13,5	24,0	27	298	1.930	197,8	1.620,0	57.680	2.880	17,10	10.819	721	7,40	394,00	3.817.000	120	50	25	155,0 P
HEB 450	450	300	14,0	26,0	27	344	2.030	218,0	1.990,0	79.887	3.550	19,10	11.721	781	7,33	500,00	5.258.000	120	50	25	171,0 P
HEB 500	500	300	14,5	28,0	27	390	2.120	238,6	2.410,0	107.176	4.290	21,20	12.624	842	7,27	625,00	7.018.000	120	45	28	187,0 C
HEB 550	550	300	15,0	29,0	27	438	2.220	254,1	2.800,0	136.691	4.970	23,20	13.077	872	7,17	701,00	8.856.000	120	45	28	199,0 C
HEB 600	600	300	15,5	30,0	27	486	2.320	270,0	3.210,0	171.041	5.700	25,20	13.530	902	7,08	783,00	10.965.000	120	45	28	212,0 C

III. PERFILES RECTANGULARES

Tabla 2.A1.10. Rectangulares



A = Área de la sección

p = Peso por m

b · d mm mm	A cm²	p kp/m		b · d mm mm	A cm²	p kp/m		b · d mm mm	A cm²	p kp/m		b · d mm mm	A cm²	p kp/m		b · d mm mm	A cm²	p kp/m	
20,4	0,80	0,628	C	45,12	5,40	4,24	C	70,20	14,00	11,00	P	100,30	30,00	23,60	C	160,25	40,0	31,4	C
20,5	1,00	0,785	C	45,15	6,75	5,30	C	70,25	17,50	13,70	P	100,35	35,00	27,50	C	160,30	48,0	37,7	C
20,6	1,20	0,942	C	45,20	9,00	7,07	C	70,30	21,00	16,50	C	100,40	40,00	31,40	C	160,35	56,0	44,0	C
20,8	1,60	1,260	C	45,25	11,20	8,83	C	70,35	24,50	19,20	C	110,4	4,40	3,45	C	160,40	64,0	50,2	C
20,10	2,00	1,570	C	45,30	13,50	10,60	C	70,40	28,00	22,00	C	110,5	5,50	4,32	C	180,8	14,4	11,3	C
20,12	2,40	1,880	C	45,35	15,80	12,40	C	75,4	3,00	2,36	C	110,6	6,80	5,18	C	180,10	18,0	14,1	C
20,15	3,00	2,360	C	45,40	18,00	14,10	C	75,5	3,75	2,94	C	110,8	8,80	6,91	C	180,12	21,6	17,0	C
25,4	1,00	0,785	C	50,4	2,00	1,57	P	75,6	4,50	3,53	C	110,10	11,00	8,64	C	180,15	27,0	21,2	C
25,5	1,25	0,981	C	50,5	2,50	1,96	P	75,8	6,00	4,71	C	110,12	13,20	10,40	C	180,20	36,0	28,3	C
25,6	1,50	1,180	C	50,6	3,00	2,36	P	75,10	7,50	5,89	C	110,15	16,50	13,00	C	180,25	45,0	35,3	C
25,8	2,00	1,570	C	50,8	4,00	3,14	P	75,12	9,00	7,07	C	110,20	22,00	17,30	C	180,30	54,0	42,4	C
25,10	2,50	1,960	C	50,10	5,00	3,93	P	75,15	11,20	8,83	C	110,25	27,50	21,60	C	180,35	63,0	49,5	C
25,12	3,00	2,360	C	50,12	6,00	4,71	C	75,20	15,00	11,80	C	110,30	33,00	25,90	C	180,40	72,0	56,5	C
25,15	3,75	2,940	C	50,15	7,50	5,89	C	75,25	18,80	14,70	C	110,35	38,50	30,20	C	200,8	16,0	12,6	C
25,20	5,00	3,930	C	50,20	10,00	7,85	C	75,30	22,50	17,70	C	110,40	44,00	34,50	C	200,10	20,0	15,7	C
30,4	1,20	0,942	P	50,25	12,50	9,81	C	75,35	26,20	20,60	C	120,4	4,80	3,77	C	200,12	24,0	18,8	C
30,5	1,50	1,180	P	50,30	15,00	11,80	C	75,40	30,00	23,60	C	120,5	6,00	4,71	C	200,15	30,0	23,6	C
30,6	1,80	1,410	P	50,35	17,50	13,70	C	80,4	3,20	2,51	C	120,6	7,20	5,65	C	200,20	40,0	31,4	C
30,8	2,40	1,880	C	50,40	20,00	15,70	C	80,5	4,00	3,14	C	120,8	9,60	7,54	C	200,25	50,0	39,2	C
30,10	3,00	2,360	C	55,4	2,20	1,73	C	80,6	4,80	3,77	P	120,10	12,00	9,42	P	200,30	60,0	47,1	C
30,12	3,60	2,830	C	55,5	2,75	2,16	C	80,8	6,40	5,02	P	120,12	14,40	11,30	P	200,35	70,0	55,0	C
30,15	4,50	3,530	C	55,6	3,30	2,59	C	80,10	8,00	6,28	P	120,15	18,80	14,10	P	200,40	80,0	62,8	C
30,20	6,00	4,710	C	55,8	4,40	3,45	C	80,12	9,60	7,54	P	120,20	24,00	18,80	P	250,8	20,0	15,7	C
30,25	7,50	5,890	C	55,10	5,50	4,32	C	80,15	12,00	9,42	P	120,25	30,00	23,60	P	250,10	25,0	19,6	C
35,4	1,40	1,100	C	55,12	6,60	5,18	C	80,20	16,00	12,60	P	120,30	36,00	28,50	C	250,12	30,0	23,6	C
35,5	1,75	1,370	C	55,15	8,25	6,48	C	80,25	20,00	15,70	P	120,35	42,00	33,00	C	250,15	37,5	29,4	C
35,6	2,10	1,650	C	55,20	11,00	8,64	C	80,30	24,00	18,80	C	120,40	48,00	37,70	C	250,20	50,0	39,2	C
35,8	2,80	2,200	C	55,25	13,80	10,80	C	80,35	28,00	22,00	C	140,8	11,2	8,79	C	250,25	62,5	49,1	C
35,10	3,50	2,750	C	55,30	16,50	13,00	C	80,40	32,00	25,10	C	140,10	14,0	11,00	C	250,30	75,0	58,9	C
35,12	4,20	3,300	C	55,35	19,30	15,10	C	90,4	3,60	2,85	C	140,12	16,8	13,20	P	250,35	87,5	68,7	C
35,15	5,25	4,120	C	55,40	22,00	17,30	C	90,5	4,50	3,53	C	140,15	21,0	16,50	P	250,40	100,0	78,5	C
35,20	7,00	5,500	C	60,4	2,40	1,88	C	90,6	5,40	4,24	C	140,20	28,0	22,00	P	300,8	24,0	18,8	C
35,25	8,75	6,870	C	60,5	3,00	2,36	P	90,8	7,20	5,85	C	140,25	35,0	27,50	P	300,10	30,0	23,6	C
35,30	10,50	8,240	C	60,6	3,60	2,83	P	90,10	9,00	7,07	C	140,30	42,0	33,00	C	300,12	36,0	28,3	C
40,4	1,60	1,26	P	60,8	4,80	3,77	P	90,12	10,80	8,48	C	140,35	49,0	38,50	C	300,15	45,0	35,3	C
40,5	2,00	1,57	P	60,10	6,00	4,71	P	90,15	13,50	10,60	C	140,40	56,0	44,00	C	300,20	60,0	47,1	C
40,6	2,40	1,88	P	60,12	7,20	5,65	P	90,20	18,00	12,10	C	150,8	12,0	9,42	C	300,25	75,0	58,9	C
40,8	3,20	2,51	P	60,15	9,00	7,07	P	90,25	22,50	17,70	C	150,10	15,0	11,80	C	300,30	90,0	70,6	C
40,10	4,00	3,14	C	60,20	12,00	9,42	P	90,30	27,00	21,20	C	150,12	18,0	14,10	C	300,35	105,0	82,4	C
40,12	4,80	3,77	C	60,25	15,00	11,80	P	90,35	31,50	24,70	C	150,15	22,5	17,70	C	300,40	120,0	94,2	C
40,15	6,00	4,71	C	60,30	18,00	14,10	C	90,40	36,00	28,30	C	150,20	30,0	23,60	C	400,8	32,0	25,1	C
40,20	8,00	6,28	C	60,35	21,00	16,50	C	100,4	4,00	3,14	C	150,25	37,5	29,40	C	400,10	40,0	31,4	C
40,25	10,00	7,85	C	60,40	24,00	18,80	C	100,5	5,00	3,93	C	150,30	45,0	35,30	C	400,12	48,0	37,7	C
40,30	12,00	9,42	C	70,4	2,80	2,20	C	100,6	6,00	4,71	C	150,35	52,5	41,20	C	400,15	60,0	47,1	C
40,35	14,00	11,00	C	70,5	3,50	2,75	P	100,8	8,00	6,23	P	150,40	60,0	47,10	C	400,20	80,0	62,8	C
45,4	1,80	1,41	C	70,6	4,20	3,30	P	100,10	10,00	7,85	P	160,8	12,8	10,0	C	400,25	100,0	78,5	C
45,5	2,25	1,77	C	70,8	5,60	4,40	P	100,12	12,00	9,42	P	160,10	16,0	12,6	C	400,30	120,0	94,2	C
45,6	2,70	2,12	C	70,10	7,00	5,50	P	100,15	15,00	11,80	P	160,12	19,2	15,1	C	400,35	140,0	110,0	C
45,8	3,60	2,83	C	70,12	8,40	6,59	P	100,20	20,00	15,70	P	160,15	24,0	18,8	C	400,40	160,0	126,0	C
45,10	4,50	3,53	C	70,15	10,50	8,24	P	100,25	25,00	19,60	P	160,20	32,0	25,1	C				

IV. PERFILES HUECOS CUADRADOS

Tabla 2.A2.2. Perfiles huecos cuadrados

Perfil	Dimensiones				Términos de sección						Peso	
	a mm	e mm	r mm	u mm	A cm ²	S cm ³	I cm ⁴	W cm ³	i cm	I _x cm ⁴	p kp/m	
# 40.2	40	2	5	151	2,90	2,04	6,60	3,40	1,53	11,3	2,28	P
# 40.3	40	3	8	147	4,13	2,80	9,01	4,51	1,48	15,6	3,24	P
# 40.4	40	4	10	143	5,21	3,40	10,50	5,26	1,42	18,9	4,09	P
# 45.2	45	2	5	171	3,30	2,63	9,94	4,42	1,74	16,3	2,59	C
# 45.3	45	3	8	167	4,73	3,65	13,40	5,95	1,68	22,9	3,71	C
# 45.4	45	4	10	163	6,01	4,49	15,90	7,07	1,63	28,2	4,72	C
# 50.2	50	2	5	191	3,70	3,30	13,90	5,57	1,94	22,7	2,91	P
# 50.3	50	3	8	187	5,33	4,62	19,00	7,59	1,89	32,0	4,18	P
# 50.4	50	4	10	183	5,81	5,73	22,90	9,15	1,83	39,9	5,35	P
# 55.2	55	2	5	211	4,10	4,04	18,90	6,86	2,14	30,5	3,22	C
# 55.3	55	3	8	207	5,93	5,70	25,90	9,43	2,09	43,4	4,66	C
# 55.4	55	4	10	203	7,61	7,12	31,60	11,50	2,04	54,5	5,97	C
# 60.2	60	2	5	231	4,50	4,86	24,80	8,28	2,35	39,9	3,53	P
# 60.3	60	3	8	227	6,53	6,89	34,40	11,50	2,30	57,1	5,13	P
# 60.4	60	4	10	223	8,41	8,66	42,30	14,10	2,24	72,2	6,60	P
# 60.5	60	5	13	219	10,10	10,20	48,50	16,20	2,19	85,2	7,96	C
# 70.2	70	2	5	271	5,30	6,71	40,30	11,50	2,76	64,1	4,16	P
# 70.3	70	3	8	267	7,73	9,60	56,60	16,20	2,71	92,6	6,07	P
# 70.4	70	4	10	263	10,00	12,20	70,40	20,10	2,65	118,0	7,86	P
# 70.5	70	5	13	259	12,10	14,50	82,00	23,40	2,60	141,0	9,53	P
# 80.3	80	3	8	307	8,93	12,80	86,60	21,70	3,11	140,0	7,01	P
# 80.4	80	4	10	303	11,60	16,30	108,80	27,20	3,06	180,0	9,11	P
# 80.5	80	5	13	299	14,10	19,50	128,00	32,00	3,01	217,0	11,10	P
# 80.6	80	6	15	294	16,50	22,40	144,00	36,00	2,95	250,0	13,00	C
# 90.3	90	3	8	347	10,10	16,40	126,00	37,90	3,52	202,0	7,95	P
# 90.4	90	4	10	343	13,20	21,10	159,00	35,40	3,47	281,0	10,40	P
# 90.5	90	5	13	339	16,10	25,30	189,00	41,90	3,42	316,0	12,70	P
# 90.6	90	6	15	334	18,90	29,20	214,00	47,60	3,36	366,0	14,90	P
# 100.3	100	3	8	387	11,30	20,10	175,00	35,00	3,93	279,0	8,89	P
# 100.4	100	4	10	383	14,80	26,40	223,00	44,60	3,88	363,0	11,60	P
# 100.5	100	5	13	379	18,10	31,90	266,00	53,10	3,83	440,0	14,20	P
# 100.6	100	6	15	374	21,30	37,00	304,00	60,70	3,77	513,0	16,70	P
# 120.4	120	4	10	463	18,00	38,90	397,00	66,20	4,70	638,0	14,10	P
# 120.5	120	5	13	459	22,10	47,20	478,00	79,60	4,64	780,0	17,40	P
# 120.6	120	6	15	454	26,10	55,10	551,00	91,80	4,59	913,0	20,50	C
# 140.5	140	5	13	539	26,10	65,60	780,00	111,00	5,46	260,0	20,50	P
# 140.6	140	6	15	534	30,90	76,80	905,00	129,00	5,41	480,0	24,30	P
# 140.8	140	8	20	526	40,00	97,50	1.130,00	161,00	5,30	890,0	31,40	P
# 160.5	160	5	13	619	30,10	86,90	1.190,00	149,00	6,28	1.901,0	23,70	P
# 160.6	160	6	15	614	35,70	102,00	1.390,00	173,00	6,23	2.240,0	28,00	P
# 160.8	160	8	20	609	46,40	131,00	1.740,00	218,00	6,12	2.890,0	36,50	P
# 170.5	170	5	13	659	32,10	98,70	1.440,00	169,00	6,69	2.290,0	25,20	C
# 170.6	170	6	15	654	38,10	116,00	1.680,00	198,00	6,64	2.710,0	29,90	C
# 170.8	170	8	20	646	49,60	149,00	2.120,00	249,00	6,53	3.410,0	39,00	P