

# TRABAJO FINAL DE GRADO

INFLUENCIA DE LA LUZ Y DISTANCIA ENTRE PÓRTICOS DE ACERO EN  
LA HUELLA DE CO<sub>2</sub> DE LA ESTRUCTURA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

Curso 2016/2017

Alumna: Rueda Romero, Victoria

Tutora: Guardiola Villora, Arianna Paola



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### Resumen - Resum - Abstract

### Palabras claves - Paraules clau- key words

## 1. Introducción.....8

## 2. Definición de la estructura

2.1. Antecedentes.....11

2.2. Modelos estructurales.....13

2.3. Vínculos.....14

## 3. Acciones en la edificación (DB-SE-AE)

3.1. Acciones permanentes.....17

3.1.1. Peso propio.....17

3.2. Acciones variables.....17

3.2.1. Sobrecarga de uso.....17

3.2.2. Sobrecarga de nieve.....18

3.2.3. Sobrecarga de viento.....19

3.3. Cuadro resumen de hipótesis.....22

## 4. Combinaciones de carga (DB-SE)

4.1. Combinaciones de Estados límite último.....24

4.2. Combinaciones de Estados límite de servicio.....25

## 5. Predimensionado de la estructura

5.1. Predimensionado de pórticos.....28

5.1.1. Resistencia de la sección.....28

5.1.1.1. Resistencia a flexocompresión.....28

5.1.1.2. Interacción momento flector - esfuerzo cortante.....28

5.1.2. Comprobación de pandeo.....28

5.1.2.1. Determinación coeficientes  $\chi$ .....28

5.1.2.2. Determinación coeficiente  $\chi_{LT}$ .....29

5.1.2.3. Determinación coeficientes

de momento equivalente  $C_m$ .....30

5.1.2.4. Coeficientes  $k_y$ .....30

5.1.3. Predimensionado de soporte más desfavorable CASO 1.....31

5.1.4. Predimensionado de soporte más desfavorable CASO 2.....32

5.2. Predimensionado de vigas.....33

5.2.1. Resistencia de la sección.....33

5.2.1.1. Momento flector.....33

5.2.1.2. Esfuerzo cortante.....33

5.2.1.3. Interacción momento flector-esfuerzo cortante.....33

5.2.1.4. Resistencia frente a axil.....33

5.2.2. Pandeo lateral.....33

5.2.2.1. Obtención coeficiente  $\chi_{LT}$ .....33

5.2.3. Abolladura.....34

5.2.4. Efectos locales: cargas concentradas.....34

5.2.4.1. Obtención coeficiente  $\chi_{min}$ .....35

5.2.5. Comprobación de flecha.....35

5.2.6. Predimensionado de viga más desfavorable CASO 1.....36

5.2.7. Predimensionado de viga más desfavorable CASO 2.....37

5.3. Predimensionado de correas.....38

5.3.1. Resistencia de la sección.....38

5.3.1.1. Momento flector.....38

5.3.1.2. Esfuerzo cortante.....38

5.3.1.3. Interacción momento flector-esfuerzo cortante.....38

5.3.1.4. Resistencia frente a axil.....38

5.3.2. Pandeo lateral.....38

5.3.2.1. Obtención coeficiente  $\chi_{LT}$ .....38

5.3.3. Abolladura.....39

5.3.4. Efectos locales: cargas concentradas.....39

5.3.4.1. Obtención coeficiente  $\chi_{min}$ .....40

5.3.5. Comprobación de flecha.....40

5.3.6. Correa de luz 4m.....41

5.3.7. Correa de luz 5m.....42

5.3.8. Correa de luz 6m.....43

## 6. Dimensionado de la estructura (Con Architrave)

6.1. Modelización de la estructura.....45

6.2. Proceso de dimensionado de elementos estructurales.....46

6.2.1. Dimensionado de soportes.....46

6.2.2. Dimensionado de vigas.....	47
6.2.3. Dimensionado de correas.....	47
6.2.4. Dimensionado de cruces de San Andrés.....	47
6.3. Dimensionados.....	48
6.3.1. Nave 12,5x4.....	48
6.3.2. Nave 12,5x5.....	49
6.3.3. Nave 12,5x6.....	50
6.3.4. Nave 15x4.....	51
6.3.5. Nave 15x5.....	52
6.3.6. Nave 15x6.....	53
6.3.7. Nave 17,5x4.....	54
6.3.8. Nave 17,5x5.....	55
6.3.9. Nave 17,5x6.....	56
6.3.10. Nave 20x4.....	57
6.3.11. Nave 20x5.....	58
6.3.12. Nave 20x6.....	59
6.4. Tabla resumen de dimensionados.....	60

## 7. Análisis de resultados

7.1. Mediciones de CO <sub>2</sub> .....	64
7.2. Casos de estudio.....	65
7.2.1. Longitud de correas de 4m.....	65
7.2.2. Longitud de correas de 5m.....	67
7.2.3. Longitud de correas de 6m.....	69
7.3. Gráficas de influencia de la luz entre pórticos.....	71
7.3.1. Longitud de correas de 4m.....	71
7.3.2. Longitud de correas de 5m.....	73
7.3.4. Longitud de correas de 6m.....	75
7.4. Gráficas de influencia de la distancia entre pórticos.....	77
7.4.1. Pórticos de luz de 12.5 metros.....	77
7.4.2. Pórticos de luz de 15 metros.....	79
7.4.3. Pórticos de luz de 17.5 metros.....	81
7.4.4. Pórticos de luz de 20 metros.....	83
7.5. Gráficas resumen de todas las naves objeto de estudio.....	85
7.6. Gráficas resumen de todas las naves objeto de estudio, sin tener en cuenta el peso del arriostramiento.....	87

8. Conclusión.....	89
9. Bibliografía.....	91
10. Índice de imágenes.....	93
11. Índice de tablas.....	96
ANEXO.....	98

## RESUMEN

Tras décadas de proceder sin las necesarias preocupaciones en nuestro modo de construir, se hace imprescindible una nueva conciencia. Surge la necesidad de cuantificar de alguna forma cómo de contaminantes y negativas son nuestras acciones. Es entonces cuando se empiezan a escuchar conceptos como sostenibilidad y eficiencia en nuestro día a día. Se buscan soluciones que nos ofrezcan una huella humana menos invasiva sobre el medioambiente. Para ello se propone este trabajo, en el que se realiza un estudio comparativo sobre la influencia de la geometría de las estructuras de acero en la huella de carbono.

Para ello, se elige una estructura de tipo industrial, de pórticos acartelados y correas apoyadas sobre los pórticos. Se analizan distintos modelos, con luces y separaciones entre pórticos diferentes. Se determina un sector industrial tipo, y se delimita el estudio a naves industriales comprendidas entre 500 m<sup>2</sup> y 1000 m<sup>2</sup> de superficie, considerando la mayor representatividad posible del mercado actual.

Finalmente, tras el dimensionado de los módulos estructurales, se procede a la obtención del peso total y las emisiones de CO<sub>2</sub> en toneladas de cada una de las naves industriales objeto de estudio, con el objetivo de especificar que tipo de luces y separaciones entre pórticos presentan soluciones óptimas para cada situación respecto al medioambiente.

**PALABRAS CLAVE:** Nave industrial; pórticos acartelados; peso de acero, eficiencia estructural; huella de carbono

## RESUM

Després de dècades de procedir sense les necessàries preocupacions en la nostra manera de construir, es fa imprescindible una nova consciència. Sorgeix la necessitat de quantificar d'alguna forma com de contaminants i negatives són les nostres accions. És llavors, quan es comencen a escoltar conceptes com sostenibilitat i eficiència en el nostre dia a dia. Es busquen solucions que ens ofereixin una empremta humana menys invasiva sobre el medi ambient. Per a això, es proposa aquest treball, en el qual es realitza un estudi comparatiu sobre la influència de la geometria de les estructures d'acer en la petjada de carboni.

Per a això, es tria una estructura de tipus industrial, de pòrtics acartellats i corretges recolzades sobre els pòrtics. S'analitzen diferents models, amb llums i separacions entre pòrtics diferents. Es determina un sector industrial tipus, i es delimita l'estudi a naves industrials compreses entre 500 m<sup>2</sup> i 1000 m<sup>2</sup> de superfície. Considerant la major representativitat possible del mercat actual.

Finalment, després del dimensionat dels mòduls estructurals, es procedeix a l'obtenció del pes total i a les emissions de CO<sub>2</sub> en tones de cadascuna de les naves industrials objecte d'estudi. Amb l'objectiu d'especificar quin tipus de llums i separacions entre pòrtics presenten solucions òptimes per a cada situació respecte al medi ambient.

**PARAULES CLAU:** Nau industrial; pòrtics acartellats; pes de l'acer; eficiència estructural; empremta de carboni

## ABSTRACT

After decades of proceeding without the necessary concerns in our way of building, a new conscience becomes imperative. The need to somehow quantify how pollutants and negatives are our actions. That is when we begin to hear concepts such as sustainability and efficiency in our day to day. Solutions are sought that offer us a less invasive human footprint on the environment. For that, this work is proposed, in which a comparative study is carried out on the influence of the geometry of steel structures on the carbon footprint.

For this, an industrial type structure is chosen, with haunched frames and belts supported on the frames. Different models are analyzed, with lights and separations between different frames. A typical industrial sector is determined, and the study is delimited to industrial buildings with areas between 500 m<sup>2</sup> and 1000 m<sup>2</sup>. Considering the greater representativeness of the current market.

Finally, after the calculation of the structural modules, the total weight and the CO<sub>2</sub> emissions in tons of each of the industrial buildings studied. With the aim of specifying which type of lights and separations between frames present optimum solutions for each situation with respect to the environment.

**KEY WORDS:** Industrial structure building; haunched frames; steel weight; structural efficiency; carbon footprint

# 1. INTRODUCCIÓN

Durante años, la preocupación por el medioambiente del sector de la construcción ha sido mínima. Se ha construido sin las precauciones necesarias, sin pensar en las consecuencias que provocan nuestros actos. Por ello, se hace imprescindible una nueva conciencia sobre nuestras acciones, una búsqueda de nuevos sistemas, materiales y estructuras que permitan realizar edificios con un menor impacto ambiental. Un claro ejemplo de esta nueva forma de proceder es el proyecto Europa 2020 (Unión Europea, 2010), *Una estrategia para el crecimiento inteligente que pretende que Europa salga fortalecida de la crisis y convierta a la Unión Europea en una economía inteligente, sostenible e integradora, que disfrute de altos niveles de empleo, de productividad y de cohesión social. [...] Los objetivos son representativos de las tres prioridades de crecimiento, [...] La Comisión propone entonces siete iniciativas emblemáticas que se materializan tanto en la UE como en los Estados miembros en relación a los siguientes ámbitos: Innovación, Educación, Sociedad digital, Clima, Energía y movilidad, Competitividad, Empleo y cualificaciones y Lucha contra la pobreza.* (www.mecd.gob.es).

Es a partir de entonces, cuando surge la necesidad de cuantificar de alguna forma cuan dañinas resultan nuestras acciones para la naturaleza. En esta materia es importante destacar la huella de carbono, el indicador más conocido y más empleado por empresas y consumidores, que *mide el potencial de calentamiento global de una organización, proyecto, producto o evento.* (Agrelo, 2016). Es decir, cuantifica las toneladas de CO<sub>2</sub> que son emitidas por un producto durante su ciclo de vida completo o durante una etapa determinada. Los distintos alcances para el cálculo de la huella de carbono son:

- Ciclo de vida completo, también conocido como *de la cuna a la tumba*, se tienen en cuenta las emisiones producidas en todos los procesos que tienen lugar, desde la extracción de la materia prima hasta la finalización de su vida útil (demolición o reciclaje).
- *De la cuna a la puerta*, se tiene en cuenta desde su extracción hasta la obtención del producto, dejando fuera la etapa de consumo y gestión final.
- *De puerta a puerta*, hace referencia a las emisiones del producto únicamente durante su elaboración, sin tener en cuenta qué ocurre previa ni posteriormente.

Es importante no sólo especificar en qué momento se calcula la huella de carbono, sino también cómo se obtiene. Cabe destacar que cuando se habla de huella de carbono se refiere a carbono equivalente. Para ello, es necesario conocer qué tipos de emisiones

concretas son las que se consideran para la huella de carbono. Estas emisiones son las que se conocen como gases de efecto invernadero o GEI, y que se recogen en el *Protocolo de Kyoto* (entrada en vigor el 16 de febrero de 2005) son los siguientes: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarburo (HFCs), perfluorocarburo (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Por tanto, la huella de carbono se calcula como el producto de las toneladas de cada tipo de gas por un coeficiente que pondera su posible implicación en el calentamiento global, conocido como *global warming potential* o *GWP* (*Carbon footprint guide*, 2012).

Summary of GHGs, their chemical abbreviations and GWPs

GHG common name	GHG abbreviation	Global Warming Potential (GWP)
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	1
Methane	CH <sub>4</sub>	21 - 23
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	298 - 310
Hydrofluorocarbons	HFC	650 - 14 800
Perfluorocarbons	PFC	6 500 - 23 000
Sulphur hexafluoride	SF <sub>6</sub>	22 800 - 23 900

Imagen 1.1. Tabla de GEI y sus coeficientes de ponderación. Fuente: *Carbon footprinting guide*

Actualmente, en el campo de la arquitectura no es de obligatorio cumplimiento el considerar los daños causados al medioambiente, pero el mismo interés que ha crecido en otros campos, comienza a manifestarse en éste también. En un futuro próximo, con la introducción de la norma EAE (Ministerio de Fomento, 2010) la evaluación de la huella de carbono forme parte de toda estructura. De hecho, el anexo 11 (Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad), se centra en la evaluación de dicho índice para estructuras de acero.

A partir de este interés en cuestiones medioambientales, han surgido conceptos como sostenibilidad o eficiencia. Aunque habitualmente, cuando se habla de arquitectura eficiente, desde el punto de vista energético, se hace referencia a la cantidad de energía que se necesita emplear para su acondicionamiento (calentarlo, iluminarlo, ventilarlo, etc.). Este estudio se centra en un concepto previo, conocido como *energía embebida* (De Isla et al. 2014), que consiste en la energía necesaria para construir un edificio, es decir, la

energía necesaria para la extracción y fabricación del material añadida a la de ejecución del edificio. Para ser más estrictos, además de la construcción debería de considerarse también el uso y la demolición o reciclaje del material.

Así pues, de la búsqueda de nuevos métodos y materiales de construcción, surge el interés de este estudio, el cual tiene como objetivo analizar la influencia que tiene en las estructuras de acero su geometría. Concretamente, la luz y distancia entre pórticos de acero, buscando siempre la solución más óptima, intentando conseguir una eficiencia estructural. Dicho de otro modo, ajustando al máximo su dimensionado para conseguir el menor peso posible y por tanto, una menor repercusión en el medioambiente. Para ello, se llevará a cabo la evaluación de la huella de carbono, a partir del peso de los elementos estructurales, y con la ayuda del Banco de datos BEDEC, (ITeC, [www.itec.es](http://www.itec.es)) el cual dispone de datos medioambientales para el cálculo de dicho valor.

Es importante destacar que para el presente trabajo se considera únicamente la estructura de acero, sin tener en cuenta la repercusión de las zapatas de cimentación, es decir sin tener en cuenta el hormigón. Esto nos permite realizar un cálculo de la huella de CO<sub>2</sub> de forma lineal.

De los numerosos beneficios ambientales que presenta el acero, asociados a su potencial de reciclaje, nace el interés de realizar este estudio con una estructura de acero. El porcentaje de material reciclado en la producción de acero depende de cada proceso de producción. *Sin embargo, no es tan sólo como material que el acero participa en los objetivos de la construcción sustentable, ya que las estructuras metálicas tienen características naturales que también contribuyen a esos mismos objetivos. La construcción sustentable procura minimizar el consumo de recursos naturales y maximizar su reutilización, emplear recursos renovables y reciclables, proteger el ambiente natural, crear un ambiente saludable y no tóxico y entregar un ambiente construido de óptima calidad.* (Gervásio, 2009).

***Cuantificar sus fuentes de emisiones de GEI le ayudará a entender qué impacto tiene su organización en el cambio climático (Carbon footprinting guide)***

## **2. DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA**

Para abordar el estudio se requiere de un modelo versátil, que permita variaciones en su estructura, una estructura modulada que permita adaptarse a diferentes dimensiones, para poder ser lo más representativo posible del mercado actual.

### 2.1. Antecedentes

Se parte de la tesis doctoral *Banco de pruebas de programas de cálculo de estructuras de edificación disponibles en el mercado español* (Cabrera, 2016). Donde se realiza un estudio exhaustivo sobre tipologías estructurales y arquitectónicas, así como también parámetros urbanísticos, de uso frecuente en el territorio nacional.

En primer lugar, se debe especificar la tipología estructural que se pretende usar para el estudio. Dado que se busca una estructura versátil que permita adaptarse a distintas situaciones, se opta por una estructura porticada de acero, de una sola planta y grandes luces.

Una vez se tiene la tipología estructural elegida, se escoge el sector más adecuado para el estudio, buscando siempre la mayor representatividad de la realidad. Este es de tipo industrial, pues es donde se observa un mayor número de edificios con dicha estructura. Es complicado estandarizar el suelo industrial, pues depende de la normativa urbanística de cada lugar. Sin embargo, el sector tipo más frecuente es el detallado por la siguiente tabla, incluida en la tesis del profesor Cabrera.

PARCELA	Parcela mínima	500m <sup>2</sup>
	Frente mínimo de parcela	12,5m
	Círculo mínimo inscribible	12,5m
POSICIÓN DE LA EDIFICACIÓN	Distancia linde frontal	5m
	Distancia a otros lindes	0m
	Separación entre edificaciones dentro de la misma parcela	3/2 de la altura del más alto
INTENSIDAD	Coefficiente de edificabilidad	1,27m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> s
	Ocupación máxima	75%
VOLUMEN Y FORMA	Número máximo de plantas	2
	Altura reguladora	12m
	Semisótanos	NO
	Sótanos	SÍ

Tabla 2.1. Parámetros urbanísticos de un sector industrial tipo. (Cabrera, 2016). Elaboración propia

Como se especifica en la tabla, la parcela mínima de este tipo de sector es de 500m<sup>2</sup>, esta dimensión es el valor mínimo que se adopta para el presente estudio, siendo el máximo valor de parcela a adoptar de 1000m<sup>2</sup>.

En la siguiente fotografía se presenta un polígono industrial tipo, perteneciente al municipio de Alboraya, en el cual se observan muchas construcciones similares a las del presente trabajo.



Imagen 2.1. Polígono industrial del municipio de Alboraya. Fuente: Google maps.

A continuación se procede a la definición del modelo estructural. Ya se ha comentado que se trata de una nave industrial de estructura metálica, porticada y de una sola planta. Con estas características, destacan dos casos frecuentes (Monfort, 2006):

- Nave industrial con pórticos adintelados, los cuales presentan una clara diferenciación formal entre el soporte y el dintel. El soporte suele ser un perfil comercial o pieza compuesta, mientras que el dintel consiste en una viga en celosía a dos aguas o con cordones paralelo. Se puede observar en la imagen 2.2.
- Nave de pórticos acartelados o de alma llena, suelen estar formados por perfiles comerciales tanto en soporte como en dintel, además, para reforzar las zonas de momentos máximos se coloca una cartela de refuerzo, tal como se representa en la imagen 2.3.

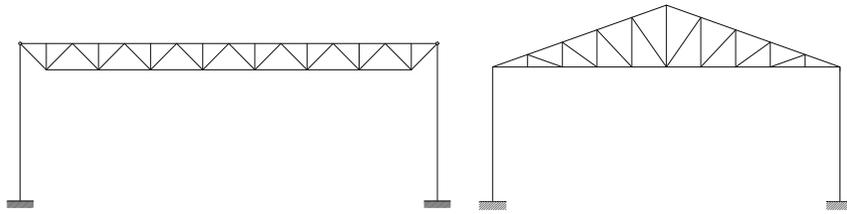


Imagen 2.2. Pórticos adintelados. Elaboración propia.

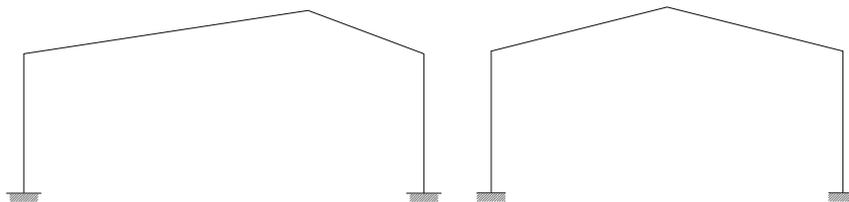


Imagen 2.3. Pórticos acartelados. Elaboración propia.

Entre las dos opciones, se opta por una estructura de pórticos acartelados, muy común en naves industriales. *Estructura principal formada por pórticos a dos aguas de perfiles de acero laminado sin acartelar, y estructura secundaria formada por viguetas de acero laminado apoyadas sobre los pórticos.* (Monfort, 1995). Como ejemplo, se presentan las siguientes imágenes:

Imagen 2.4. Estructura metálica de pórticos acartelados. Fuente: [www.hierroslanave5.es](http://www.hierroslanave5.es)Imagen 2.5. Estructura metálica de pórticos acartelados. Fuente: [www.gpstecnicasmetalicas.com](http://www.gpstecnicasmetalicas.com)

Para una óptima resolución de este estudio, se debe de realizar la comparación de diversos modelos del mismo tipo estructural, de forma que permita adaptarse al mayor número de casos posibles. Para ello, se consideran los parámetros característicos más frecuentes en el mercado de este tipo de estructura establecidos en el artículo *Optimización geométrica de los pórticos a dos aguas con nudos acartelados* (Monfort y Gil, 1988) y que son: luces de 12'5, 15, 17'5 y 20 metros, de altura de soportes 5 metros e inclinación de la cumbrera de 14'04°.

## 2.2. Modelos estructurales

Teniendo en cuenta las consideraciones del epígrafe anterior, los modelos objeto de análisis y dimensionamiento son:

- Luces: 12,5m, 15m, 17,5m y 20m
- Separación entre pórticos: 4m, 5m y 6m
- Altura de cumbrera:

	4m	5m	6m
12,5m	6,56	6,56	6,56
15m	6,87	6,87	6,87
17,5m	7,18	7,18	7,18
20m	7,49	7,49	7,49

Tabla 2.2. Altura de cumbrera de cada modelo. Elaboración propia

- Inclinación de vigas:  $\text{tg } \beta = 1/4 = 14'04^\circ$
- Altura de soportes: 5m
- Distancia entre correas: 1,25 en proyección horizontal

La separación entre correas se decide con la ayuda del catálogo del panel sándwich HUT que se dispone en cubierta. Además, para que la separación sea constante en todos los módulos se busca un número múltiplo de 2,5 (diferencia entre cada luz de pórtico). Por ello, se decide el valor de 1,25, ya que queda del lado de la seguridad.

Carga (kg/m <sup>2</sup> )	Luz (m)
150	2
106	2,5
70	3
50	3,5

Tabla 2.3. Características mecánicas del catálogo de panel HUT, Aceralia. Elaboración propia

Respecto a la longitud de las naves, ésta será proporcional a las separaciones entre pórticos (4, 5, 6m). Esto permite tener correas continuas de dos vanos, con barras de 12 metros de longitud (máxima fácilmente transportable por carretera).

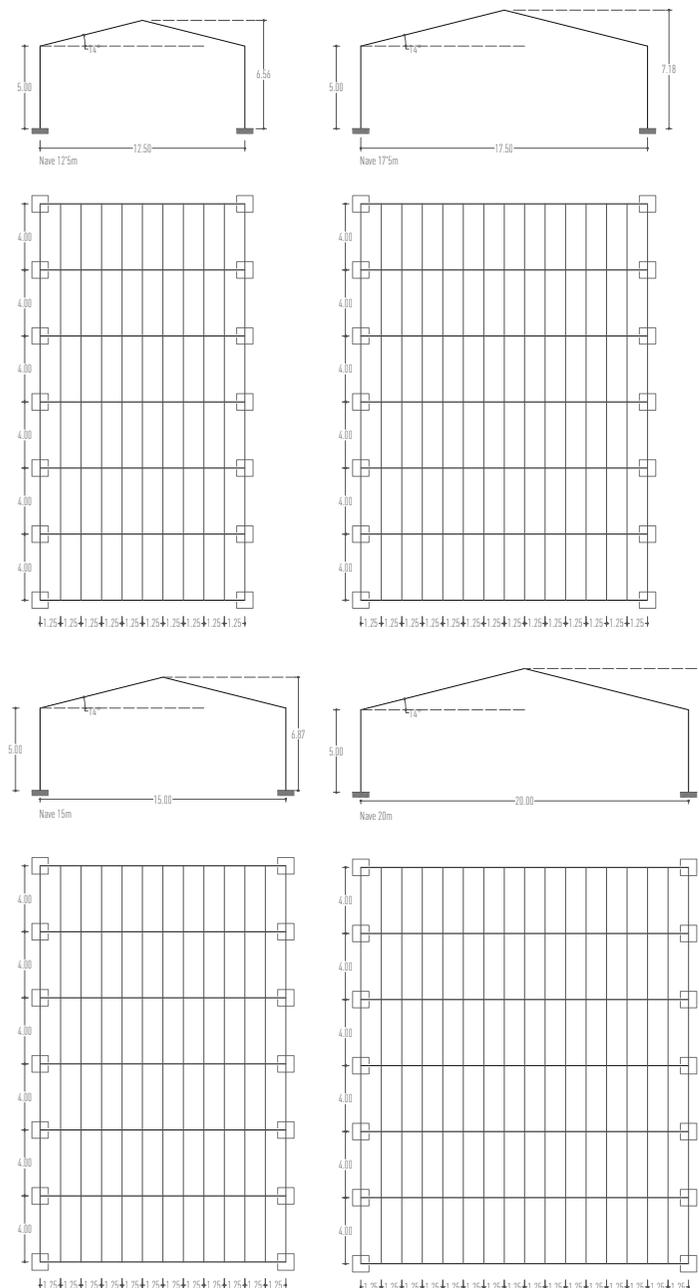


Imagen 2.6. Planta y alzado de los modelos estructurales de objeto de estudio con separación de pórticos de 4m. Elaboración propia.

Como se ha mencionado con anterioridad, la estructura se realiza en estructura metálica, concretamente mediante acero S 275 JR. Los perfiles utilizados para pórticos (vigas y soportes) y correas son perfiles de la serie IPE. Cabe destacar que todos los elementos estructurales se han calculado ajustando al máximo su tamaño o peso.

Asimismo, dadas las dimensiones de la estructura, es importante limitar tanto el pandeo lateral en vigas como el desplazamiento transversal de los soportes. Por ello, se disponen cruces de San Andrés en el primer y último pórtico de cada nave, tal como se muestra en la siguiente imagen. Para dicho arriostramiento, se opta por perfiles de la serie L, ajustando al máximo su peso o tamaño, al igual que con los elementos estructurales.

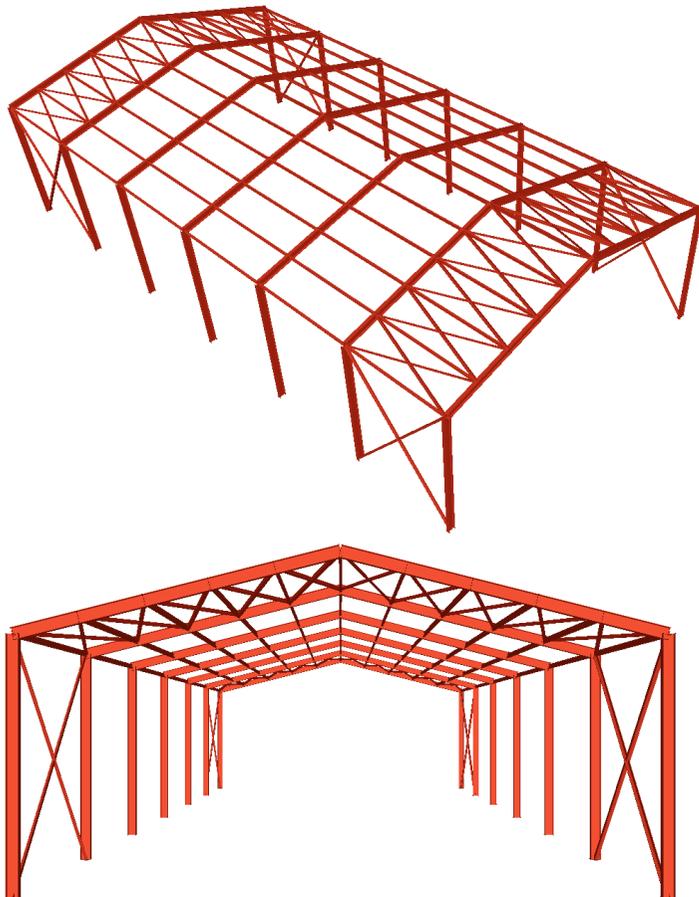


Imagen 2.7 y 2.8. Estructura de nave industrial (12,5x4) con arriostramiento. Fuente: Architrave®

### 2.3. Vínculos

La forma de unir los distintos elementos de la estructura se denomina vínculo. Estos pueden ser internos, *los vínculos internos o enlaces entre las distintas piezas que componen la estructura pueden ser articulados o rígidos* (Monfort, 1995), o externos, también denominados condiciones de contorno, que consisten en la unión entre la base del soporte con la cimentación, siendo las más habituales la articulación y el empotramiento.

Para este trabajo se opta por un pórtico de vínculos internos rígidos y empotramiento en la cimentación. Tal y como se dibuja en la siguiente imagen:

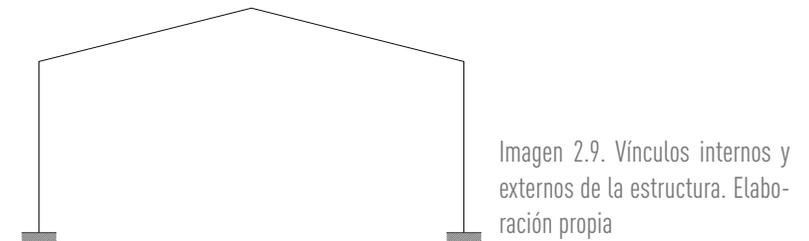


Imagen 2.9. Vínculos internos y externos de la estructura. Elaboración propia

Las uniones entre viga-viga y viga-soporte se realizan mediante uniones rígidas, con soldadura, por ello se diseñan vigas y soportes con el mismo perfil, lo cual facilita dicha unión.

A continuación se procede a definir el apoyo de las correas en la estructura. Se opta por colocarlas sobre la viga, con un giro igual a la inclinación que presentan las vigas (14,04°). Se opta por esta unión, no sólo por que permite la continuidad del mismo perfil sino también, por ser más fácil de materializar la unión entre ellas

En la cumbrera, se decide duplicar las correas para poder realizar el mismo tipo de unión que en el resto de correas. La duplicidad de correas permitiría reducir los perfiles a disponer, dado que la carga que deben soportar, es la mitad que la del resto de correas (e igual a la de la correa extrema). No obstante, con el fin de garantizar la planeidad de la cubierta, todas las correas se dimensionan con el mismo perfil, a pesar de que las 4 correas mencionadas (dos de cumbrera y dos extremas) están sobredimensionadas.

En las siguientes imágenes se muestran detalles de las uniones de viga-viga, viga pilar y viga-correa:

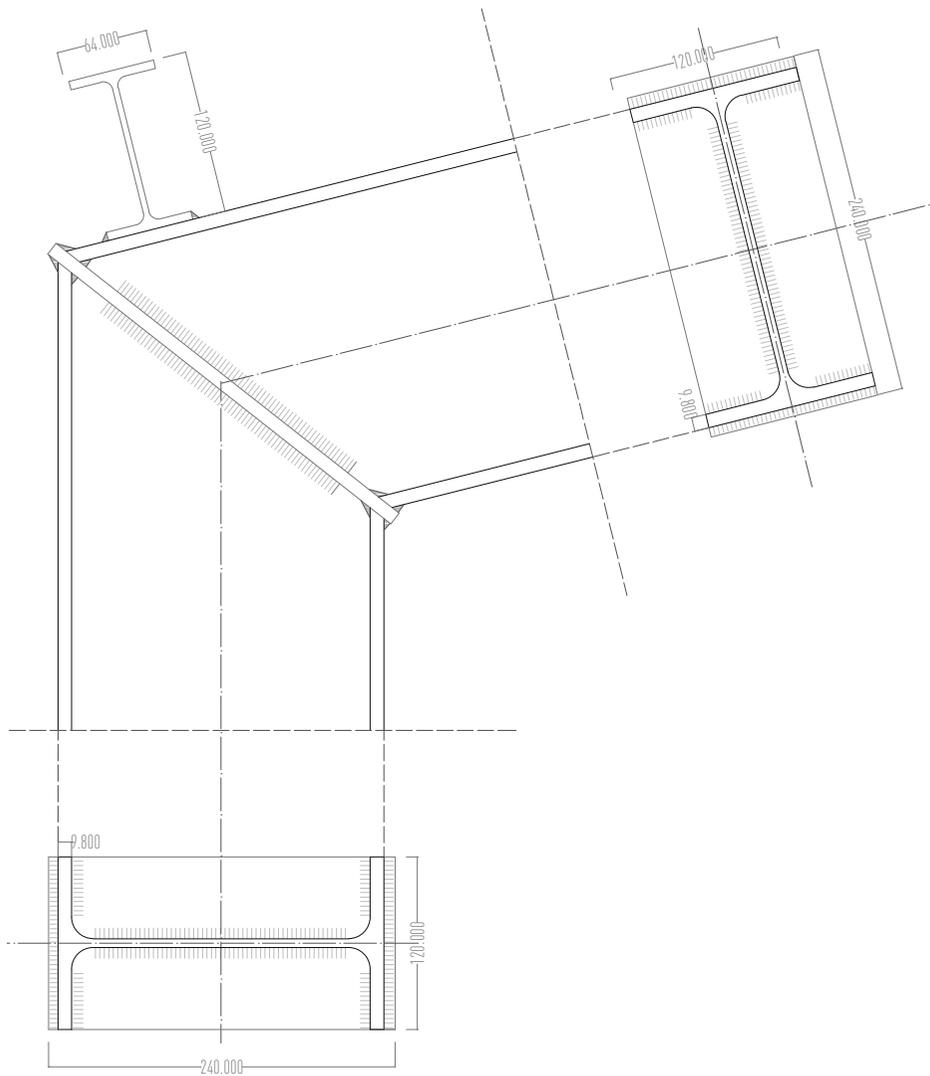


Imagen 2.10. Alzado, planta y sección de la unión entre Viga- soporte, y apoyo de correa.  
Elaboración propia

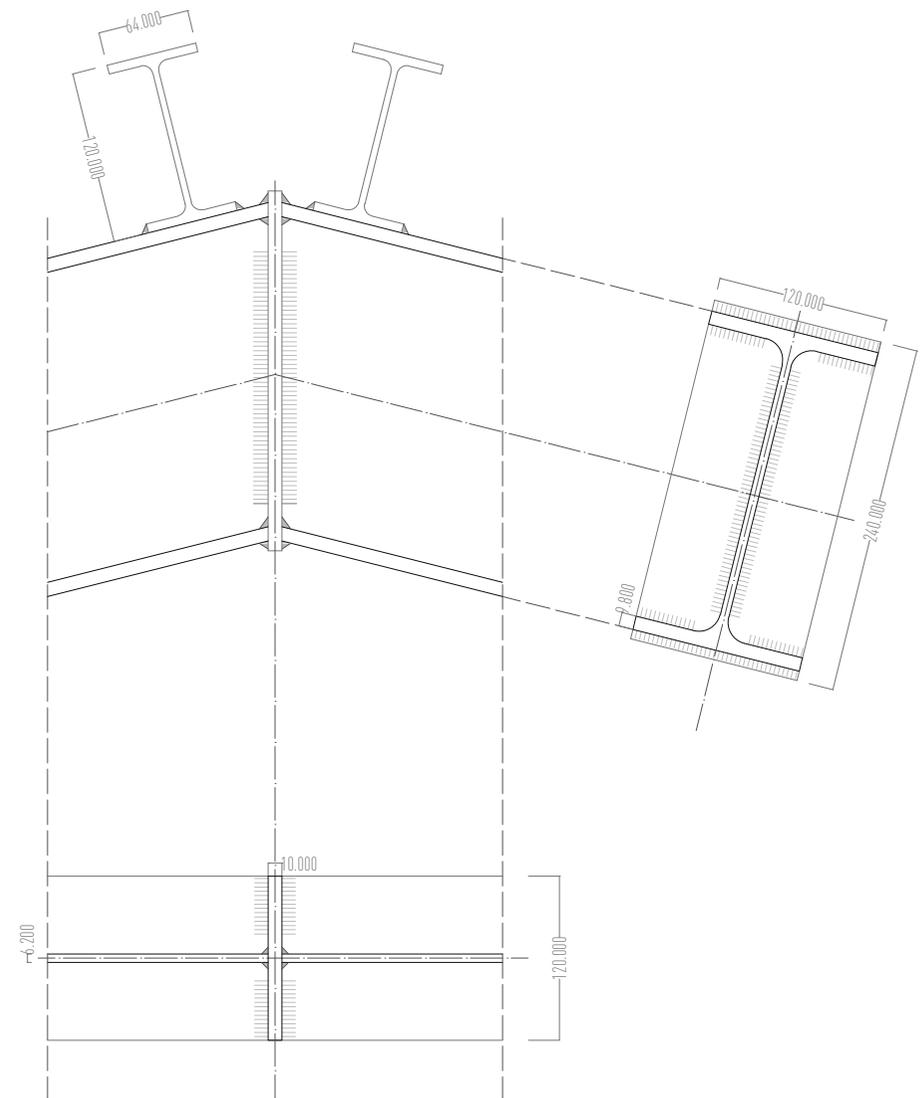


Imagen 2.11. Alzado, planta y sección de la unión entre Viga- viga, y apoyo de correas en cumbrera.  
Elaboración propia

### **3. ACCIONES EN LA EDIFICACIÓN (DB-SE-AE)**

Como se contempla en el CTE, las acciones se clasifican principalmente por su variación en el tiempo en: permanentes (DB-SE-AE, capítulo 2), variables (DB-SE-AE, capítulo 3) y accidentales (DB-SE-AE, capítulo 4).

Cabe destacar que, para el dimensionado de los modelos de objeto de estudio, se consideran únicamente los pórticos centrales de la nave. Es decir, los pórticos más desfavorables.

### 3.1. Acciones permanentes

Para los valores de acciones permanentes, se adopta el valor del peso propio de los elementos del edificio, en este caso, el panel sándwich de cubrición de cubierta y el peso de los elementos estructurales.

#### 3.1.1. Peso propio

- Panel sándwich HUT: 0,107 N/mm<sup>2</sup>. Aceralia Transformados
- Peso de los elementos estructurales: aplicado directamente con Architrave®.

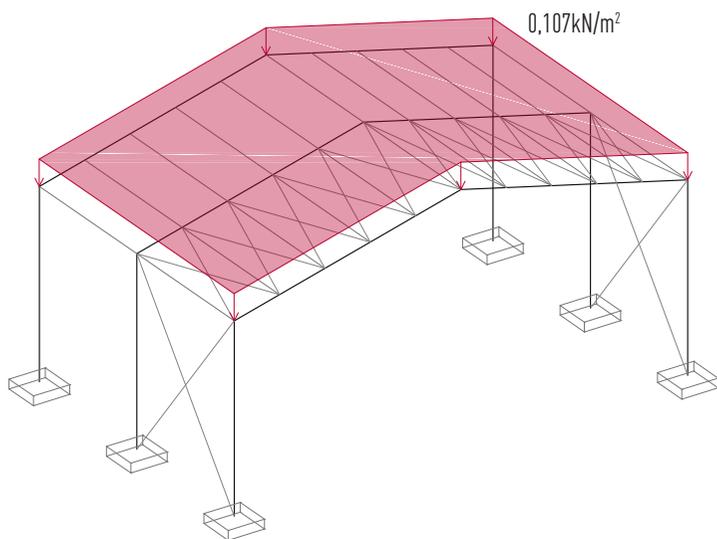


Imagen 3.1. Hipótesis de acciones permanentes (HIP01). Elaboración propia

### 3.2. Acciones variables

#### 3.2.1. Sobrecarga de uso

La sobrecarga de uso es el peso de todo lo que pueda gravitar sobre el edificio por razón de uso. Los valores están contemplados en la tabla 3.1 del CTE DB-SE-AE.

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m <sup>2</sup> ]	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 <sup>(1)</sup>
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente <sup>(2)</sup>			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación <sup>(3)</sup>	G1 <sup>(7)</sup>	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 <sup>(4)(6)</sup>	2
		G2	Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) <sup>(5)</sup>	0,4 <sup>(4)</sup>	1
				0	2

<sup>(1)</sup> Deben descomponerse en dos cargas concentradas de 10 kN separadas entre sí 1,8 m. Alternativamente dichas cargas se podrán sustituir por una sobrecarga uniformemente distribuida en la totalidad de la zona de 3,0 kN/m<sup>2</sup> para el cálculo de elementos secundarios, como nervios o viguetas, doblemente apoyados, de 2,0 kN/m<sup>2</sup> para el de losas, forjados reticulados o nervios de forjados continuos, y de 1,0 kN/m<sup>2</sup> para el de elementos primarios como vigas, ábacos de soportes, soportes o zapatas.

<sup>(2)</sup> En cubiertas transitables de uso público, el valor es el correspondiente al uso de la zona desde la cual se accede.

<sup>(3)</sup> Para cubiertas con un inclinación entre 20° y 40°, el valor de q, se determina por interpolación lineal entre los valores correspondientes a las subcategorías G1 y G2.

<sup>(4)</sup> El valor indicado se refiere a la proyección horizontal de la superficie de la cubierta.

<sup>(5)</sup> Se entiende por cubierta ligera aquella cuya carga permanente debida únicamente a su cerramiento no excede de 1 kN/m<sup>2</sup>.

<sup>(6)</sup> Se puede adoptar un área tributaria inferior a la total de la cubierta, no menor que 10 m<sup>2</sup> y situada en la parte más desfavorable de la misma, siempre que la solución adoptada figure en el plan de mantenimiento del edificio.

<sup>(7)</sup> Esta sobrecarga de uso no se considera concomitante con el resto de acciones variables.

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso. Fuente: CTE-DB-SE-AE

Es importante destacar la nota (7) al pie de la tabla. *Esta sobrecarga de uso no se considera concomitante con el resto de acciones variables.*

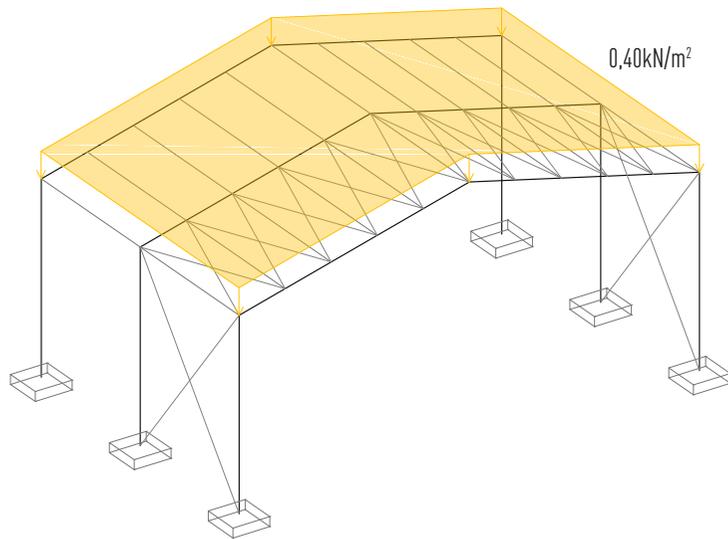


Imagen 3.2. Hipótesis de sobrecarga de uso (HIP02). Elaboración propia

### 3.2.2. Sobrecarga de nieve

La acción de la nieve se considera como una carga vertical por unidad de superficie en proyección horizontal de las superficies de cubierta, según la expresión del punto 3.5.1.2 del CTE DB-SE-AE:

$$q_n = \mu \cdot S_k$$

Según 3.5.2.1, La carga de nieve sobre un terreno horizontal  $S_k$  se obtiene de la tabla 3.8, para la localización geográfica de Valencia, el valor resultante es de  $S_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$

El coeficiente de forma  $\mu$ , se obtiene de acuerdo con lo establecido en 3.5.3, siendo para cubiertas de ángulo  $<30^\circ$ ,  $\mu = 1,00$ .

Por ello, la sobrecarga de nieve, que se considera en la cubierta de este edificio es:

$$q_n = 0,2 \text{ kN/m}^2.$$

Capital	Altitud m	$S_k$ kN/m <sup>2</sup>	Capital	Altitud m	$S_k$ kN/m <sup>2</sup>	Capital	Altitud m	$S_k$ kN/m <sup>2</sup>
Albacete	690	0,6	Guadalajara	680	0,6	Pontevedra	0	0,3
Alicante / Alacant	0	0,2	Huelva	0	0,2	Salamanca	780	0,3
Almería	1.130	0,2	Huesca	470	0,2	SanSebas- tián/Donostia	0	0,5
Ávila	180	1,0	Jaén	570	0,7	Santander	0	0,3
Badajoz	0	0,2	León	820	0,4	Segovia	1.000	0,7
Barcelona	0	0,4	Lérida / Lleida	150	1,2	Segovia	10	0,2
Bilbao / Bilbo	0	0,3	Logroño	380	0,5	Sevilla	1.090	0,2
Burgos	860	0,3	Lugo	470	0,6	Soria	0	0,9
Cáceres	440	0,6	Lugo	660	0,7	Tarragona	0	0,4
Cáceres	0	0,4	Madrid	0	0,6	Tenerife	950	0,2
Cádiz	0	0,2	Málaga	0	0,2	Teruel	550	0,9
Castellón	0	0,2	Murcia	40	0,2	Toledo	0	0,5
Ciudad Real	640	0,6	Orense / Ourense	130	0,4	Toledo	0	0,2
Córdoba	100	0,2	Oviedo	230	0,4	Valencia/València	690	0,4
Coruña / A Coruña	0	0,3	Palencia	740	0,5	Valladolid	520	0,7
Cuenca	1.010	1,0	Palencia	0	0,4	Vitoria / Gasteiz	650	0,4
Gerona / Girona	70	0,4	Palma de Mallorca	0	0,2	Zamora	210	0,4
Granada	690	0,5	Palmas, Las	0	0,2	Zaragoza	0	0,5
			Pamplona/Iruña	450	0,7	Ceuta y Melilla	0	0,2

Tabla 3.2. Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas. Fuente: CTE DB-SE-AE

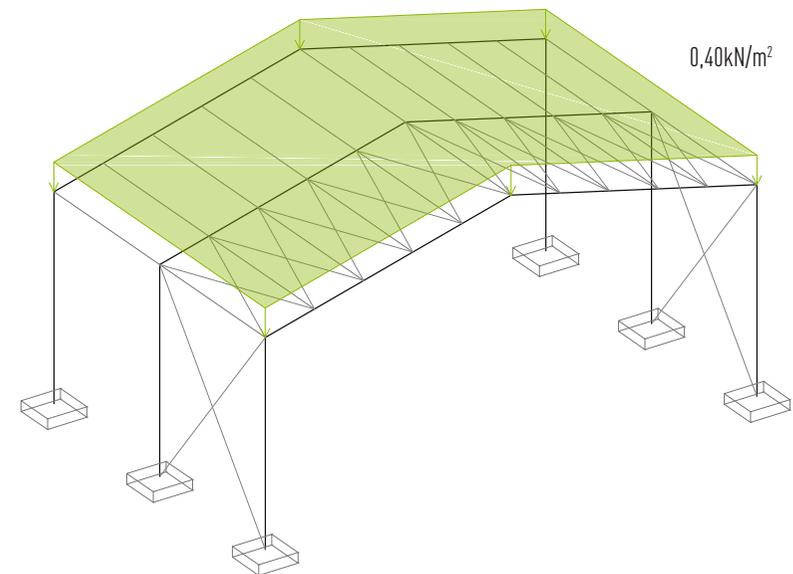


Imagen 3.3. Hipótesis de sobrecarga de nieve (HIP03). Elaboración propia

### 3.2.3. Sobrecarga de viento

La acción del viento, en general, es una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto, o presión estática, denominada  $q_e$  (según CTE DB-SE-AE, 3.3.2.1):

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

En primer lugar, se determina la presión dinámica  $q_b$ , determinada por su ubicación en la figura D1 del Anejo D. *Acción del viento DB-SE-AE*. La localización considerada para el estudio es Valencia (Comunidad Valenciana) que corresponde con la zona A (Anejo D; velocidad de viento 26m/s).

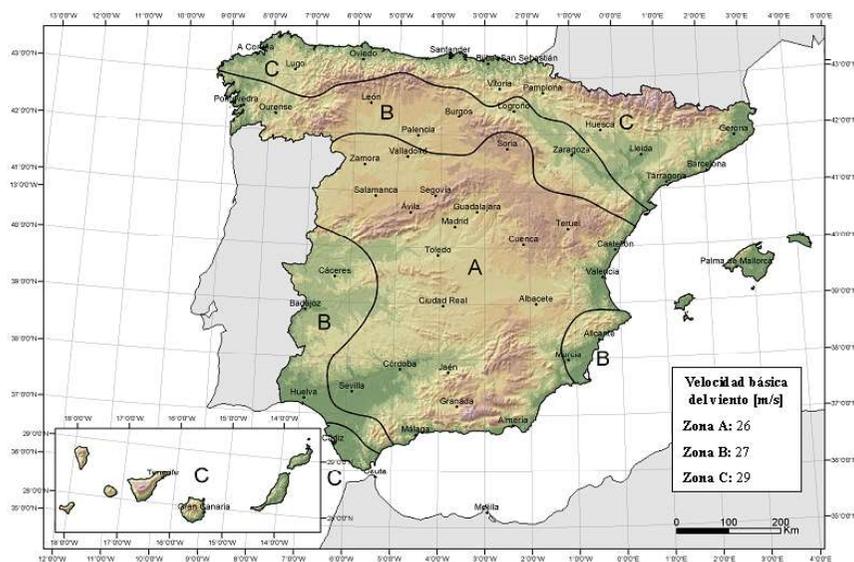


Imagen 3.4. Figura D.1. Mapa zonas de exposición al viento. Fuente CTE DB-SE-AE

Presión dinámica ( $q_b$ )	
Valencia (Zona A), velocidad básica del viento 26 m/s	$q_b = 0,42 \text{ kN/m}^2$

Tabla 3.3. Presión dinámica del viento ( $q_b$ ). Elaboración propia

El periodo de servicio para el que se comprueba esta estructura es de 50 años, por ello, el coeficiente corrector para la comprobación de servicio de la acción del viento es de 1,00 (tabla D.1, anejo D).

Periodo de retorno (años)	1	2	5	10	20	50	200
Coeficiente corrector	0,41	0,78	0,85	0,90	0,95	1,00	1,08

Tabla 3.4. Corrección de la velocidad básica en función del periodo de servicio.

El siguiente paso es calcular el coeficiente de exposición. Dada la geometría a dos aguas de la cubierta se tienen en consideración dos coeficientes de exposición distintos, el primero, de aplicación para soportes, considerando una altura de 5m y el segundo para cubiertas, teniendo en cuenta la cumbre de más altura, en este caso 7,5m. Se determina de acuerdo a lo establecido en el apartado D.2 del Anejo D del CTE-SE-AE.

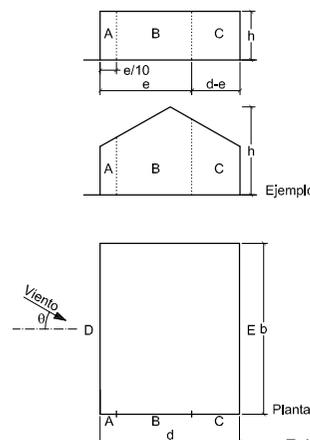
Grado de aspereza del entorno	Parámetro		
	k	L (m)	Z (m)
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	0,156	0,003	1,0
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	0,17	0,01	1,0
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	0,19	0,05	2,0
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	0,22	0,3	5,0
V Centro de negocios de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	0,24	1,0	10,0

Tabla 3.5. Coeficiente para tipo de entorno. Fuente: CTE DB-SE-AE, tabla D.2

Coeficiente de exposición ( $c_e$ ) - SOPORTES (z = 5m)		
$c_e = F \cdot (F + 7k)$	1,336	$c_e = 1,4$
$F = k \cdot \ln((\text{máx } z, Z)/L)$	0,619	
Tabla D.2 (Zona IV, Zona urbana en general, industrial o forestal)		
k	0,22	
L (m)	0,3	
Z (m)	5	
Coeficiente de exposición ( $c_e$ ) - CUBIERTA (z = 7,5m)		
$c_e = F \cdot (F + 7k)$	1,592	$c_e = 1,6$
$F = k \cdot \ln((\text{máx } z, Z)/L)$	0,708	
Tabla D.2 (Zona IV, Zona urbana en general, industrial o forestal)		
k	0,22	
L (m)	0,3	
Z (m)	5	

Tabla 3.6. Hoja de cálculo de los coeficientes de exposición ( $c_e$ ). Elaboración propia

Por último, se obtiene el coeficiente eólico o de presión ( $c_p$ ). Éste depende de la dirección relativa del viento, de la forma del edificio, de la posición de elemento considerado y de su área de influencia. Se determina de acuerdo a lo establecido en el apartado D.3 del Anejo D del DB-SE-AE, con la ayuda de las tablas D.3 para paramentos verticales y D.6 para paramentos horizontales.



A (m <sup>2</sup> )	h/d	Zona (según figura), -45° < θ < 45°				
		A	B	C	D	E
≥ 10	5	-1,2	-0,8	-0,5	0,8	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	≤ 0,25	"	"	"	0,7	-0,3
5	5	-1,3	-0,9	-0,5	0,9	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	≤ 0,25	"	"	"	0,8	-0,3
2	5	-1,3	-1,0	-0,5	0,9	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	≤ 0,25	"	"	"	0,7	-0,3
≤ 1	5	-1,4	-1,1	-0,5	1,0	-0,7
	1	"	"	"	"	-0,5
	≤ 0,25	"	"	"	"	-0,3

Tabla 3.7. Paramentos verticales. Fuente: CTE DB-SE-AE, tabla D.3

Para el cálculo del coeficiente de presión en fachadas se consideran sólo las zonas D y E, pues al estudiar una franja central de una nave industrial, no procede considerar las zonas correspondientes a los testeros:

$$d = 12,5m \quad h = 5m \quad h/d < 1$$

$$b = 8m \quad e = 8 \quad A > 10m^2$$

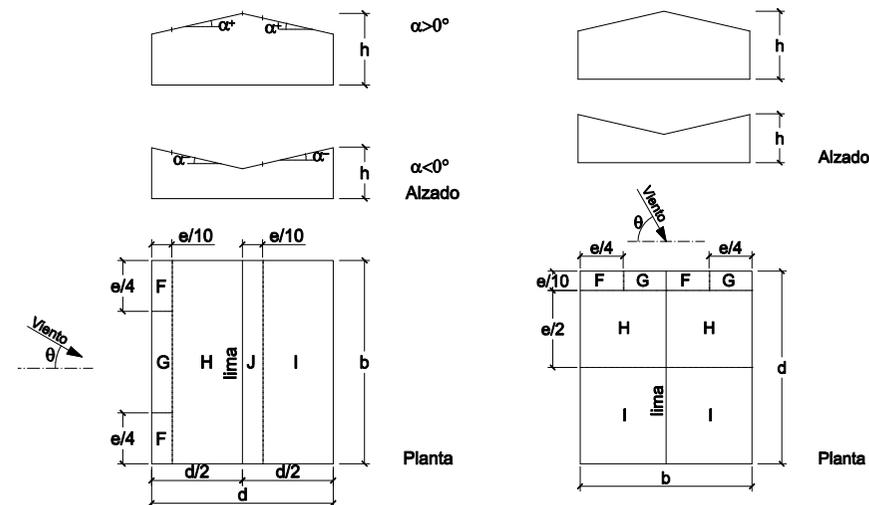
Paramentos verticales	
Norte/Sud (Zona A, B, C)	No procede
Este/Oeste (Zona D, E)	
Zona D	C <sub>pD</sub> = 0,80 Presión
<b>Q<sub>vD</sub> (Presión) = 0,47 kN/m<sup>2</sup></b>	
Zona E	C <sub>pE</sub> = -0,50 Succión
<b>Q<sub>vE</sub> (Succión) = -0,29 kN/m<sup>2</sup></b>	

Tabla 3.8. Hoja de cálculo del coeficiente de presión ( $c_p$ ) en paramentos verticales. Elaboración propia

Para el cálculo del viento en cubierta se tiene en consideración tanto la orientación Norte-Sur, como la orientación Este-Oeste.

a) Dirección del viento  $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$

b) Dirección del viento  $45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$



a) Dirección del viento  $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$

Pendiente de la cubierta α	A (m <sup>2</sup> )	Zona (según figura)				
		F	G	H	I	J
15°	≥ 10	-0,9	-0,8	-0,3	-0,4	-1
	≤ 1	0,2	0,2	0,2	+0,0	+0,0
		-2	-1,5	-0,3	-0,4	-1,5
		0,2	0,2	0,2	+0,0	+0,0

b) Dirección del viento  $45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$

Pendiente de la cubierta α	A (m <sup>2</sup> )	Zona (según figura), -45° ≤ θ ≤ 45°			
		F	G	H	I
15°	≥ 10	-1,3	-1,3	-0,6	-0,5
	≤ 1	-2,0	-2,0	-1,2	-0,5

Tabla 3.9. Paramentos horizontales. Fuente: CTE DB-SE-AE, tabla D.6.

Para el cálculo del coeficiente de presión en cubiertas, se considera únicamente la zona H, la más desfavorable, en las orientaciones Norte y Sur. Para las orientaciones Este y Oeste se consideran todas las zonas.

$$d = 12,5m \quad h = 5m \quad h/d < 1$$

$$b = 8m \quad e = 8 \quad A > 10m^2$$

Paramentos horizontales		
Norte/Sud (Zona H)	C <sub>pH</sub>	= -0,60 Succión
	Q <sub>vH</sub>	= -0,40 kN/m <sup>2</sup>
<b>Q<sub>v</sub>(Succión) = -0,40 kN/m<sup>2</sup></b>		
Este/Oeste (Zona G, H, J, I)		
Zona G	C <sub>pG</sub>	= -0,80 Succión
	Q <sub>vG</sub>	= -0,54 kN/m <sup>2</sup>
	C <sub>pG</sub>	= 0,20 Presión
	Q <sub>vG</sub>	= 0,13 kN/m <sup>2</sup>
Zona H	C <sub>pH</sub>	= -0,30 Succión
	Q <sub>vH</sub>	= -0,20 kN/m <sup>2</sup>
	C <sub>pH</sub>	= 0,20 Presión
	Q <sub>vH</sub>	= 0,13 kN/m <sup>2</sup>
Zona J	C <sub>pJ</sub>	= -1,00 Succión
	Q <sub>vJ</sub>	= -0,67 kN/m <sup>2</sup>
Zona I	C <sub>pI</sub>	= -0,40 Succión
	Q <sub>vI</sub>	= -0,27 kN/m <sup>2</sup>
<b>Q<sub>v</sub>(Succión) = -0,28 kN/m<sup>2</sup></b>		
<b>Q<sub>v</sub>(Presión) = 0,13 kN/m<sup>2</sup></b>		

Tabla 3.10. Hoja de cálculo del coeficiente de presión (c<sub>p</sub>) en paramentos horizontales. Elaboración propia

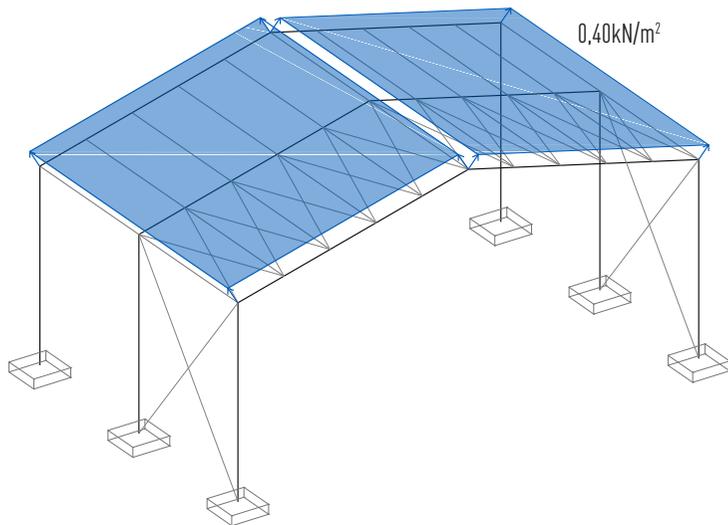


Imagen 3.5. Hipótesis de viento NORTE/SUD (HIP04). Elaboración propia

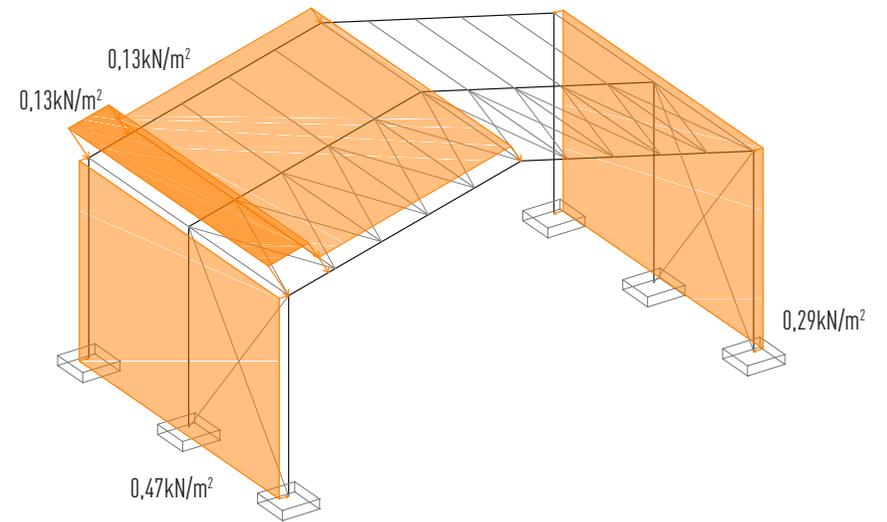


Imagen 3.6. Hipótesis de viento ESTE/OESTE Presión (HIP05). Elaboración propia

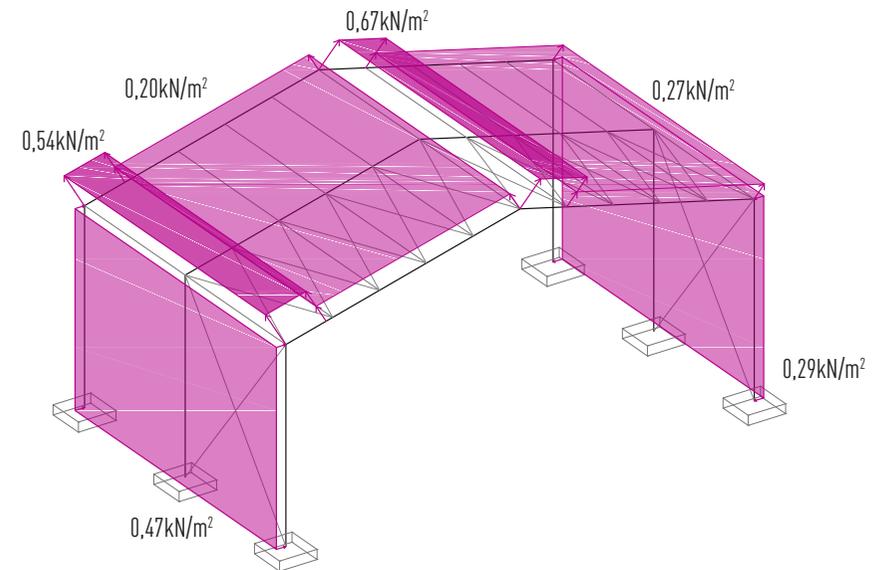


Imagen 3.7. Hipótesis de viento ESTE/OESTE Succión (HIP06). Elaboración propia

## 3.3. Cuadro resumen de hipótesis

HIPÓTESIS					
		Vertical	Horizontal		
HIP 01	Peso Propio	0,107	-	kN/m <sup>2</sup>	
HIP 02	Sobrecarga de uso	0,4	-	kN/m <sup>2</sup>	
HIP 03	Sobrecarga de nieve	0,4	-	kN/m <sup>2</sup>	
HIP 04	Sobrecarga de viento NORTE/SUD	-0,4	-	kN/m <sup>2</sup>	
HIP 05	Sobrecarga de viento ESTE/OESTE PRESIÓN	0,13		kN/m <sup>2</sup>	
	Presión		0,47	kN/m <sup>2</sup>	
	Succión		-0,29	kN/m <sup>2</sup>	
HIP 06	Sobrecarga de viento ESTE/OESTE SUCCIÓN	-0,28		kN/m <sup>2</sup>	
	Presión		0,47	kN/m <sup>2</sup>	
	Succión		-0,29	kN/m <sup>2</sup>	

Tabla 3.11. Hipótesis consideradas para el estudio. Elaboración propia

## **4. COMBINACIONES DE CARGA (DB-SE)**

### 4.1. Combinaciones de Estados Límite Último

El proceso de dimensionado se basa en los métodos de verificación basadas en coeficientes parciales, y en concreto en el método de estados límite.

Según el CTE DB-SE, apartado 3.2.1: *Se denominan estados límite aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguno de los requisitos estructurales para las que ha sido concebido.*

CTE DB-SE, apartado 4.1.1: *La verificación de los estados límite mediante coeficientes parciales, para la determinación del efecto de las acciones, así como de la respuesta estructural, se utilizan los valores de cálculo de las variables, obtenidos a partir de sus valores característicos, u otros valores representativos, multiplicándolos o dividiéndolos por los correspondientes coeficientes parciales para las acciones y la resistencia, respectivamente.*

CTE DB-SE, apartado 4.2.2.1: *El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondiente a una situación persistente o transitoria, se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión:*

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad [4.3]$$

Siendo:

- $G_{k,j}$  : Valor característico de las acciones permanentes
- $Q_{k,1}$  : Valor característico de la acción variable determinante
- $\gamma_G, \gamma_Q$  : Coeficientes de mayoración de cargas permanentes y variables
- $\psi_0$  : Coeficientes de simultaneidad de la sobrecarga

Tipo de verificación <sup>(1)</sup>	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
		desestabilizadora	estabilizadora
Estabilidad	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

Tabla 4.1. Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones. Fuente: CTE DB-SE

	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		<sup>(1)</sup>	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

<sup>(1)</sup> En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Tabla 4.2. Coeficientes de simultaneidad ( $\psi$ ). Fuente: CTE DB-SE

Las combinaciones de carga se realizarán mediante el uso del programa *Architrave*® (Pérez-García et al., 2015), una vez asignados los valores de ponderación de cada acción.

COMBINACIONES ELU													
	Y <sub>G</sub>		Y <sub>Q</sub>		Y <sub>Q</sub>	ψ <sub>0</sub>		Y <sub>Q</sub>	ψ <sub>0</sub>				
COMB 01	1,35	HIP01	+	1,5	HIP02	+	1,5	0,5	HIP03	+	1,5	0,6	HIP04
COMB 02	1,35	HIP01	+	1,5	HIP02	+	1,5	0,5	HIP03	+	1,5	0,6	HIP05
COMB 03	1,35	HIP01	+	1,5	HIP02	+	1,5	0,5	HIP03	+	1,5	0,6	HIP06
COMB 04	1,35	HIP01	+	1,5	HIP03	+	1,5	0,6	HIP04				
COMB 05	1,35	HIP01	+	1,5	HIP03	+	1,5	0,6	HIP05				
COMB 06	1,35	HIP01	+	1,5	HIP03	+	1,5	0,6	HIP06				
COMB 07	1,35	HIP01	+	1,5	HIP04	+	1,5	0,5	HIP03				
COMB 08	1,35	HIP01	+	1,5	HIP05	+	1,5	0,5	HIP03				
COMB 09	1,35	HIP01	+	1,5	HIP06	+	1,5	0,5	HIP03				

Tabla 4.3. Combinaciones ELU consideradas para el estudio. Elaboración propia

#### 4.2. Combinaciones de Estados Límite de Servicio.

CTE DB-SE, apartado 3.2.2.1: *Los estados límite de servicio son los que, de ser superados, afectan al confort y al bienestar de los usuarios o de terceras personas, al correcto funcionamiento de del edificio o a la apariencia de la construcción.*

$$\sum_{j \geq 1} \cdot G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad [4.6]$$

Siendo:

- G<sub>k,j</sub> : Valor característico de las acciones permanentes
- Q<sub>k,1</sub> : Valor característico de la acción variable determinante
- ψ<sub>0</sub> : Coeficientes de simultaneidad de las sobrecarga

Dadas las luces de gran valor que presentan las naves industriales, tanto en vigas como en correas, es importante realizar una comprobación a flecha.

CTE DB-SE, apartado 4.3.3.1: *Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando sólo las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento, la flecha relativa es menor que:*

- a) 1/500 en pisos con tabiques frágiles (como los de gran formato, rasillones, o placas) o pavimentos rígidos sin juntas.
- b) 1/400 en pisos con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas;
- c) 1/300 en el resto de los casos.

En el presente trabajo se ha de considerar la limitación c), es decir 1/300.

CTE DB-SE, apartado 4.3.3.4: *Las condiciones anteriores deben verificarse entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos. En general, será suficiente realizar dicha comprobación en dos direcciones ortogonales.*

Para los pórticos estructurales, la luz a considerar es igual a la luz del pórtico, ya que el punto a comprobar es desde la cabeza del soporte hasta la cumbre (punto que más se desplaza), se observa en la imagen 4.1. Para la comprobación de correas, la distancia entre dos puntos a considerar es de 3m, por lo que la luz para el cálculo es de 6m, imagen 4.2.

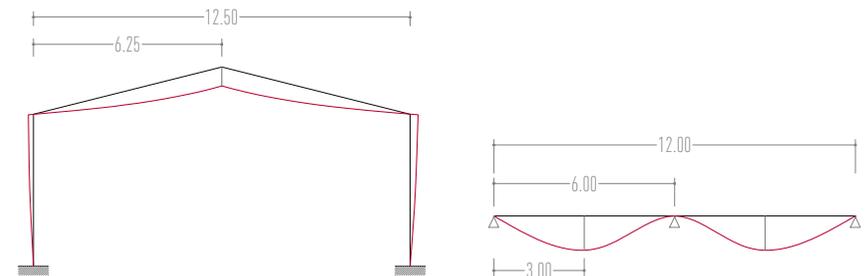


Imagen 4.1. Deformada pórtico, Elaboración propia

Imagen 4.2. Deformada correa, Elaboración propia

Además de la deformación de vigas y correas, la norma también limita el desplazamiento horizontal de los soportes.

CTE DB-SE, apartado 4.3.3.2.1: *Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, susceptibles de ser dañados por desplazamientos horizontales, tales como tabiques o fachadas rígidas, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral, si ante cualquier combinación de acciones característica, el desplome es menor de:*

- a) *desplome total: 1/500 de la altura total del edificio;*
- b) *desplome local: 1/250 de la altura de la planta, en cualquiera de ellas.*

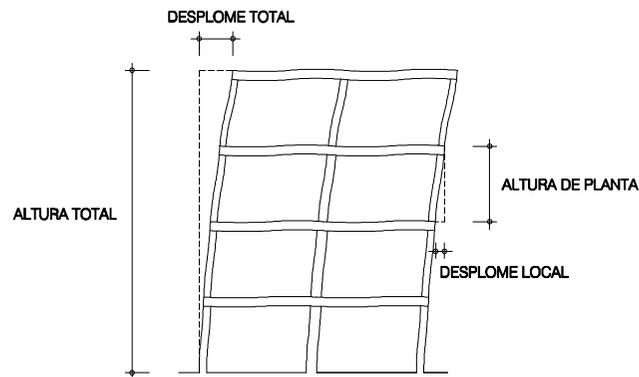


Imagen 4.3. Desplomes horizontales. Fuente: CTE DB-SE

COMBINACIONES ELS					
			$\psi_0$		$\psi_0$
COMB 01	HIP01 + HIP02 +	0,5	HIP03 +	0,6	HIP04
COMB 02	HIP01 + HIP02 +	0,5	HIP03 +	0,6	HIP05
COMB 03	HIP01 + HIP02 +	0,5	HIP03 +	0,6	HIP06
COMB 04	HIP01 + HIP03 +	0,6	HIP04		
COMB 05	HIP01 + HIP03 +	0,6	HIP05		
COMB 06	HIP01 + HIP03 +	0,6	HIP06		
COMB 07	HIP01 + HIP04 +	0,5	HIP03		
COMB 08	HIP01 + HIP05 +	0,5	HIP03		
COMB 09	HIP01 + HIP06 +	0,5	HIP03		

Tabla 4.4. Combinaciones ELS. Elaboración propia.

## **5. PREDIMENSIONADO DE LA ESTRUCTURA**

Para el predimensionado de la estructura se han obtenido las solicitaciones con ayuda del formulario para vigas y pórticos incluido en: *Prontuario y herramientas informáticas para cálculo de estructuras*.

### 5.1. Predimensionado de pórticos.

En el predimensionado de los pórticos sólo se han considerado las acciones verticales. Además, tanto soportes como vigas se diseñan con el mismo perfil, lo que simplifica la ejecución de las uniones viga-soporte.

A continuación se presenta el modelo del pórtico y su diagrama de momentos flectores.

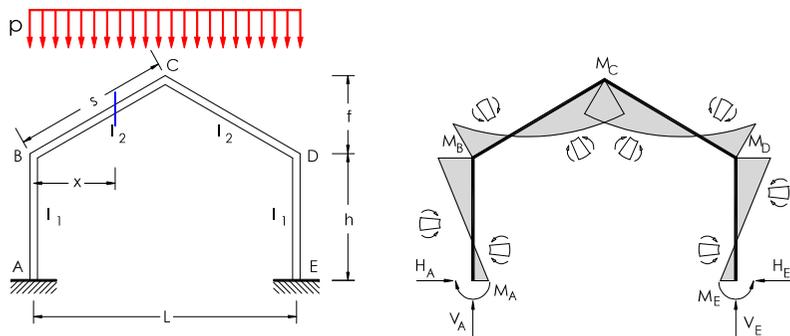


Imagen 5.1. Pórticos simples biempotrados a la misma altura con dintel a dos aguas y carga repartida vertical. Fuente: *Prontuario y herramientas informáticas para cálculo de estructuras*

Una vez obtenidas las solicitaciones, se procede a las comprobaciones pertinentes para determinar el perfil de soportes y vigas. Se predimensionarán los soportes y ese mismo perfil se dispondrá en las vigas (la comprobación de vigas se realizará directamente en el dimensionado). Las comprobaciones son: Resistencia a flexocompresión, interacción flector-cortante y resistencia frente a pandeo.

#### 5.1.1. Resistencia de la sección

##### 5.1.1.1. Resistencia a flexocompresión

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1 \quad [6.11, \text{ para clases 1 y 2}]$$

##### 5.1.1.2. Interacción momento flector - esfuerzo cortante

$$V_{Ed} \leq 50\% \cdot V_{pl,Rd}$$

#### 5.1.2. Comprobación a pandeo

Para la comprobación a pandeo en flexocompresión de nuestro perfil, se elige la condición de clase 1 y 2, además dado que es una sección abierta, deberá de cumplir también la condición de pandeo por torsión.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad [6.51, \text{ CTE DB-SE-A}]$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad [6.52, \text{ CTE DB-SE-A}]$$

##### 5.1.2.1 Determinación coeficientes $\chi$

Longitud de pandeo ( $L_k$ ):  $L_k = \beta \cdot L$   
 $\beta_y = 2$  (barra empotrada-libre)  
 $\beta_z = 0,7$  (barra empotrada-articulada)

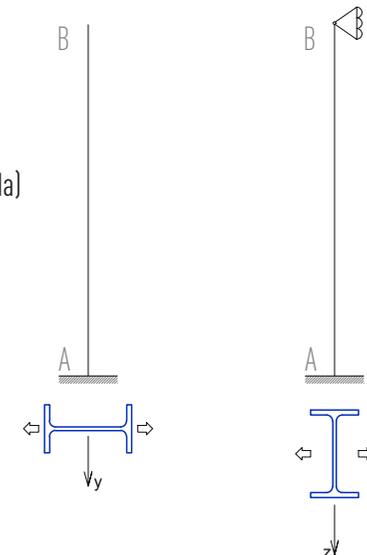


Imagen 5.2. Modelización de soporte y orientación de perfil. Elaboración propia

Esbeltez ( $\lambda$ ):  $\lambda = L_k / i$ ; (siendo  $i$ , el radio de giro de la pieza completa)  
 Esbeltez reducida ( $\bar{\lambda}$ ):  $\bar{\lambda} = \lambda / \lambda_R$

Curva de pandeo:

Tipo de sección	Tipo de acero		S235 a S355		S450	
	Eje de pandeo <sup>(1)</sup>		y	z	y	z
Perfiles laminados en I	h/b > 1,2	t ≤ 40 mm	a	b	a <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>
		40 mm < t ≤ 100 mm	b	c	a	a
	h/b ≤ 1,2	t ≤ 100 mm	b	c	a	a
		t > 100 mm	d	d	c	c

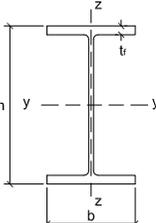


Tabla 5.1. Curva de pandeo en función de la sección transversal. Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.2.

Coefficientes de pandeo:

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
<b>Coefficiente (α) de imperfección</b>	<b>0,13</b>	<b>0,21</b>	<b>0,34</b>	<b>0,49</b>	<b>0,76</b>
≤ 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 <sup>(1)</sup>	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 <sup>(1)</sup>	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 <sup>(1)</sup>	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 <sup>(2)</sup>	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 <sup>(2)</sup>	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

<sup>(1)</sup> esbeltez intolerable en los elementos principales  
<sup>(2)</sup> esbeltez intolerable incluso en elementos de arriostramiento

Tabla 5.2. Coeficientes de pandeo (χ). Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.3

5.1.2.2. Determinación coeficientes χ<sub>LT</sub>

Para determinar el coeficiente χ<sub>LT</sub> necesitamos conocer el valor de λ̄<sub>LT</sub>. De esta forma podremos entrar en tablas para conocer la curva apropiada.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{(W_y \cdot f_y) / M_{cr}} \quad [6.34, \text{CTE DB-SE-A}]$$

$$M_{cr} = \sqrt{(M_{LT,V})^2 + (M_{LT,W})^2} \quad [6.35, \text{CTE DB-SE-A}]$$

$$M_{LT,V} = b_{LT,V} \cdot C_1 / L_c \quad [6.36, \text{CTE DB-SE-A}]$$

$$M_{LT,W} = b_{LT,W} \cdot C_1 / L_c^2 \quad [6.37, \text{CTE DB-SE-A}]$$

Para obtener el coeficiente C<sub>1</sub> se utiliza la tabla 5.3. Dado que la barra es empotrada articulada, se considera el valor 1,28 para quedar del lado de la seguridad.

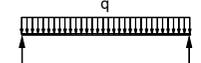
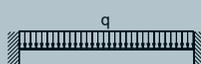
Condiciones de carga y apoyo	Diagrama de momentos flectores	k	C <sub>1</sub>
		1,0	1,13
		0,5	0,97
		1,0	1,28
		0,5	0,71

Tabla 5.3. Coeficientes C<sub>1</sub>. Fuente: Monfort, 2006

Una vez obtenido los valores de las ecuaciones anteriores, de la siguiente tabla se extrae la curva de pandeo a considerar, para poder obtener el valor de χ<sub>LT</sub>:

Elemento	Límites	Curva de pandeo	α <sub>LT</sub>
Perfil laminado con sección en doble T	h/b ≤ 2	a	0,21
	h/b > 2	b	0,34
Elemento armado con sección en doble T	h/b ≤ 2	c	0,49
	h/b > 2	d	0,76
Elementos con otras secciones	-	d	0,76

La esbeltez relativa frente al pandeo lateral se determinará según la relación

Tabla 5.4. Curvas de pandeo lateral. Fuente: CTE DB-SE-A

5.1.2.3. Determinación de coeficientes de momento equivalente C<sub>m</sub>.

Este coeficiente depende de la distribución de momentos flectores, y se obtiene de la siguiente tabla:

Factor de momento flector	Eje de flexión	Puntos arriostrados en dirección
C <sub>m,y</sub>	y-y	z-z
C <sub>m,z</sub>	z-z	y-y
C <sub>m,LT</sub>	y-y	y-y

Diagrama de Flectores	Factor de momento uniforme equivalente
	$C_{m,i} = C_{m,i} (i=y)$ $C_{m,i} = C_{m,i} (i=z)$ $C_{m,i,T} = C_{m,i} (i=LT)$
	$C_{m,i} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4$
	$C_{m,i} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha \geq 0,4$ si $-1 \leq \alpha \leq 0$ $C_{m,i} = 0,2 + 0,8 \cdot \alpha \geq 0,4$ si $0 \leq \alpha \leq 1$
	$C_{m,i} = 0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h$ con $-1 \leq \alpha_h \leq 1$

Tabla 5.5. Coeficientes de momento equivalente. Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.10.

5.1.2.4. Coeficientes k<sub>y</sub>.

Clase	Tipo de sección	k <sub>y</sub>	k <sub>z</sub>	k <sub>yLT</sub>
1 y 2	I, H, abiertas	$1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	el menor de $1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$
	Hueca delgada		$1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$0,6 + \bar{\lambda}_z$
3 y 4	Todas	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$1 - \frac{0,05 \cdot \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$

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

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

Tabla 5.6. Coeficientes k<sub>y</sub>. Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.9.

Sustituyendo en la expresión de comprobación de pandeo y en la de sensibilidad a la torsión, se comprueba si el perfil cumple o si por el contrario, se debe de aumentar dicho perfil.

En las siguientes tablas se recogen los predimensionados de los soportes más desfavorables de las distintas naves.

5.1.3. Predimensionado de soporte más desfavorable CASO 1.

Solicitaciones:  $M_{Ed} = 45.916.583,03 \text{ Nmm}$   
 $V_{Ed} = 16.085,98 \text{ N}$   
 $N_{Ed} = 26.250 \text{ N}$

Para la elección del perfil se siguen las condiciones de resistencia y deformación una vez obtenido un perfil, se procede a su comprobación:

Resistencia:  $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$

Pandeo: Limitaremos la esbeltez reducida a 2;  $\bar{\lambda} \leq 2$ ;  $\lambda/\lambda_R \leq 2$ ;  
 dado que para acero S275  $\lambda_R = 86,8$ ;  $\lambda \leq 173$

- Pandeo en el eje y.

$L_{ky} = \lambda_y \cdot L_y = 2 \cdot 5000 = 10.000 \text{ mm}$   
 $\lambda_y = L_{ky}/i_y \leq 173$ ;  $10.000/i_y \leq 173$ ;  $i_y > 57,80 \text{ mm}$

- Pandeo en el eje z.

$L_{kz} = \lambda_z \cdot L_z = 0,7 \cdot 5000 = 3.500 \text{ mm}$   
 $\lambda_z = L_{kz}/i_z \leq 173$ ;  $3.500/i_z \leq 173$ ;  $i_z > 20,23 \text{ mm}$

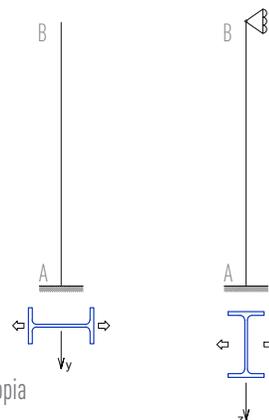


Imagen 5.3. Orientación de soporte. Elaboración propia

Con esto, el primer perfil que cumple es el IPE 200. Sin embargo, una vez comprobado, se observa que no cumple, por lo que se aumenta dos veces el perfil, hasta su cumplimiento. Podemos observar la comprobación del perfil IPE 240 en la tabla 5.7.

Características IPE 240 (Clase de sección 2):

$b = 120 \text{ mm}$        $h = 240 \text{ mm}$        $tw = 6,8 \text{ mm}$        $tf = 9,8 \text{ mm}$   
 $A = 3910 \text{ mm}^2$        $M_{pl,Rd} = 95.857.142 \text{ Nmm}$        $V_{pl,Rd} = 288.812 \text{ N}$

$b_{LT,y} = 247.810 \cdot 10^6 \text{ Nmm}^2$ ;     $b_{LT,w} = 580.441 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^3$ ;     $W_y \cdot f_y = 100,650 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$

Resistencia de la sección		
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} > 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia de la sección frente a pandeo $M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$		
Determinación coeficiente $\chi$		
$Lky = \beta y \cdot L$	10000	
$Lkz = \beta z \cdot L$	3500	
$\lambda y = Lky / i_y$	100,301	
$\lambda z = Lkz / i_z$	130,112	
$\lambda y$ (reducida)	1,156	1,2
$\lambda z$ (reducida)	1,499	1,5
$\chi y$ (tabla 4.7)	0,53	
$\chi z$ (tabla 4.7)	0,34	
Determinación coeficiente $\chi_{LT}$		
$M_{LT,y} = b_{LT,y} \cdot (C_1/Lc)$	63439360	
$M_{LT,w} = b_{LT,w} \cdot (C_1/Lc^2)$	29718579,2	
$M_{cr} = \sqrt{M_{LT,y}^2 + M_{LT,w}^2}$	70055309,2	
$\lambda_{LT} = \sqrt{(W_y \cdot f_y) / M_{cr}}$	1,1986	1,2
Determinación coeficiente $C_m$	0,8	
Determinación coeficiente $k_y$		
$k_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}}$	1,0387	
$k_{y,LT} = 1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{C_{m,LT} - 0,25} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}}; 0,6 + \bar{\lambda}_z$	0,9912	
$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$	0,7636	Cumple
$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$	0,9286	Cumple

Tabla 5.7. Hoja de cálculo de predimensionado de soporte más desfavorable de la nave 15x6. Elaboración propia.

5.1.4. Predimensionado de soporte más desfavorable CASO 2.

Solicitaciones:  $M_{Ed} = 76.366.011,94 \text{ Nmm}$   
 $V_{Ed} = 27.481,76 \text{ N}$   
 $N_{Ed} = 35.000 \text{ N}$

Para la elección del perfil se siguen las condiciones de resistencia y deformación una vez obtenido un perfil, se procede a su comprobación:

Resistencia:  $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$

Pandeo: Limitaremos la esbeltez reducida a 2;  $\bar{\lambda} \leq 2$ ;  $\lambda/\lambda_R \leq 2$ ;  
 dado que para acero S275  $\lambda_R = 86,8$ ;  $\lambda \leq 173$

- Pandeo en el eje y.

$L_{ky} = \lambda_y \cdot L_y = 2 \cdot 5000 = 10.000 \text{ mm}$   
 $\lambda_y = L_{ky}/i_y \leq 173$ ;  $10.000/i_y \leq 173$ ;  $i_y > 57,80 \text{ mm}$

- Pandeo en el eje z.

$L_{kz} = \lambda_z \cdot L_z = 0,7 \cdot 5000 = 3.500 \text{ mm}$   
 $\lambda_z = L_{kz}/i_z \leq 173$ ;  $3.500/i_z \leq 173$ ;  $i_z > 20,23 \text{ mm}$

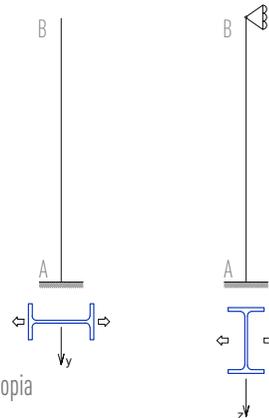


Imagen 5.4. Orientación de soporte. Elaboración propia

Con esto, el primer perfil que cumple es el IPE 240. Sin embargo, una vez comprobado, se observa que no cumple, por lo que se aumenta hasta tres veces el perfil, hasta su cumplimiento. Podemos observar la comprobación del perfil IPE 330 en la tabla 5.8.

Características IPE 330 (Clase de sección 2):

$b = 160 \text{ mm}$        $h = 330 \text{ mm}$        $tw = 7,5 \text{ mm}$        $tf = 11,5 \text{ mm}$

$A = 6260 \text{ mm}^2$        $M_{pl,Rd} = 210.571.428 \text{ Nmm}$        $V_{pl,Rd} = 465.729 \text{ N}$

$b_{LT,y} = 610.245 \cdot 10^6 \text{ Nmm}^2$ ;     $b_{LT,w} = 2.224.702 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^3$ ;     $W_y \cdot f_y = 221.100 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$

Resistencia de la sección		
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} > 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia de la sección frente a pandeo $M_{Ed} \leq M_{pt,Rd}$		
Determinación coeficiente $\chi$		
$Lky = \beta y \cdot L$	10000	
$Lkz = \beta z \cdot L$	3500	
$\lambda y = Lky / iy$	72,993	
$\lambda z = Lkz / iz$	98,592	
$\lambda y$ (reducida)	0,841	0,9
$\lambda z$ (reducida)	1,136	1,2
$\chi y$ (tabla 4.7)	0,73	
$\chi z$ (tabla 4.7)	0,48	
Determinación coeficiente $\chi_{LT}$		
$M_{LT,v} = b_{LT,v} \cdot (C_1/Lc)$	156222720	
$M_{LT,w} = b_{LT,w} \cdot (C_1/Lc^2)$	113904742,4	
$M_{cr} = \sqrt{M_{LT,v}^2 + M_{LT,w}^2}$	193338637,1	
$\lambda_{LT} = \sqrt{(W_y \cdot f_y) / M_{cr}}$	1,069	1,1
Determinación coeficiente $C_m$	0,8	
Determinación coeficiente $k_y$		
$k_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}}$	1,023	
$k_{y,LT} = 1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{C_{m,LT} - 0,25} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}}; 0,6 + \bar{\lambda}_z$	0,995	
$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$	0,501	Cumple
$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$	0,617	Cumple

Tabla 5.8. Hoja de cálculo de predimensionado de soporte más desfavorable de la nave 20x6. Elaboración propia.

## 5.2. Predimensionado de vigas

En el predimensionado de las vigas sólo se han considerado las acciones verticales. Dado que tanto vigas como soportes se diseñan con el mismo perfil, en el predimensionado de vigas se comprobará el perfil obtenido del predimensionado de soportes, de forma que se asegure su cumplimiento en todas las condiciones pertinentes.

A continuación se presenta el modelo del pórtico y su diagrama de momentos flectores:

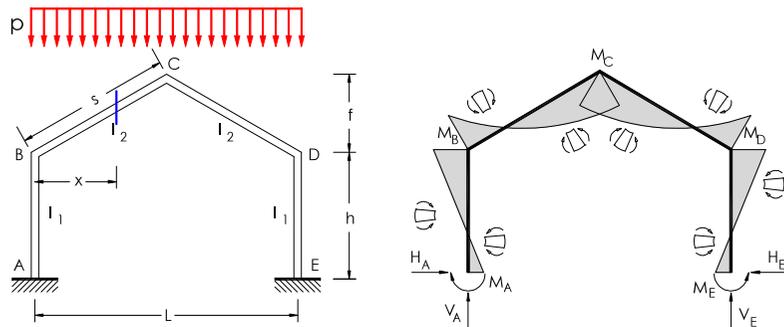


Imagen 5.5. Pórticos simples biempotrados a la misma altura con dintel a dos aguas y carga repartida vertical. Fuente: *Prontuario y herramientas informáticas para cálculo de estructuras*

Las comprobaciones a realizar son: resistencia de la sección, pandeo lateral, abolladura, efectos locales y deformación.

### 5.2.1. Resistencia de la sección.

5.2.1.1. Momento flector:  $M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$

5.2.1.2. Esfuerzo cortante:  $V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$

### 5.2.1.3. Interacción momento flector - Esfuerzo cortante.

Si se cumple la siguiente condición no será necesario considerarlo para el cálculo.

$$V_{Ed} \geq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$$

5.2.1.4. Resistencia frente a axil:  $N_{Ed} \geq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$

### 5.2.2. Pandeo lateral

La condición que se debe cumplir es la siguiente:  $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$

Siendo,  $M_{b,Rd}$  el valor de cálculo de la resistencia frente a pandeo lateral. Se podrá determinar con la siguiente expresión:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot (f_y / \gamma_{M1}) \quad [6.31, \text{CTE DB-SE-A}]$$

#### 5.2.2.1. Obtención coeficiente $\chi_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y \cdot f_y / M_{cr}} \quad [6.34, \text{CTE DB-SE-A}]$$

$$M_{cr} = \sqrt{(M_{LT,V})^2 + (M_{LT,W})^2} \quad [6.35, \text{CTE DB-SE-A}]$$

$$M_{LT,V} = b_{LT,V} \cdot C_1 / L_c \quad [6.36, \text{CTE DB-SE-A}]$$

$$M_{LT,W} = b_{LT,W} \cdot C_1 / L_c^2 \quad [6.37, \text{CTE DB-SE-A}]$$

Para obtener el coeficiente  $C_1$  se utiliza la tabla 5.3. Dado que la barra es empotrada-empotrada, se considera el valor 1,28.

Condiciones de carga y apoyo	Diagrama de momentos flectores	k	C <sub>1</sub>
		1,0 0,5	1,13 0,97
		1,0 0,5	1,28 0,71
		1,0	1,30
		1,0	2,05

Tabla 5.9. Coeficientes C<sub>1</sub>. Fuente: Monfort, 2006

El valor de L<sub>c</sub> es la longitud de pandeo lateral, es decir, la distancia entre apoyos laterales que impidan el pandeo lateral, en nuestro caso viene definida por los puntos de arriostramiento, marcados por las correas y cruces de San Andrés (L<sub>c</sub> = 1250mm).

Una vez obtenidos los valores de las ecuaciones anteriores, de la siguiente tabla se extrae la curva de pandeo a considerar, para poder obtener el valor de χ<sub>LT</sub>:

Elemento	Límites	Curva de pandeo	α <sub>LT</sub>
Perfil laminado con sección en doble T	h/b ≤ 2	a	0,21
	h/b > 2	b	0,34
Elemento armado con sección en doble T	h/b ≤ 2	c	0,49
	h/b > 2	d	0,76
Elementos con otras secciones	-	d	0,76

La esbeltez relativa frente al pandeo lateral se determinará según la relación

Tabla 5.10. Curvas de pandeo lateral. Fuente: CTE DB-SE-A

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Coefficiente (α) de imperfección	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76
≤ 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 <sup>(1)</sup>	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 <sup>(1)</sup>	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 <sup>(1)</sup>	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 <sup>(2)</sup>	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 <sup>(2)</sup>	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

<sup>(1)</sup> esbeltez intolerable en los elementos principales  
<sup>(2)</sup> esbeltez intolerable incluso en elementos de arriostramiento

Tabla 5.11. Coeficientes de pandeo {χ}. Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.3

### 5.2.3. Abolladura.

No es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, en las barras en las que se cumpla la siguiente condición:

$$d / t < 70 \cdot \varepsilon \quad [6.36, \text{CTE DB-SE-A}]$$

### 5.2.4. Efectos locales: cargas concentradas.

Se ha de comprobar la resistencia del alma de la viga frente a cargas puntuales, R<sub>b,Rd</sub>, es igual a la resistencia a pandeo en compresión simple del tramo de alma afectado, considerado como un soporte de alma corto. Viene dada por la expresión:

$$R_{b,Rd} = N_{b,Rd} = \frac{\chi_{min} \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad [\text{CTE DB-SE-A, 6.43}]$$

Para esta comprobación se debe de especificar cuál es la sección resistente al alma, se representa en la imagen 5.7. Esta formada por una anchura de 10 · t<sub>w</sub> · ε a cada lado de la carga puntual.

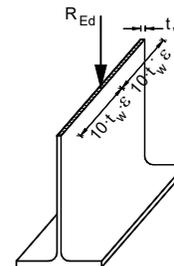


Imagen 5.6. Sección resistente. Fuente: Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión (Guardiola, A)

Las propiedades geométricas de dicha sección son:

$$A = 20 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot t_w; \quad I_{min} = \frac{20 \cdot t_w \cdot \varepsilon (t_w)^3}{12}; \quad i_{min} = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{(t_w)^2}{12}}$$

La longitud de pandeo a considerar es el 80% del canto del alma, es decir, 0,8·d. Siendo : d = h - 2·t<sub>b</sub> - 2·r

La porción de alma a analizar en compresión simple se muestra en la siguiente imagen:

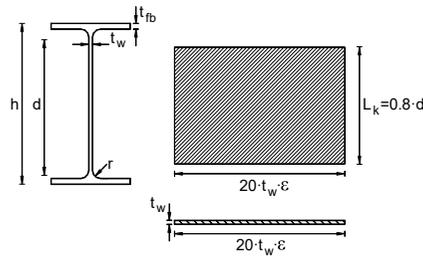


Imagen 5.7. Porción de alma objeto de cálculo. Fuente: *Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión* (Guardiola, A).

A continuación, se define la longitud de pandeo:

$$L_k = 0.8 \cdot (h - t_{fb} - 2 \cdot r)$$

#### 5.2.4.1. Obtención coeficiente $\chi_{min}$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = L_k / i_{min}; \quad \bar{\lambda} = \lambda_{m\acute{a}x} / 86,8$$

A partir de la esbeltez reducida, se obtiene el coeficiente  $\chi_{min}$ , entrando en la siguiente tabla siempre en la curva c.

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
<b>Coeficiente (α) de imperfección</b>	<b>0,13</b>	<b>0,21</b>	<b>0,34</b>	<b>0,49</b>	<b>0,76</b>
≤ 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 <sup>(1)</sup>	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 <sup>(1)</sup>	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 <sup>(1)</sup>	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 <sup>(2)</sup>	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 <sup>(2)</sup>	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

Tabla 5.12. Coeficientes de pandeo ( $\chi$ ). Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.3

En caso de que la resistencia al alma no cumpla la condición  $R_{b,Rd} > R_{Ed}$ , se deberá rigidizar, tal como se muestra en la imagen 5.9, pues aumenta el área, la inercia y el radio de giro de la sección solicitada a compresión simple.

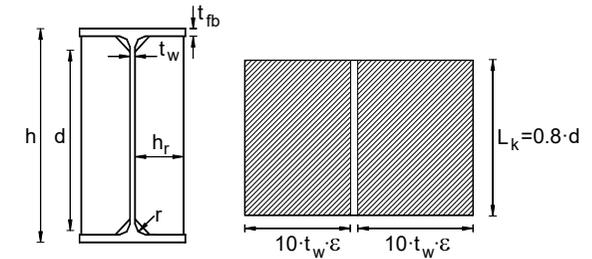
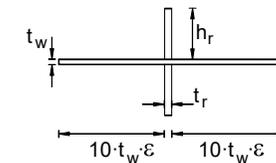


Imagen 5.8. Alma rigidizada frente a las cargas puntuales. Fuente: *Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión* (Guardiola, A).



Dichos rigidizadores deberán tener un canto tal que quepan dentro del ala de la viga, es decir:

$$h_r \leq (b - t_w) / 2$$

Una vez calculadas las dimensiones del rigidizador, es necesario volver a calcular la resistencia del alma frente a cargas puntuales. Por ello se volverá a realizar el procedimiento de cálculo de las propiedades geométricas de la sección cruciforme y el coeficiente de  $\chi_{min}$ .

#### 5.2.5. Comprobación de flecha.

$$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot (q \cdot L^4 / EI); \quad \text{Limitación de flecha } L/300$$

Siendo L, el doble de la distancia entre los dos puntos a calcular. En este caso, es igual a la separación entre pórticos (4m, 5m, 6m).

En las siguientes tablas se recogen los tres predimensionados de las tres longitudes de correas que se encuentran en el presente trabajo.

## 5.2.6. Predimensionado de viga más desfavorable CASO 1.

Geometría del pórtico: Luz 15 metros y longitud de correas de 6 metros

Solicitaciones:

$$M_{Ed} = 45.916.583 \text{ Nmm}$$

$$V_{Ed} = 16.000 \text{ N}$$

$$N_{Ed} = 26.250 \text{ N}$$

A continuación se procede a comprobar el perfil obtenido en el predimensionado de soportes. De esta forma, se observa si es adecuado para las vigas también o si en caso contrario se debe de aumentar el perfil en ambos elementos estructurales.

Características IPE 240 (Clase de sección 2):

$$b = 120\text{mm} \quad h = 240\text{mm} \quad t_w = 6,8\text{mm} \quad t_f = 9,8\text{mm}$$

$$A = 3910\text{mm}^2 \quad M_{pl,Rd} = 95.857.142 \text{ Nmm} \quad V_{pl,Rd} = 288.812 \text{ N}$$

$$b_{LT,v} = 247.810 \cdot 10^6 \text{ Nmm}^2; \quad b_{LT,w} = 580.441 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^3; \quad W_y \cdot f_y = 100,650 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

Comprobaciones ELU		
<b>Resistencia de la sección</b>		
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} > 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$	Cumple
<b>Resistencia de la sección frente a pandeo lateral</b> $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$		
$M_{LT,v} = b_{LT,v} \cdot (C_1/Lc)$	253757440	
$M_{LT,w} = b_{LT,w} \cdot (C_1/Lc^2)$	475497267,2	
$M_{cr} = \sqrt{M_{LT,v}^2 + M_{LT,w}^2}$	538971696,4	
$\lambda_{LT} = \sqrt{(W_y \cdot f_y) / M_{cr}}$	0,432139445	0,5
$\chi_{LT}$	0,92	
$M_{b,Rd} = (\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y) / 1,05$	88.188.571,43	Cumple
<b>Abolladura</b>		
$d/t_w < 64,70$	28	Cumple
<b>Efectos locales: Cargas Concentradas</b> $V_{Ed} \leq N_{b,Rd}$		
$A = 20 \cdot t_w \cdot \epsilon \cdot t_w$	244,8	
$I_{min} = \frac{20 \cdot t_w \cdot \epsilon \cdot (t_w)^3}{12}$	3207,2064	
$i_{min} = \sqrt{(I/A)}$	3,619576402	
$\chi_{min}$	0,84	
$N_{b,Rd} = \chi_{min} \cdot A \cdot (f_y / \gamma_{M1})$	53856,00	Cumple
<b>Comprobaciones ELS</b>		
<b>Flecha</b>		
$f_{m\acute{a}x} = \beta (q \cdot L^4 / EI)$	41,960269	mm
<b>Limitaciones</b>		
L/300	50	Cumple

Tabla 5.13. Hoja de cálculo del predimensionado de viga más desfavorable CASO 1. Elaboración propia

## 5.2.7. Predimensionado de viga más desfavorable CASO 2.

Geometría del pórtico: Luz 20 metros y longitud de correas de 6 metros

Solicitaciones:

$$M_{Ed} = 76.366.011,94 \text{ Nmm}$$

$$V_{Ed} = 27.481,76 \text{ N}$$

$$N_{Ed} = 35.000 \text{ N}$$

A continuación se procede a comprobar el perfil obtenido en el predimensionado de soportes. De esta forma, se observa si es adecuado para las vigas también o si en caso contrario se debe de aumentar el perfil en ambos elementos estructurales.

Características IPE 330 (Clase de sección 2):

$$b = 160\text{mm} \quad h = 330\text{mm} \quad t_w = 7,5\text{mm} \quad t_f = 11,5\text{mm}$$

$$A = 6260\text{mm}^2 \quad M_{pl,Rd} = 210.571.428 \text{ Nmm} \quad V_{pl,Rd} = 445.729 \text{ N}$$

$$b_{LT,v} = 610.245 \cdot 10^6 \text{ Nmm}^2; \quad b_{LT,w} = 2.224.702 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^3; \quad W_y \cdot f_y = 221.100 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

Comprobaciones ELU		
<b>Resistencia de la sección</b>		
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} > 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$	Cumple
<b>Resistencia de la sección frente a pandeo lateral</b> $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$		
$M_{LT,v} = b_{LT,v} \cdot (C_1/Lc)$	624890880	
$M_{LT,w} = b_{LT,w} \cdot (C_1/Lc^2)$	1822475878	
$M_{cr} = \sqrt{M_{LT,v}^2 + M_{LT,w}^2}$	1926630982	
$\lambda_{LT} = \sqrt{(W_y \cdot f_y) / M_{cr}}$	0,338762322	0,4
$\chi_{LT}$	0,95	
$M_{b,Rd} = (\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y) / 1,05$	200.042.857,14	Cumple
<b>Abolladura</b>		
$d/t_w < 64,70$	36,13333333	Cumple
<b>Efectos locales: Cargas Concentradas</b> $V_{Ed} \leq N_{b,Rd}$		
$A = 20 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot t_w$	270	
$I_{min} = \frac{20 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot (t_w)^3}{12}$	4746,09375	
$i_{min} = \sqrt{I/A}$	4,192627458	
$\chi_{min}$	0,79	
$N_{b,Rd} = \chi_{min} \cdot A \cdot \left( \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \right)$	55864,28571	Cumple
<b>Comprobaciones ELS</b>		
<b>Flecha</b>		
$f_{m\acute{a}x} = \beta (q \cdot L^4 / EI)$	60,53268765	mm
<b>Limitaciones</b>		
$L/300$	66,66666667	Cumple

Tabla 5.14. Hoja de cálculo del predimensionado de viga más desfavorable CASO 2. Elaboración propia

### 5.3. Predimensionado de correas.

En el predimensionado de las correas sólo se han considerado las acciones verticales. Se modeliza de forma biarticulada para quedar siempre del lado de la seguridad, pues cuando la nave este compuesta por un número par de pórticos, una de ellas será biarticulada.

A continuación se presenta el modelo de correa y su diagrama de momentos flectores.

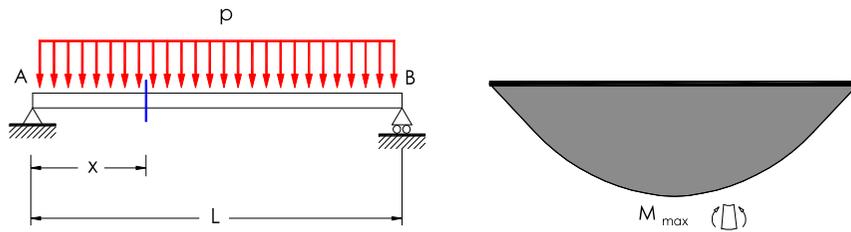


Imagen 5.9. Correa biarticulada con carga repartida en toda la barra. Fuente: *Prontuario y herramientas informáticas para cálculo de estructuras*

Una vez obtenidas las solicitaciones, se procede a las comprobaciones pertinentes para determinar el perfil de las correas. Éstas comprobaciones son: resistencia de la sección, pandeo lateral, abolladura, efectos locales y deformación.

#### 5.3.1. Resistencia de la sección.

5.3.1.1. Momento flector:  $M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$

5.3.1.2. Esfuerzo cortante:  $V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$

#### 5.3.1.3. Interacción momento flector - Esfuerzo cortante.

Si se cumple la siguiente condición no será necesario considerarlo para el cálculo.

$$V_{Ed} \geq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$$

5.3.1.4. Resistencia frente a axil:  $N_{Ed} \geq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$

#### 5.3.2. Pandeo lateral

La condición que se debe cumplir es la siguiente:  $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$

Siendo  $M_{b,Rd}$  el valor de cálculo de la resistencia frente a pandeo lateral, se podrá determinar con la siguiente expresión:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot (f_y / \gamma_{M1}) \quad [6.31, \text{CTE DB-SE-A}]$$

#### 5.3.2.1. Obtención coeficiente $\chi_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y \cdot f_y / M_{cr}} \quad [6.34, \text{CTE DB-SE-A}]$$

$$M_{cr} = \sqrt{(M_{LT,V})^2 + (M_{LT,W})^2} \quad [6.35, \text{CTE DB-SE-A}]$$

$$M_{LT,V} = b_{LT,V} \cdot C_1 / L_c \quad [6.36, \text{CTE DB-SE-A}]$$

$$M_{LT,W} = b_{LT,W} \cdot C_1 / L_c^2 \quad [6.37, \text{CTE DB-SE-A}]$$

Para obtener el coeficiente  $C_1$  se utiliza la tabla 5.3. Dado que la barra es empotrada-articulada, se considera el valor 1,13 para quedar del lado de la seguridad.

Condiciones de carga y apoyo	Diagrama de momentos flectores	k	C <sub>1</sub>
		1,0 0,5	1,13 0,97
		1,0 0,5	1,28 0,71
		1,0	1,30
		1,0	2,05

Tabla 5.15. Coeficientes C<sub>1</sub>. Fuente: Monfort, 2006

El valor de L<sub>c</sub> es la longitud de pandeo lateral, es decir, la distancia entre apoyos laterales que impidan el pandeo lateral, en nuestro caso, la separación entre pórticos (4m, 5m, 6m).

Una vez obtenidos los valores de las ecuaciones anteriores, de la siguiente tabla se extrae la curva de pandeo a considerar, para poder obtener el valor de χ<sub>LT</sub>:

Elemento	Límites	Curva de pandeo	α <sub>LT</sub>
Perfil laminado con sección en doble T	h/b ≤ 2	a	0,21
	h/b > 2	b	0,34
Elemento armado con sección en doble T	h/b ≤ 2	c	0,49
	h/b > 2	d	0,76
Elementos con otras secciones	-	d	0,76

La esbeltez relativa frente al pandeo lateral se determinará según la relación

Tabla 5.16. Curvas de pandeo lateral. Fuente: CTE DB-SE-A

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Coefficiente (α) de imperfección	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76
≤ 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 <sup>(1)</sup>	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 <sup>(1)</sup>	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 <sup>(1)</sup>	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 <sup>(2)</sup>	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 <sup>(2)</sup>	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

<sup>(1)</sup> esbeltez intolerable en los elementos principales  
<sup>(2)</sup> esbeltez intolerable incluso en elementos de arriostamiento

Tabla 5.17. Coeficientes de pandeo {χ}. Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.3

### 5.3.3. Abolladura.

No es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, en las barras en las que se cumpla la siguiente condición:

$$d / t < 70 \cdot \varepsilon \quad [6.36, \text{CTE DB-SE-A}]$$

### 5.3.4. Efectos locales: cargas concentradas.

Se ha de comprobar la resistencia del alma de la viga frente a cargas puntuales, R<sub>b,Rd</sub>, es igual a la resistencia a pandeo en compresión simple del tramo de alma afectado, considerado como un soporte de alma corto. Viene dada por la expresión:

$$R_{b,Rd} = N_{b,Rd} = \frac{\chi_{min} \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad [\text{CTE DB-SE-A, 6.43}]$$

Para esta comprobación se debe de especificar cual es la sección resistente al alma, se representa en la imagen 5.7. Esta formada por una anchura de 10 · t<sub>w</sub> · ε a cada lado de la carga puntual.

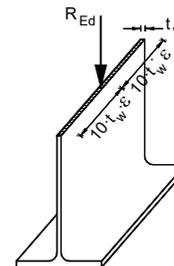


Imagen 5.10. Sección resistente. Fuente: Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión (Guardiola, A)

Las propiedades geométricas de dicha sección son:

$$A = 20 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot t_w; \quad I_{min} = \frac{20 \cdot t_w \cdot \varepsilon (t_w)^3}{12}; \quad i_{min} = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{(t_w)^2}{12}}$$

La longitud de pandeo a considerar es el 80% del canto del alma, es decir, 0,8-d. Siendo : d = h - 2 · t<sub>fb</sub> - 2 · r

La porción de alma a analizar en compresión simple se muestra en la siguiente imagen:

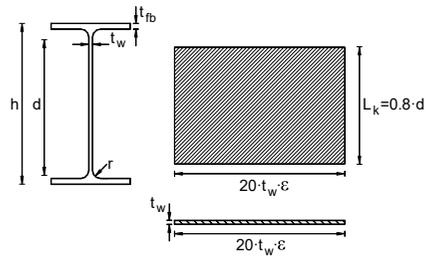


Imagen 5.11. Porción de alma objeto de cálculo. Fuente: *Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión* (Guardiola, A).

A continuación, se define la longitud de pandeo:

$$L_k = 0.8 \cdot (h - t_{fb} - 2 \cdot r)$$

### 5.3.4.1. Obtención coeficiente $\chi_{min}$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = L_k / i_{min}; \quad \bar{\lambda} = \lambda_{m\acute{a}x} / 86,8$$

A partir de la esbeltez reducida, se obtiene el coeficiente  $\chi_{min}$ , entrando en la siguiente tabla siempre en la curva c.

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
<b>Coeficiente (α) de imperfección</b>	<b>0,13</b>	<b>0,21</b>	<b>0,34</b>	<b>0,49</b>	<b>0,76</b>
≤ 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 <sup>(1)</sup>	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 <sup>(1)</sup>	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 <sup>(1)</sup>	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 <sup>(2)</sup>	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 <sup>(2)</sup>	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

Tabla 5.18. Coeficientes de pandeo ( $\chi$ ). Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.3

En caso de que la resistencia al alma no cumpla la condición  $R_{b,Rd} > R_{Ed}$ , se deberá rigidizar, tal como se muestra en la imagen 5.9, pues aumenta el área, la inercia y el radio de giro de la sección solicitada a compresión simple.

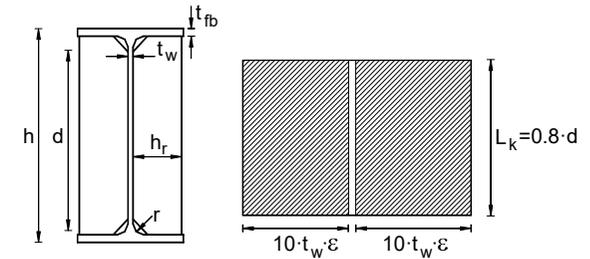
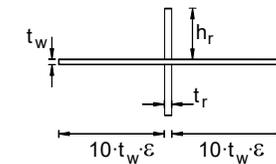


Imagen 5.12. Alma rigidizada frente a las cargas puntuales. Fuente: *Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión* (Guardiola, A).



Dichos rigidizadores deberán tener un canto tal que quepan dentro del ala de la viga, es decir:

$$h_r \leq (b - t_w) / 2$$

Una vez calculadas las dimensiones del rigidizador, es necesario volver a calcular la resistencia del alma frente a cargas puntuales. Por ello se volverá a realizar el procedimiento de cálculo de las propiedades geométricas de la sección cruciforme y el coeficiente de  $\chi_{min}$ .

### 5.3.5. Comprobación de flecha.

$$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot (q \cdot L^4 / EI); \quad \text{Limitación de flecha } L/300$$

Siendo L el doble de la distancia entre los dos puntos a calcular. En este caso, es igual a la separación entre pórticos (4m, 5m, 6m).

En las siguientes tablas se recogen los tres predimensionados de las tres longitudes de correas que se encuentran en el presente trabajo.

5.3.6. Correa de luz 4m.

Solicitaciones:  $M_{Ed} = 2.000.000 \text{ Nmm}$   
 $V_{Ed} = 5.000 \text{ N}$

Para la elección del perfil se siguen las condiciones de resistencia y deformación una vez obtenido un perfil, se procede a su comprobación:

Resistencia:  $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$

Deformación (flecha):  $f_{m\acute{a}x} = (5 \cdot q \cdot L^4) / (384 \cdot E \cdot I_y) = L/300$

$I_y \geq 1190773,884 \text{ mm}^4$

Con esto, el primer perfil que cumple es el IPE 100. Sin embargo, una vez comprobado, se observa que no cumple, por lo que se aumenta un perfil más. Podemos observar la comprobación del perfil IPE 120 en la tabla 5.12.

Características IPE 120 (Clase de sección 1):

$b = 64\text{mm}$        $h = 120\text{mm}$        $tw = 4,4\text{mm}$        $tf = 6,3\text{mm}$

$M_{pl,Rd} = 15.923.809 \text{ Nmm}$

$V_{pl,Rd} = 95.262 \text{ N}$

$N_{pl,Rd} = 345.714 \text{ N}$

$b_{LT,v} = 28.445 \cdot 10^6 \text{ Nmm}^2$

$b_{LT,w} = 27.076 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^3$

$W_y \cdot f_y = 16,720 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

Comprobaciones ELU		
<b>Resistencia de la sección</b>		
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} > 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$	Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$	Cumple
<b>Resistencia de la sección frente a pandeo lateral</b> $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$		
$M_{LT,v} = b_{LT,v} \cdot (C_1/Lc)$	8035712,5	
$M_{LT,w} = b_{LT,w} \cdot (C_1/Lc^2)$	1912242,5	
$M_{cr} = \sqrt{M_{LT,v}^2 + M_{LT,w}^2}$	8260105,735	
$\lambda_{LT} = \sqrt{(W_y \cdot f_y) / M_{cr}}$	1,422739317	1,5
$M_{b,Rd} = (\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y) / 1,05$	5891809,524	Cumple
<b>Abolladura</b>		
$d/tw < 64,70$	18,42105263	Cumple
<b>Efectos locales: Cargas Concentradas</b> $V_{Ed} \leq N_{b,Rd}$		
$A = 20 \cdot tw \cdot \epsilon \cdot tw$	158,4	
$I_{min} = \frac{20 \cdot t_w \cdot \epsilon \cdot (t_w)^3}{12}$	562,2144	
$i_{min} = \sqrt{(I/A)}$	1,883967445	
$\chi_{min}$	0,84	
$N_{b,Rd} = \chi_{min} \cdot A \cdot (f_y / \gamma_{M1})$	34.848,00	Cumple
<b>Comprobaciones ELS</b>		
<b>Flecha</b>		
$f_{m\acute{a}x} = \beta (q \cdot L^4 / EI)$	3,494060098	mm
<b>Limitaciones</b>		
L/300	13,33333333	Cumple

Tabla 5.19. Hoja de cálculo de predimensionado de correa de luz 4m. Elaboración propia

## 5.3.7. Correa de luz 5m.

Solicitaciones:  $M_{Ed} = 3.125.000 \text{ Nmm}$   
 $V_{Ed} = 6.250 \text{ N}$

Para la elección del perfil se siguen las condiciones de resistencia y deformación una vez obtenido un perfil, se procede a su comprobación:

Resistencia:  $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$

Deformación (flecha):  $f_{m\acute{a}x.} = (5 \cdot q \cdot L^4) / 384 \cdot E \cdot I_y = L/300$

$I_y \geq 2.325.148,81 \text{ mm}^4$

Con esto, el primer perfil que cumple es el IPE 120. Podemos observar la comprobación del perfil en la tabla 5.13.

Características IPE 120 (Clase de sección 1):

$b = 64\text{mm}$        $h = 120\text{mm}$        $tw = 4,4\text{mm}$        $tf = 6,3\text{mm}$

$M_{pL,Rd} = 15.923.809 \text{ Nmm}$

$V_{pL,Rd} = 95.262 \text{ N}$

$N_{pL,Rd} = 345.714 \text{ N}$

$b_{LT,v} = 28.445 \cdot 10^6 \text{ Nmm}^2$

$b_{LT,w} = 27.076 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^3$

$W_y \cdot f_y = 16,720 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

Comprobaciones ELU		
<b>Resistencia de la sección</b>		
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed} \leq M_{pL,Rd}$	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pL,Rd}$	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} > 0,5 \cdot V_{pL,Rd}$	Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$	Cumple
<b>Resistencia de la sección frente a pandeo lateral</b> $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$		
$M_{LT,v} = b_{LT,v} \cdot (C_1/Lc)$	8035712,5	
$M_{LT,w} = b_{LT,w} \cdot (C_1/Lc^2)$	1912242,5	
$M_{cr} = \sqrt{M_{LT,v}^2 + M_{LT,w}^2}$	8260105,735	
$\lambda_{LT} = \sqrt{(W_y \cdot f_y) / M_{cr}}$	1,422739317	1,5
$M_{b,Rd} = (\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y) / 1,05$	5891809,524	Cumple
<b>Abolladura</b>		
$d/tw < 64,70$	18,42105263	Cumple
<b>Efectos locales: Cargas Concentradas</b> $V_{Ed} \leq N_{b,Rd}$		
$A = 20 \cdot tw \cdot \varepsilon \cdot tw$	158,4	
$I_{min} = \frac{20 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot (t_w)^3}{12}$	562,2144	
$i_{min} = \sqrt{(I/A)}$	1,883967445	
$\chi_{min}$	0,84	
$N_{b,Rd} = \chi_{min} \cdot A \cdot (f_y / \gamma_{M1})$	34.848,00	Cumple
<b>Comprobaciones ELS</b>		
<b>Flecha</b>		
$f_{m\acute{a}x} = \beta (q \cdot L^4 / EI)$	8,530420161	mm
<b>Limitaciones</b>		
$L/300$	13,33333333	Cumple

Tabla 5.20. Hoja de cálculo de predimensionado de correa de luz 5m. Elaboración propia

## 5.3.8. Correa de luz 6m.

Solicitaciones:  $M_{Ed} = 5.500.000 \text{ Nmm}$   
 $V_{Ed} = 7.500 \text{ N}$

Para la elección del perfil se siguen las condiciones de resistencia y deformación una vez obtenido un perfil, se procede a su comprobación:

Resistencia:  $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$

Deformación (flecha):  $f_{m\acute{a}x} = (5 \cdot q \cdot L^4) / 384 \cdot E \cdot I_y = L/300$

$I_y \geq 4.017.857,143 \text{ mm}^4$

Con esto, el primer perfil que cumple es el IPE 140. Podemos observar la comprobación del perfil en la tabla 5.13.

Características IPE 140 (Clase de sección 1):

$b = 73\text{mm}$        $h = 140\text{mm}$        $tw = 4,7\text{mm}$        $tf = 6,9\text{mm}$

$M_{pL,Rd} = 23.152.380 \text{ Nmm}$

$V_{pL,Rd} = 115.222 \text{ N}$

$N_{pL,Rd} = 429.523 \text{ N}$

$b_{LT,v} = 49.974 \cdot 10^6 \text{ Nmm}^2$

$b_{LT,w} = 51.333 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^3$

$W_y \cdot f_y = 24,310 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

Comprobaciones ELU		
<b>Resistencia de la sección</b>		
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed} \leq M_{pL,Rd}$	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pL,Rd}$	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} > 0,5 \cdot V_{pL,Rd}$	Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$	Cumple
<b>Resistencia de la sección frente a pandeo lateral</b> $M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$		
$M_{LT,v} = b_{LT,v} \cdot (C_1/Lc)$	12140155	
$M_{LT,w} = b_{LT,w} \cdot (C_1/Lc^2)$	3625393,125	
$M_{cr} = \sqrt{M_{LT,v}^2 + M_{LT,w}^2}$	12669918,66	
$\lambda_{LT} = \sqrt{W_y \cdot f_y} / M_{cr}$	1,385177939	1,4
$M_{b,Rd} = (\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y) / 1,05$	9724000	Cumple
<b>Abolladura</b>		
$d/tw < 64,70$	18,42105263	Cumple
<b>Efectos locales: Cargas Concentradas</b> $V_{Ed} \leq N_{b,Rd}$		
$A = 20 \cdot tw \cdot \epsilon \cdot tw$	169,2	
$I_{min} = \frac{20 \cdot tw \cdot \epsilon \cdot (tw)^3}{12}$	731,95215	
$i_{min} = \sqrt{I/A}$	2,079893827	
$\chi_{min}$	0,9	
$N_{b,Rd} = \chi_{min} \cdot A \cdot \left( \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \right)$	39.882,86	Cumple
<b>Comprobaciones ELS</b>		
<b>Flecha</b>		
$f_{m\acute{a}x} = \beta (q \cdot L^4 / EI)$	10,3974122	mm
<b>Limitaciones</b>		
$L/300$	13,33333333	Cumple

Tabla 5.21. Hoja de cálculo de predimensionado de correa de luz 6m. Elaboración propia.

## 6. DIMENSIONADO DE LA ESTRUCTURA (CON *ARCHITRAVE*<sup>®</sup>)

Una vez realizado el predimensionado, se procede al dibujo de la estructura mediante programa informático de dibujo, *AutoCAD*®. De esta forma, con la ayuda del programa de cálculo *Architrave*® (Pérez-García, et al., 2015) se obtienen las solicitaciones y deformaciones de los elementos estructurales y se procede a la comprobación manual de éstos, buscando siempre ajustar al máximo el tamaño y peso de dichos perfiles.

### 6.1. Modelización de la estructura

La modelización de cada modulo estructural se ha realizado mediante el programa *AutoCAD*® y la aplicación del programa de dibujo de *Architrave*®, se dibujan los elementos estructurales y las cargas que se han de aplicar sobre la estructura.

Los elementos estructurales se modelizan como barras, dibujándolas como líneas, dando a cada línea, el perfil metálico pertinente calculado en su predimensionado.

Las cargas se dividen en dos tipos. El primero consiste en aplicar la carga como área de reparto (similar a un 3Dcara). De esta forma se han aplicado las hipótesis de peso propio, uso y nieve. El segundo, se trata de aplicar de forma perpendicular al ángulo de las co-reas, las fuerzas de viento a modo de cargas sobre barras lineales.

Por último, en el extremo de los pilares se coloca un empotramiento.

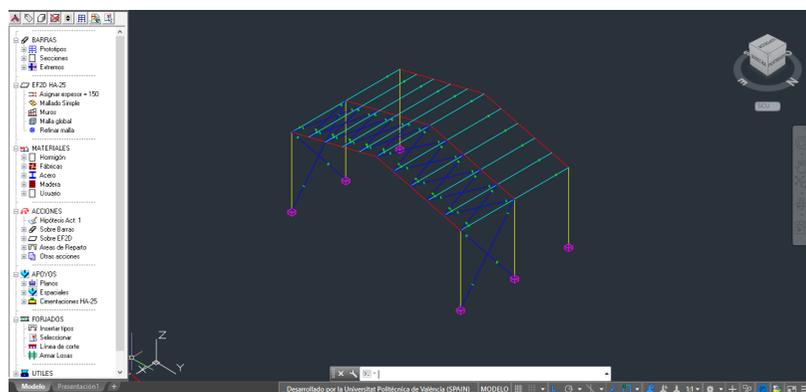


Imagen 6.1. Modelado estructura. Fuente: Captura de Pantalla de *AutoCAD*® y la aplicación de dibujo de *Architrave*®

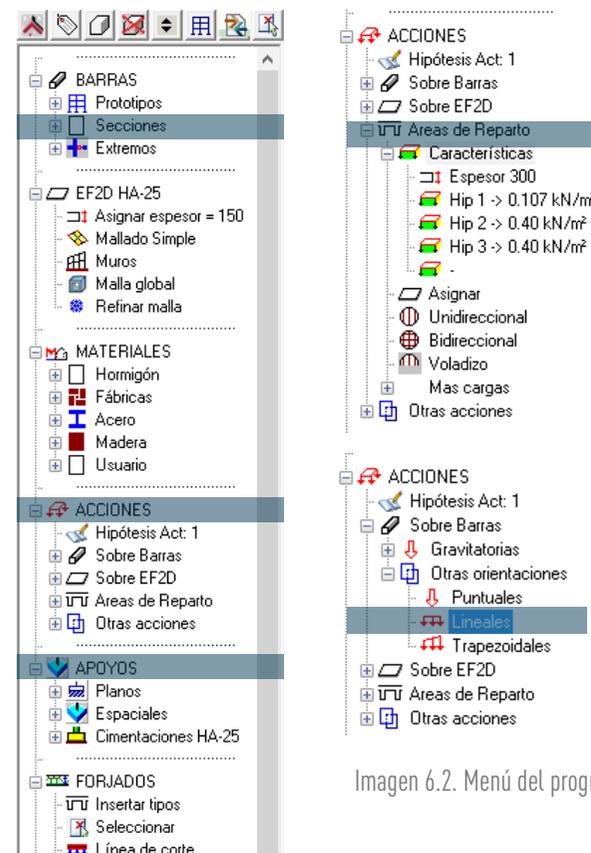


Imagen 6.2. Menú del programa de modelo de *Architrave*®.

Fuente: *Architrave*®

Imagen 6.3. Menú del programa de modelo de *Architrave*®. Fuente: *Architrave*®

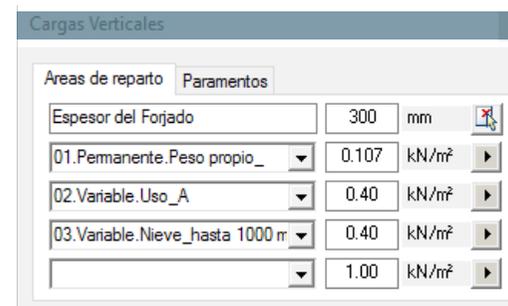


Imagen 6.4. Menú del programa de modelo de *Architrave*® (desplegable de áreas de reparto).

Fuente: *Architrave*®

## 6.2. Proceso de dimensionado de elementos estructurales.

### 6.2.1. Dimensionado de soportes

Para la comprobación de los soportes se sigue el mismo proceso que se ha explicado en el predimensionado. Se ha de comprobar la resistencia de la sección y el pandeo. En este caso, buscando más precisión, se ha calculado los coeficientes de pandeo con la ayuda de la tabla 6.5 - Coeficiente de rigidez eficaz para vigas en comportamiento elástico (CTE DB-SE-A). A continuación, se recogen los cálculos correspondientes al cálculo de dichos coeficientes.

Cálculo de $\beta$ de forma analítica (Figura 4.18)	
$\eta_1 = 0,1$	Lo consideramos 0,1 dado que se trata del coeficiente de distribución inferior del soporte, por lo que al estar cimentado se encuentra empotrado.
$\eta_2 = \frac{\frac{EI}{L \text{ soporte}}}{\frac{EI}{L \text{ soporte}} + L \text{ viga}}$	

Tabla 6.1. Cálculo de coeficientes de distribución. Elaboración propia.

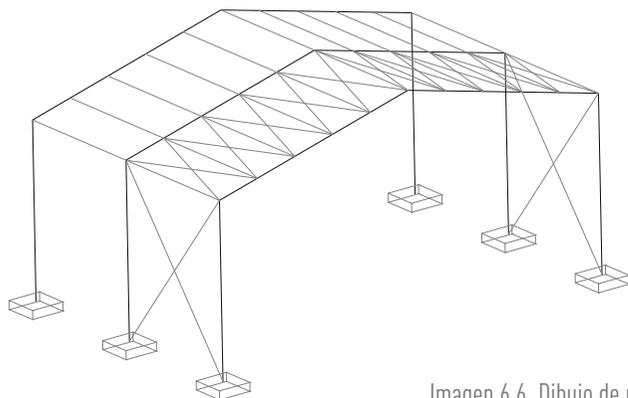


Imagen 6.6. Dibujo de pórtico. Elaboración propia

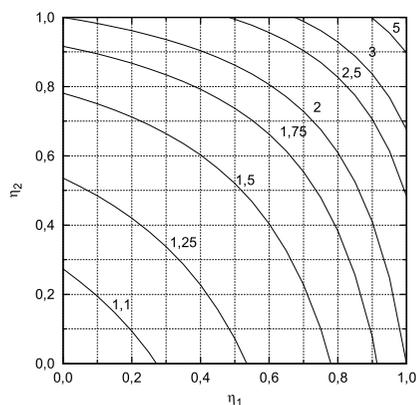


Imagen 6.5. Coeficientes de longitud de pandeo a longitud de barra. Fuente: CTE DB-SE-A

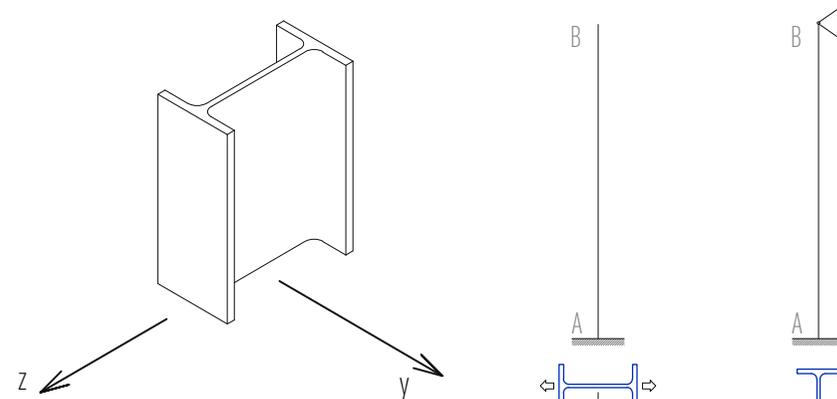


Imagen 6.7. Orientación perfil IPE. Elaboración propia.

Imagen 6.8. Orientación y modelado del soporte. Elaboración propia

Nave 12,5		
$\eta_1 = 0,1$	Figura 4.18	
$\eta_2 = 0,437$	$\beta_y = 0,7$	$\beta_z = 1,25$

Nave 15		
$\eta_1 = 0,1$	Figura 4.18	
$\eta_2 = 0,393$	$\beta_y = 0,7$	$\beta_z = 1,25$

Nave 17,5		
$\eta_1 = 0,1$	Figura 4.18	
$\eta_2 = 0,357$	$\beta_y = 0,7$	$\beta_z = 1,25$

Nave 20		
$\eta_1 = 0,1$	Figura 4.18	
$\eta_2 = 0,327$	$\beta_y = 0,7$	$\beta_z = 1,25$

Tabla 6.2. Hojas de cálculo de coeficientes  $\beta$ . Elaboración propia

### 6.2.2. Dimensionado de vigas

El cálculo de vigas se ha realizado manualmente de forma íntegra, para garantizar que tanto la comprobación de pandeo lateral, como la de deformaciones verticales se hace de acuerdo con lo establecido en el CTE DB-SE-A. Las comprobaciones realizadas son:

- Resistencia de la sección
- Pandeo lateral
- Abolladura
- Cargas concentradas
- Flecha.

### 6.2.3. Dimensionado de correas

Por la misma razón que ocurre en las vigas, las correas se dimensionan manualmente. Las comprobaciones a realizar son:

- Resistencia de la sección (teniendo en cuenta que presentan flexión esviada)
- Pandeo lateral
- Abolladura
- Cargas concentradas
- Flecha

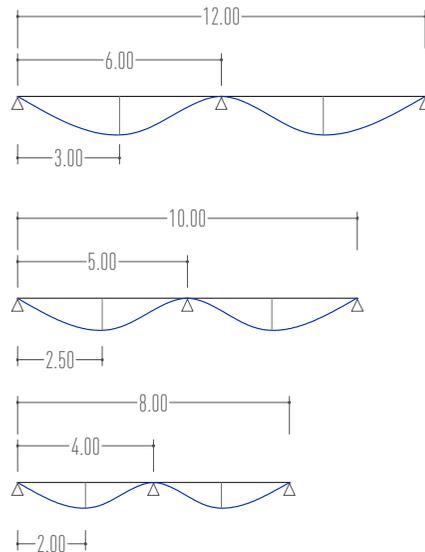


Imagen 6.9. Longitudes de correas, modelado y deformada. Elaboración propia.

### 6.2.4. Dimensionado de cruces de San Andrés

Una vez dimensionada toda la estructura y obtenidos los perfiles finales, se procede a comprobar el desplazamiento transversal de los pórticos. Se realiza una estructura arriostrada (con cruces de San Andrés) y otra no arriostrada (sin cruces de San Andrés que limiten el desplazamiento de las cabezas de soportes) y se obtienen sus desplazamientos con la ayuda del programa de cálculo. Para considerar que el arriostamiento es eficaz, el desplazamiento de la estructura arriostrada tiene que verse reducida en un 80% respecto de la estructura sin arriostrar, tal y como se establece en el CTE DB-SE-A, apartado 5.3.5.

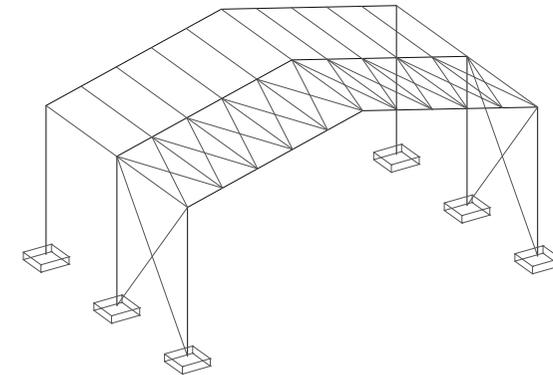


Imagen 6.10. Estructura arriostrada. Elaboración propia

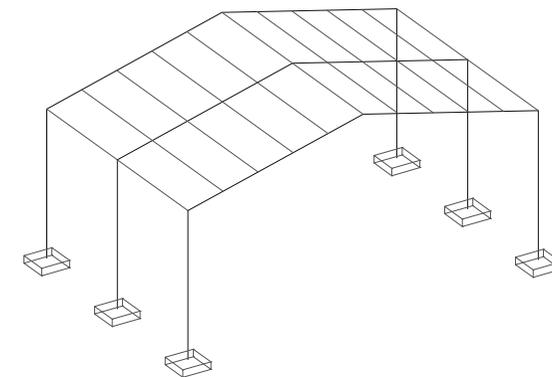


Imagen 6.11. Estructura no-arriostrada. Elaboración propia

### 6.3. Dimensionados

#### 6.3.1. Pórtico 12,5x4.

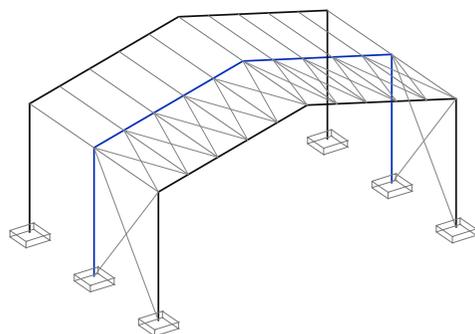


Imagen 6.12. Dibujo de pórtico 12,5x4. Elaboración propia.

Correas					
Solicitaciones:					
M <sub>Ed,y</sub>	3,538	kNm	M <sub>Ed,z</sub>	0,739	kNm
V <sub>Ed</sub>	3,462	kN			
N <sub>Ed</sub>	1,636	kN			
IPE 120					
Comprobaciones:					
Resistencia de la sección					
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$		0,72	Cumple	
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		3,462 < 95,262	Cumple	
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		3,462 < 47,631	Cumple	
Pandeo lateral					
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		3,538 < 6,369	Cumple	
Abolladura					
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la	$d/tw < 70 \cdot \epsilon$		14,82 < 64,70	Cumple	
Cargas concentradas					
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		3,462 < 34,406	Cumple	
Flecha					
Limitación L/300, siendo L=4m	$f_{máx} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,0096 < 0,013	Cumple	

Cruces de San Andrés			
L80.12			
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,124	m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%
Desplazamiento estructura arriostrada	0,0004	m	

Soportes				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed</sub>	60,621	kNm		
V <sub>Ed</sub>	24,94	kN		
N <sub>Ed</sub>	38,046	kN		
IPE 240				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,81	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		24,94 < 288,812	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		24,94 < 144,406	Cumple
Pandeo				
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,5	Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,98	Cumple

Vigas					
Solicitaciones:					
M <sub>Ed</sub>	60,621	kNm			
V <sub>Ed</sub>	30,591	kN			
N <sub>Ed</sub>	28,551	kN			
IPE 270					
Comprobaciones:					
Resistencia de la sección					
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1$		0,62	Cumple	
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		30,591 < 334,175	Cumple	
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		30,591 < 167,0875	Cumple	
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$		28,551 < 289,40	Cumple	
Pandeo lateral					
$M_{Ed} < M_{b,Rd}$	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		60,621 < 119,156	Cumple	
Abolladura					
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la	abolladura.		$d/tw < 70 \cdot \epsilon$	21,52 < 64,70	Cumple
Cargas concentradas					
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		30,591 < 51,609	Cumple	
Flecha					
Limitación L/300, siendo L=12,5m	$f_{máx} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,02482 < 0,04166	Cumple	

Tabla 6.3. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 12,5x4. Elaboración propia.

6.3.2. Pórtico 12,5x5.

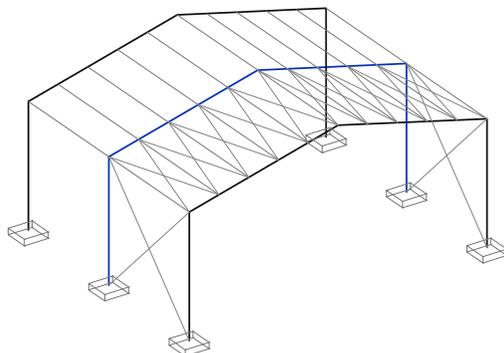


Imagen 6.13. Dibujo de pórtico 12,5x5. Elaboración propia.

Correas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed,y</sub>	4,02	kNm	M <sub>Ed,z</sub> 1,14 kNm
V <sub>Ed</sub>	4,385	kN	
N <sub>Ed</sub>	1,636	kN	
IPE 120			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$		0,57 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		4,38 < 95,262 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		4,38 < 47,63 Cumple
Pandeo lateral			
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot (f_{yd}/\gamma_{M1})$		4,024 < 5,254 Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura. $d/tw < 70 \cdot \epsilon$ 14,82 < 64,70 Cumple			
Cargas concentradas			
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		4,385 < 34,406 Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=5m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,0119 < 0,0166 Cumple
Cruces de San Andrés			
L80.8			
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,0984 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%	
Desplazamiento estructura arriostrada	0,00033 m		

Soportes			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	82,617	kNm	
V <sub>Ed</sub>	33,55	kN	
N <sub>Ed</sub>	60,621	kN	
IPE 270			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,85 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		33,55 < 334,175 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		33,55 < 166,58 Cumple
Pandeo			
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,52 Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,946 Cumple

Vigas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	82,617	kNm	
V <sub>Ed</sub>	41,07	kN	
N <sub>Ed</sub>	38,65	kN	
IPE 300			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1$		0,65 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		41,07 < 388,61 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		41,07 < 194,305 Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_y \cdot f_{yd}$		38,65 < 336,547 Cumple
Pandeo lateral			
$M_{Ed} < M_{b,Rd}$	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot (f_{yd}/\gamma_{M1})$		82,6 < 156,252 Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura. $d/tw < 70 \cdot \epsilon$ 23,23 < 64,70 Cumple			
Cargas concentradas			
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		41,07 < 67,190 Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=12,5m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,02373 < 0,04166 Cumple

Tabla 6.4. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 12,5x5. Elaboración propia.

6.3.3. Pórtico 12,5x6.

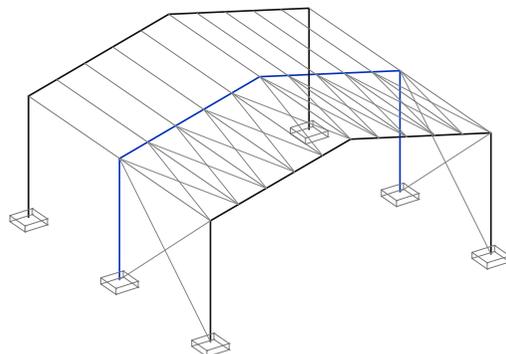


Imagen 6.14. Dibujo de pórtico 12,5x6. Elaboración propia.

Correas				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed,y</sub>	5,865	kNm	M <sub>Ed,z</sub>	1,68 kNm
V <sub>Ed</sub>	5,39	kN		
N <sub>Ed</sub>	1,763	kN		
IPE 140				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$		0,58	Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		5,39 < 115,222	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		5,39 < 57,61	Cumple
Pandeo lateral				
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot (f_{yd}/\gamma_{M1})$		5,869 < 6,714	Cumple
Abolladura				
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.		$d/tw < 70 \cdot \epsilon$	16,26 < 64,70	Cumple
Cargas concentradas				
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		5,39 < 34,406	Cumple
Flecha				
Limitación L/300, siendo L=6m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,013 < 0,02	Cumple
Cruces de San Andrés				
L80.10				
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,18411 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%		
Desplazamiento estructura arriostrada	0,00027 m			

Soportes				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed</sub>	99,6	kNm		
V <sub>Ed</sub>	40,33	kN		
N <sub>Ed</sub>	65,076	kN		
IPE 300				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,79	Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		40,33 < 388,611	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		40,33 < 194,30	Cumple
Pandeo				
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,48	Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,85	Cumple

Vigas				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed</sub>	99,6	kNm		
V <sub>Ed</sub>	49,56	kN		
N <sub>Ed</sub>	46,376	kN		
IPE 330				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1$		0,61	Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		49,56 < 465,729	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		49,56 < 232,86	Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_y \cdot f_{yd}$		46,37 < 403,333	Cumple
Pandeo lateral				
$M_{Ed} < M_{b,Rd}$	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot (f_{yd}/\gamma_{M1})$		99,60 < 197,937	Cumple
Abolladura				
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.		$d/tw < 70 \cdot \epsilon$	23,56 < 64,70	Cumple
Cargas concentradas				
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		49,56 < 59,70	Cumple
Flecha				
Limitación L/300, siendo L=12,5m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,02039 < 0,04166	Cumple

Tabla 6.5. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 12,5x6. Elaboración propia.

6.3.4. Pórtico 15x4.

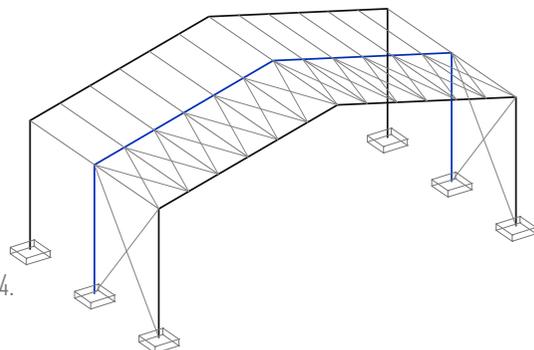


Imagen 6.15. Dibujo de pórtico 15x4. Elaboración propia.

Correas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed,y</sub>	3,856 kNm	M <sub>Ed,z</sub>	0,741 kNm
V <sub>Ed</sub>	3,505 kN		
N <sub>Ed</sub>	2,179 kN		
IPE 120			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$\frac{M_{Ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{Ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$	0,45	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ V <sub>pl,Rd</sub>	3,505 < 95,262	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ 0,5 · V <sub>pl,Rd</sub>	3,505 < 47,631	Cumple
Pandeo lateral			
Resistencia a pandeo lateral	M <sub>b,Rd</sub> = χ <sub>LT</sub> · W <sub>y</sub> · (f <sub>yd</sub> /γ <sub>M1</sub> )	3,856 < 6,369	Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la	d/tw < 70 · ε	14,82 < 64,70	Cumple
Cargas concentradas			
V <sub>Ed</sub> < N <sub>b,Rd</sub>	N <sub>b,Rd</sub> = $\frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$	3,050 < 34,406	Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=4m	f <sub>máx</sub> = β · $\frac{q \cdot L^4}{EI}$	0,0096 < 0,013	Cumple
Cruces de San Andrés			
L80.10			
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,0955 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%	
Desplazamiento estructura arriostrada	0,0003 m		

Soportes			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	83,34 kNm		
V <sub>Ed</sub>	33,59 kN		
N <sub>Ed</sub>	45,76 kN		
IPE 270			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$	0,85	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ V <sub>pl,Rd</sub>	33,59 < 334,175	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ 0,5 · V <sub>pl,Rd</sub>	33,59 < 166,58	Cumple
Pandeo			
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$	0,49	Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$	0,946	Cumple

Vigas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	83,34 kNm		
V <sub>Ed</sub>	35,84 kN		
N <sub>Ed</sub>	38,75 kN		
IPE 300			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	M <sub>Ed</sub> /M <sub>pl,Rd</sub> ≤ 1	0,66	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ V <sub>pl,Rd</sub>	35,84 < 388,61	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ 0,5 · V <sub>pl,Rd</sub>	35,84 < 194,305	Cumple
Resistencia frente a axil	N <sub>Ed</sub> ≤ 0,5 · A <sub>v</sub> · f <sub>yd</sub>	38,75 < 336,547	Cumple
Pandeo lateral			
M <sub>Ed</sub> < M <sub>b,Rd</sub>	M <sub>b,Rd</sub> = χ <sub>LT</sub> · W <sub>y</sub> · (f <sub>yd</sub> /γ <sub>M1</sub> )	83,34 < 156,252	Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.	d/tw < 70 · ε	23,23 < 64,70	Cumple
Cargas concentradas			
V <sub>Ed</sub> < N <sub>b,Rd</sub>	N <sub>b,Rd</sub> = $\frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$	35,84 < 59,72	Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=15m	f <sub>máx</sub> = β · $\frac{q \cdot L^4}{EI}$	0,0296 < 0,05	Cumple

Tabla 6.6. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 15x6. Elaboración propia.

6.3.5. Pórtico 15x5.

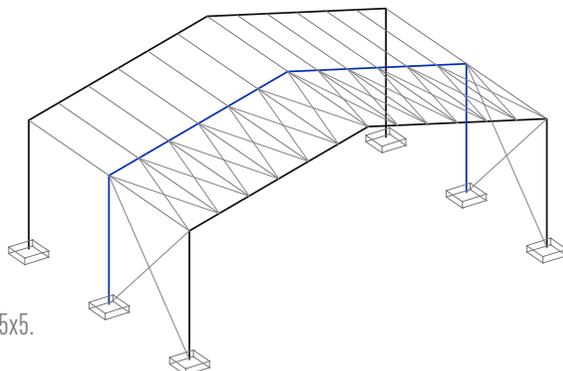


Imagen 6.16. Dibujo de pórtico 15x5. Elaboración propia.

Correas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed,y</sub>	4,797	kNm	M <sub>Ed,z</sub> 1,147 kNm
V <sub>Ed</sub>	4,06	kN	
N <sub>Ed</sub>	2,435	kN	
IPE 140			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$		0,43 Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		4,06 < 115,222 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		4,06 < 57,61 Cumple
Pandeo lateral			
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		4,797 < 7,871 Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura. d/tw < 70·ε 16,26 < 64,70 Cumple			
Cargas concentradas			
V <sub>Ed</sub> < N <sub>b,Rd</sub>	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		4,06 < 34,406 Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=5m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,011 < 0,0166 Cumple
Cruces de San Andrés			
L80.10			
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,0871 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%	
Desplazamiento estructura arriostrada	0,00034 m		

Soportes			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	110,31	kNm	
V <sub>Ed</sub>	44,21	kN	
N <sub>Ed</sub>	60,92	kN	
IPE 300			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,63 Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		44,21 < 388,611 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		44,21 < 194,30 Cumple
Pandeo			
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,36 Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,89 Cumple

Vigas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	110,31	kNm	
V <sub>Ed</sub>	41,07	kN	
N <sub>Ed</sub>	38,65	kN	
IPE 330			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed} / M_{pl,Rd} \leq 1$		0,63 Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		41,07 < 465,729 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		41,07 < 232,86 Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_y \cdot f_{yd}$		38,65 < 403,333 Cumple
Pandeo lateral			
M <sub>Ed</sub> < M <sub>b,Rd</sub>	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		110,31 < 197,937 Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura. d/tw < 70·ε 23,56 < 64,70 Cumple			
Cargas concentradas			
V <sub>Ed</sub> < N <sub>b,Rd</sub>	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		41,07 < 95,99 Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=15m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,02810 < 0,05 Cumple

Tabla 6.7. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 15x5. Elaboración propia.

6.3.6. Pórtico 15x6.

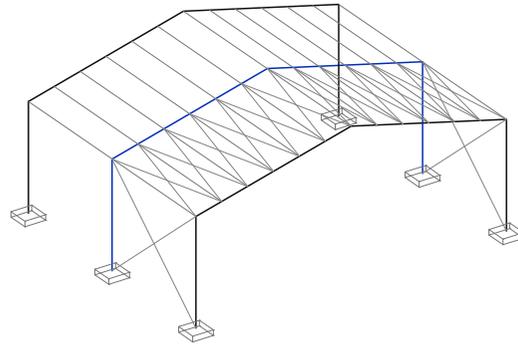


Imagen 6.17. Dibujo de pórtico 15x6. Elaboración propia.

Correas				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed,y</sub>	6,211	kNm	M <sub>Ed,z</sub>	1,68 kNm
V <sub>Ed</sub>	5,542	kN		
N <sub>Ed</sub>	2,556	kN		
IPE 140				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$		0,6	Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		5,542 < 115,222	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		5,542 < 57,61	Cumple
Pandeo lateral				
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left( \frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}} \right)$		6,211 < 6,714	Cumple
Abolladura				
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.   d/tw < 70·ε   16,26 < 64,70   Cumple				
Cargas concentradas				
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		5,542 < 50,93	Cumple
Flecha				
Limitación L/300, siendo L=6m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,016 < 0,02	Cumple
Cruces de San Andrés				
L80.8				
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,071 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%		
Desplazamiento estructura arriostrada	0,00035 m			

Soportes				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed</sub>	139,21	kNm		
V <sub>Ed</sub>	55,52	kN		
N <sub>Ed</sub>	78,5	kN		
IPE 330				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,86	Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		55,52 < 465,729	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		55,52 < 232,864	Cumple
Pandeo				
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,49	Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,9	Cumple

Vigas				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed</sub>	139,21	kNm		
V <sub>Ed</sub>	58,63	kN		
N <sub>Ed</sub>	64,34	kN		
IPE 360				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1$		0,68	Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		58,63 < 530,749	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		58,63 < 265,374	Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$		46,37 < 459,642	Cumple
Pandeo lateral				
$M_{Ed} < M_{b,Rd}$	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left( \frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}} \right)$		139,298 < 251,114	Cumple
Abolladura				
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.   d/tw < 70·ε   23,51 < 64,70   Cumple				
Cargas concentradas				
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		58,63 < 67,97	Cumple
Flecha				
Limitación L/300, siendo L=15m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,02587 < 0,05	Cumple

Tabla 6.8. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 15x6. Elaboración propia.

6.3.7. Pórtico 17,5x4.

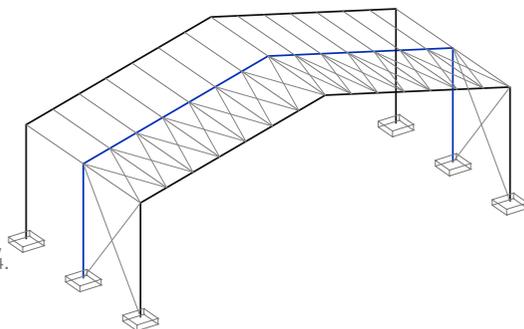


Imagen 6.18. Dibujo de pórtico 17,5x4. Elaboración propia.

Correas				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed,y</sub>	3,492	kNm	M <sub>Ed,z</sub>	0,736 kNm
V <sub>Ed</sub>	3,368	kN		
N <sub>Ed</sub>	2,848	kN		
IPE 120				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$		0,42	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		3,368 < 95,262	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		3,368 < 47,631	Cumple
Pandeo lateral				
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		3,492 < 6,369	Cumple
Abolladura				
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura. $d/tw < 70 \cdot \epsilon$				
			14,82 < 64,70	Cumple
Cargas concentradas				
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		3,368 < 34,406	Cumple
Flecha				
Limitación L/300, siendo L=4m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,0102 < 0,013	Cumple

Cruces de San Andrés		
L70.10		
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,106 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%
Desplazamiento estructura arriostrada	0,00061 m	

Soportes			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	116,073	kNm	
V <sub>Ed</sub>	46,37	kN	
N <sub>Ed</sub>	57,9	kN	
IPE 300			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,91 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		44,21 < 465,729 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		44,21 < 232,864 Cumple
Pandeo			
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,5 Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,92 Cumple

Vigas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	116,073	kNm	
V <sub>Ed</sub>	43,31	kN	
N <sub>Ed</sub>	53,72	kN	
IPE 300			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1$		0,66 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		43,31 < 388,61 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		43,31 < 194,305 Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$		53,72 < 336,547 Cumple
Pandeo lateral			
$M_{Ed} < M_{b,Rd}$	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		116,073 < 156,252 Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura. $d/tw < 70 \cdot \epsilon$			
			23,23 < 64,70 Cumple
Cargas concentradas			
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		43,31 < 95,99 Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=17,5m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,03895 < 0,0583 Cumple

Tabla 6.9. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 17,5x4. Elaboración propia.

6.3.8. Pórtico 17,5x5.

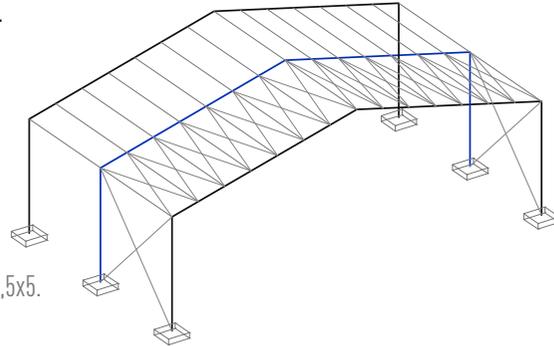


Imagen 6.19. Dibujo de pórtico 17,5x5. Elaboración propia.

Correas				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed,y</sub>	4,386	kNm	M <sub>Ed,z</sub>	1,141 kNm
V <sub>Ed</sub>	4,575	kN		
N <sub>Ed</sub>	3,025	kN		
IPE 120				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$		0,435	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		4,575 < 95,262	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		4,575 < 47,631	Cumple
Pandeo lateral				
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left( \frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}} \right)$		4,386 < 5,254	Cumple
Abolladura				
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la	$d/tw < 70 \cdot \epsilon$		14,82 < 64,70	Cumple
Cargas concentradas				
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		4,575 < 34,406	Cumple
Flecha				
Limitación L/300, siendo L=5m	$f_{max} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,0091 < 0,0166	Cumple

Cruces de San Andrés		
L70.10		
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,08775 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%
Desplazamiento estructura arriostrada	0,00052 m	

Soportes			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	151,58	kNm	
V <sub>Ed</sub>	60,4	kN	
N <sub>Ed</sub>	75,54	kN	
IPE 330			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,93 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		60,40 < 465,729 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		60,40 < 232,864 Cumple
Pandeo			
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,51 Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_x \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,901 Cumple

Vigas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	151,58	kNm	
V <sub>Ed</sub>	55,72	kN	
N <sub>Ed</sub>	69,98	kN	
IPE 330			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1$		0,71 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		55,72 < 465,729 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		55,72 < 232,86 Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$		69,98 < 403,33 Cumple
Pandeo lateral			
$M_{Ed} < M_{b,Rd}$	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left( \frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}} \right)$		151,58 < 197,93 Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.	$d/tw < 70 \cdot \epsilon$		23,23 < 64,70 Cumple
Cargas concentradas			
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		55,72 < 59,72 Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=15m	$f_{max} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,0177 < 0,05 Cumple

Tabla 6.10. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 17,5x5. Elaboración propia.

6.3.9. Pórtico 17,5x6.

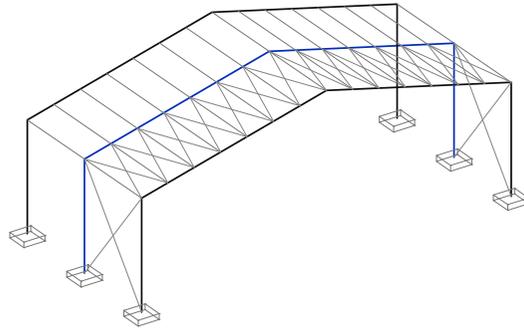


Imagen 6.20. Dibujo de pórtico 17,5x6. Elaboración propia.

Correas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed,y</sub>	6,417	kNm	M <sub>Ed,z</sub> 2 kNm
V <sub>Ed</sub>	5,545	kN	
N <sub>Ed</sub>	3,381	kN	
IPE 140			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$	0,6	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ V <sub>pl,Rd</sub>	5,545 < 115,222	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ 0,5 · V <sub>pl,Rd</sub>	5,545 < 57,61	Cumple
Pandeo lateral			
Resistencia a pandeo lateral	M <sub>b,Rd</sub> = χ <sub>LT</sub> · W <sub>y</sub> · (f <sub>yd</sub> /γ <sub>M1</sub> )	6,417 < 6,714	Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.  d/tw < 70·ε  16,26 < 64,70 Cumple			
Cargas concentradas			
V <sub>Ed</sub> < N <sub>b,Rd</sub>	N <sub>b,Rd</sub> = $\frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$	5,545 < 50,93	Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=6m	f <sub>máx</sub> = β · $\frac{q \cdot L^4}{EI}$	0,0142 < 0,02	Cumple
Cruces de San Andrés			
L70.10			
Desplazamiento estructura no arriestrada	0,082 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriestrada y de la estructura no arriestrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Este se ha reducido en más de un 80%	
Desplazamiento estructura arriestrada	0,00048 m		

Soportes			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	183,29	kNm	
V <sub>Ed</sub>	72,9	kN	
N <sub>Ed</sub>	92,246	kN	
IPE 360			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$	0,89	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ V <sub>pl,Rd</sub>	55,52 < 530,749	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ 0,5 · V <sub>pl,Rd</sub>	55,52 < 265,37	Cumple
Pandeo			
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$	0,49	Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$	0,9	Cumple

Vigas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	183,29	kNm	
V <sub>Ed</sub>	67,29	kN	
N <sub>Ed</sub>	84,5	kN	
IPE 360			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	M <sub>Ed</sub> /M <sub>pl,Rd</sub> ≤ 1	0,89	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ V <sub>pl,Rd</sub>	67,29 < 530,749	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	V <sub>Ed</sub> ≤ 0,5 · V <sub>pl,Rd</sub>	67,29 < 265,374	Cumple
Resistencia frente a axil	N <sub>Ed</sub> ≤ 0,5 · A <sub>v</sub> · f <sub>yd</sub>	84,5 < 459,642	Cumple
Pandeo lateral			
M <sub>Ed</sub> < M <sub>b,Rd</sub>	M <sub>b,Rd</sub> = χ <sub>LT</sub> · W <sub>y</sub> · (f <sub>yd</sub> /γ <sub>M1</sub> )	183,29 < 251,114	Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.  d/tw < 70·ε  23,51 < 64,70 Cumple			
Cargas concentradas			
V <sub>Ed</sub> < N <sub>b,Rd</sub>	N <sub>b,Rd</sub> = $\frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$	67,29 < 67,97	Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=17,5m	f <sub>máx</sub> = β · $\frac{q \cdot L^4}{EI}$	0,048 < 0,0583	Cumple

Tabla 6.11. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 17,5x6. Elaboración propia.

6.3.10. Pórtico 20x4.

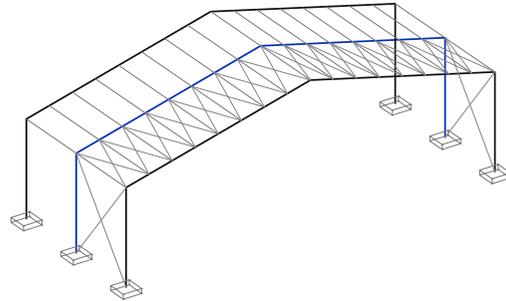


Imagen 6.21. Dibujo de pórtico 20x4. Elaboración propia.

Correas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed,y</sub>	3,989	kNm	M <sub>Ed,z</sub> 0,739 kNm
V <sub>Ed</sub>	3,55	kN	
N <sub>Ed</sub>	3,35	kN	
IPE 120			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector (flectión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$		0,45 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		3,55 < 95,262 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		3,55 < 47,631 Cumple
Pandeo lateral			
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		3,989 < 6,369 Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura. d/tw < 70·ε 14,82 < 64,70 Cumple			
Cargas concentradas			
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		3,55 < 34,406 Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=4m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,0065 < 0,013 Cumple
Cruces de San Andrés			
L70.10			
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,096 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%	
Desplazamiento estructura arriostrada	0,0007 m		

Soportes			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	139,89	kNm	
V <sub>Ed</sub>	56,42	kN	
N <sub>Ed</sub>	63,61	kN	
IPE 330			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,85 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		56,42 < 465,729 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		56,42 < 232,864 Cumple
Pandeo			
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,45 Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,82 Cumple

Vigas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	139,89	kNm	
V <sub>Ed</sub>	46,95	kN	
N <sub>Ed</sub>	65,02	kN	
IPE 330			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1$		0,86 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		46,95 < 465,729 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		46,95 < 232,864 Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_v \cdot f_{yd}$		65,02 < 336,547 Cumple
Pandeo lateral			
$M_{Ed} < M_{b,Rd}$	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		139,8 < 197,937 Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura. d/tw < 70·ε 23,23 < 64,70 Cumple			
Cargas concentradas			
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		46,95 < 95,99 Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=20m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,0546 < 0,066 Cumple

Tabla 6.12. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 20x4. Elaboración propia.

6.3.11. Pórtico 20x5.

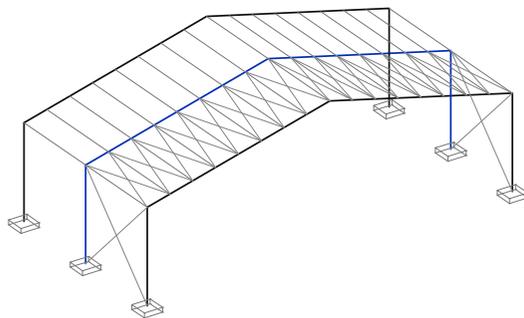


Imagen 6.22. Dibujo de pórtico 20x5. Elaboración propia.

Correas					
Solicitaciones:					
M <sub>Ed,y</sub>	4,46	kNm	M <sub>Ed,z</sub>	1,14	kNm
V <sub>Ed</sub>	4,6	kN			
N <sub>Ed</sub>	3,53	kN			
IPE 120					
Comprobaciones:					
Resistencia de la sección					
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{Med,y}{Mpl,y,Rd} + \frac{Med,z}{Mpl,z,Rd} \leq 1$		0,6	Cumple	
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		4,60 < 95,262	Cumple	
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		4,60 < 47,631	Cumple	
Pandeo lateral					
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		4,46 < 5,254	Cumple	
Abolladura					
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la		$d/tw < 70 \cdot \epsilon$	14,82 < 64,70	Cumple	
Cargas concentradas					
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		4,6 < 34,406	Cumple	
Flecha					
Limitación L/300, siendo L=5m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,0098 < 0,0166	Cumple	
Cruces de San Andrés					
L70.7					
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,0823	m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%		
Desplazamiento estructura arriostrada	0,00071	m			

Soportes				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed</sub>	192,09	kNm		
V <sub>Ed</sub>	77,12	kN		
N <sub>Ed</sub>	87,63	kN		
IPE 360				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,93	Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		77,12 < 530,749	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		77,12 < 265,37	Cumple
Pandeo				
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{ply} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{ply} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,49	Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{ply} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{ply} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,93	Cumple

Vigas				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed</sub>	192,09	kNm		
V <sub>Ed</sub>	62,92	kN		
N <sub>Ed</sub>	89,02	kN		
IPE 360				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1$		0,93	Cumple
Resistencia frente a esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		62,92 < 530,749	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		62,92 < 265,374	Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_y \cdot f_{yd}$		89,02 < 459,642	Cumple
Pandeo lateral				
$M_{Ed} < M_{b,Rd}$	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		192,09 < 251,114	Cumple
Abolladura				
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.		$d/tw < 70 \cdot \epsilon$	23,51 < 64,70	Cumple
Cargas concentradas				
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		62,92 < 75,82	Cumple
Flecha				
Limitación L/300, siendo L=20m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,0537 < 0,066	Cumple

Tabla 6.13. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 20x5. Elaboración propia.

6.3.12. Pórtico 20x6.

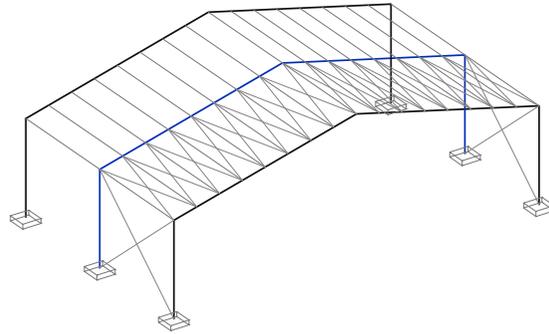


Imagen 6.23. Dibujo de pórtico 20x6. Elaboración propia.

Correas				
Solicitaciones:				
M <sub>Ed,y</sub>	6,524	kNm	M <sub>Ed,z</sub>	1,67 kNm
V <sub>Ed</sub>	5,567	kN		
N <sub>Ed</sub>	4,012	kN		
IPE 140				
Comprobaciones:				
Resistencia de la sección				
Resistencia frente a momento flector (flexión esviada)	$\frac{M_{ed,y}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{ed,z}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1$		0,61	Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		5,567 < 115,222	Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		5,567 < 57,61	Cumple
Pandeo lateral				
Resistencia a pandeo lateral	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		6,524 < 6,714	Cumple
Abolladura				
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.			$d/tw < 70 \cdot \epsilon$	16,26 < 64,70 Cumple
Cargas concentradas				
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		5,567 < 50,93	Cumple
Flecha				
Limitación L/300, siendo L=6m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,015 < 0,02	Cumple

Cruces de San Andrés		
L70.7		
Desplazamiento estructura no arriostrada	0,063 m	Tras calcular el desplazamiento de la estructura arriostrada y de la estructura no arriostrada, se comprueba que efectivamente, cumple con su función de limitar el desplazamiento. Éste se ha reducido en más de un 80%
Desplazamiento estructura arriostrada	0,00057 m	

Soportes			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	231,831	kNm	
V <sub>Ed</sub>	93,05	kN	
N <sub>Ed</sub>	106,6	kN	
IPE 400			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$		0,88 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		93,05 < 645,670 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		93,05 < 322,835 Cumple
Pandeo			
Resistencia a pandeo	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + 0,6 \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,46 Cumple
Sensibilidad a la torsión	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{y,LT} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} \leq 1$		0,95 Cumple

Vigas			
Solicitaciones:			
M <sub>Ed</sub>	231,831	kNm	
V <sub>Ed</sub>	75,83	kN	
N <sub>Ed</sub>	107,3	kN	
IPE 400			
Comprobaciones:			
Resistencia de la sección			
Resistencia frente a momento flector	$M_{Ed}/M_{pl,Rd} \leq 1$		0,88 Cumple
Resistencia frente esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$		67,29 < 645,67 Cumple
Interacción momento flector - esfuerzo cortante	$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$		67,29 < 322,825 Cumple
Resistencia frente a axil	$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot A_y \cdot f_{yd}$		84,5 < 559,16 Cumple
Pandeo lateral			
$M_{Ed} < M_{b,Rd}$	$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\gamma_{M1}}\right)$		213,83 < 325,44 Cumple
Abolladura			
Si se cumple la siguiente condición no será necesario comprobar la abolladura.			$d/tw < 70 \cdot \epsilon$ 23,51 < 64,70 Cumple
Cargas concentradas			
$V_{Ed} < N_{b,Rd}$	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$		75,83 < 78,5 Cumple
Flecha			
Limitación L/300, siendo L=20m	$f_{m\acute{a}x} = \beta \cdot \frac{q \cdot L^4}{EI}$		0,61 < 0,66 Cumple

Tabla 6.14. Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 20x6. Elaboración propia.

## 6.4. Tabla resumen de dimensionado

<b>Nave 12'5x4</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 270	6	36,1	1083
Vigas	6,441	IPE 270	6	36,1	1395,1206
Correa	4	IPE 120	24	10,4	998,4
Cruz San Andrés Vigas	4,2	L80.12	20	14	1176
Cruz San Andrés Soporte	6,4	L80.12	4	14	358,4
<b>TOTAL</b>					<b>5010,9206</b>

Tabla 6.15. Tabla resumen del pórtico 12,5x4. Elaboración propia

<b>Nave 15x4</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 300	6	42,2	1266
Vigas	7,73	IPE 300	6	42,2	1957,236
Correa	4	IPE 120	28	10,4	1164,8
Cruz San Andrés Vigas	4,2	L80.10	24	11,9	1199,52
Cruz San Andrés Soporte	6,4	L80.10	4	11,9	304,64
<b>TOTAL</b>					<b>5892,196</b>

Tabla 6.18. Tabla resumen del pórtico 15x4. Elaboración propia

<b>Nave 12'5x5</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 300	6	42,2	1266
Vigas	6,441	IPE 300	6	42,2	1630,8612
Correa	5	IPE 120	24	10,4	1248
Cruz San Andrés Vigas	5,16	L80.8	20	9,66	996,912
Cruz San Andrés Soporte	7,07	L80.8	4	9,66	273,1848
<b>TOTAL</b>					<b>5414,958</b>

Tabla 6.16. Tabla resumen del pórtico 12,5x5. Elaboración propia

<b>Nave 15x5</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 330	6	49,1	1473
Vigas	7,73	IPE 330	6	49,1	2277,258
Correa	5	IPE 140	28	12,9	1806
Cruz San Andrés Vigas	5,16	L80.10	24	11,9	1473,696
Cruz San Andrés Soporte	7,07	L80.10	4	11,9	336,532
<b>TOTAL</b>					<b>7366,486</b>

Tabla 6.19. Tabla resumen del pórtico 15x5. Elaboración propia

<b>Nave 12'5x6</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 330	6	49,1	1473
Vigas	6,441	IPE 330	6	49,1	1897,5186
Correa	6	IPE 140	24	12,9	1857,6
Cruz San Andrés Vigas	6,14	L80.10	20	11,9	1461,32
Cruz San Andrés Soporte	7,81	L80.10	4	11,9	371,756
<b>TOTAL</b>					<b>7061,1946</b>

Tabla 6.17. Tabla resumen del pórtico 12,5x6. Elaboración propia

<b>Nave 15x6</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 360	6	57,1	1713
Vigas	7,73	IPE 360	6	57,1	2648,298
Correa	6	IPE 140	28	12,9	2167,2
Cruz San Andrés Vigas	6,14	L80.8	24	9,66	1423,4976
Cruz San Andrés Soporte	7,81	L80.8	4	9,66	301,7784
<b>TOTAL</b>					<b>8253,774</b>

Tabla 6.20. Tabla resumen del pórtico 15x6. Elaboración propia

<b>Nave 17'5x4</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 300	6	42,2	1266
Vigas	9,02	IPE 300	6	42,2	2283,864
Correa	4	IPE 120	32	10,4	1331,2
Cruz San Andrés Vigas	4,2	L70.10	28	10,3	1211,28
Cruz San Andrés Soporte	6,4	L70.10	4	10,3	263,68
<b>TOTAL</b>					<b>6356,024</b>

Tabla 6.21. Tabla resumen del pórtico 17,5x4. Elaboración propia

<b>Nave 20x4</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 330	6	49,1	1473
Vigas	10,306	IPE 330	6	49,1	3036,1476
Correa	4	IPE 120	36	10,4	1497,6
Cruz San Andrés Vigas	4,2	L70.10	32	10,3	1384,32
Cruz San Andrés Soporte	6,4	L70.10	4	10,3	263,68
<b>TOTAL</b>					<b>7654,7476</b>

Tabla 6.24. Tabla resumen del pórtico 20x4. Elaboración propia

<b>Nave 17'5x5</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 330	6	49,1	1473
Vigas	9,02	IPE 330	6	49,1	2657,292
Correa	5	IPE 120	32	10,4	1664
Cruz San Andrés Vigas	5,16	L70.10	28	10,3	1488,144
Cruz San Andrés Soporte	7,07	L70.10	4	10,3	291,284
<b>TOTAL</b>					<b>7573,72</b>

Tabla 6.22. Tabla resumen del pórtico 17,5x5. Elaboración propia

<b>Nave 20x5</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 360	6	57,1	1713
Vigas	10,306	IPE 360	6	57,1	3530,8356
Correa	5	IPE 120	36	10,4	1872
Cruz San Andrés Vigas	5,16	L70.10	32	10,3	1700,736
Cruz San Andrés Soporte	7,07	L70.10	4	10,3	291,284
<b>TOTAL</b>					<b>9107,8556</b>

Tabla 6.25. Tabla resumen del pórtico 20x5. Elaboración propia

<b>Nave 17'5x6</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 360	6	57,1	1713
Vigas	9,02	IPE 360	6	57,1	3090,252
Correa	6	IPE 140	32	12,9	2476,8
Cruz San Andrés Vigas	6,14	L70.10	28	10,3	1770,776
Cruz San Andrés Soporte	7,81	L70.10	4	10,3	321,772
<b>TOTAL</b>					<b>9372,6</b>

Tabla 6.23. Tabla resumen del pórtico 17,5x6. Elaboración propia

<b>Nave 20x6</b>					
	Longitud (m)	Perfil	Cantidad	Peso (kg/m)	kg
Soportes	5	IPE 400	6	66,3	1989
Vigas	10,306	IPE 400	6	66,3	4099,7268
Correa	6	IPE 140	36	12,9	2786,4
Cruz San Andrés Vigas	6,14	L70.10	32	10,3	2023,744
Cruz San Andrés Soporte	7,81	L70.10	4	10,3	321,772
<b>TOTAL</b>					<b>11220,6428</b>

Tabla 6.26. Tabla resumen del pórtico 20x6. Elaboración propia

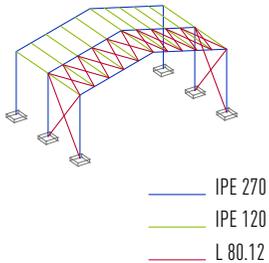
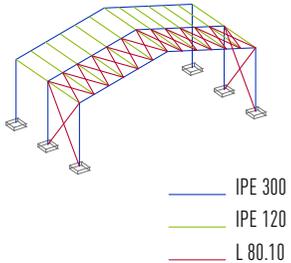
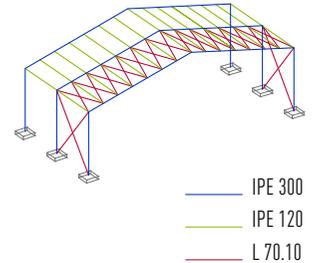
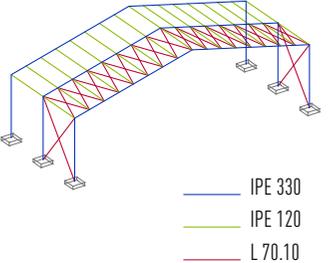
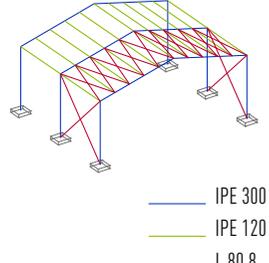
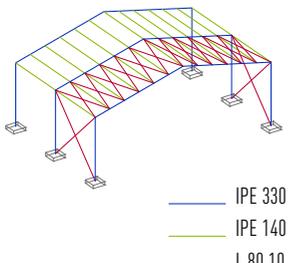
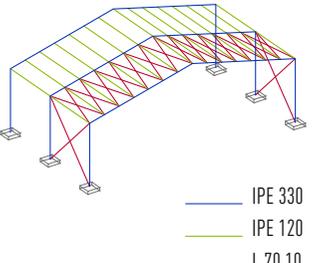
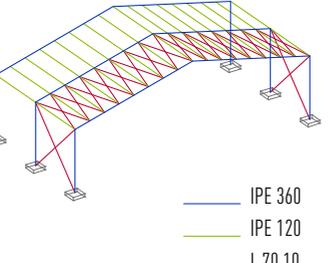
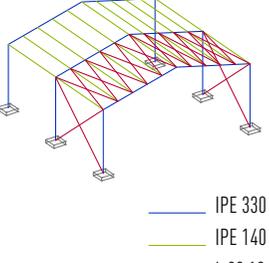
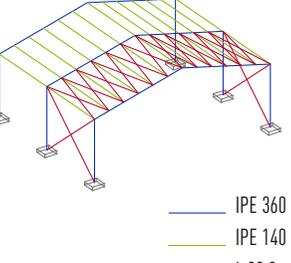
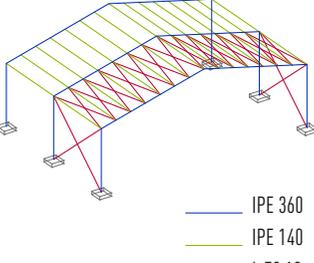
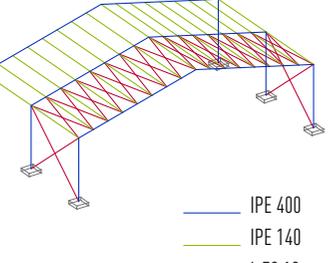
	Luz 12,5 metros	Luz 15 metros	Luz 17,5 metros	Luz 20 metros
Separación entre pórticos 4 metros	 <p>— IPE 270 — IPE 120 — L 80.12</p>	 <p>— IPE 300 — IPE 120 — L 80.10</p>	 <p>— IPE 300 — IPE 120 — L 70.10</p>	 <p>— IPE 330 — IPE 120 — L 70.10</p>
Separación entre pórticos 5 metros	 <p>— IPE 300 — IPE 120 — L 80.8</p>	 <p>— IPE 330 — IPE 140 — L 80.10</p>	 <p>— IPE 330 — IPE 120 — L 70.10</p>	 <p>— IPE 360 — IPE 120 — L 70.10</p>
Separación entre pórticos 6 metros	 <p>— IPE 330 — IPE 140 — L 80.10</p>	 <p>— IPE 360 — IPE 140 — L 80.8</p>	 <p>— IPE 360 — IPE 140 — L 70.10</p>	 <p>— IPE 400 — IPE 140 — L 70.10</p>

Tabla 6.27. Dimensionado final de las barras que componen los distintos modelos estructurales. Elaboración propia.

# 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizado el dimensionado de todos los módulos, se procede al estudio de la influencia que tiene la geometría de la estructura tanto en el peso de la estructura como en la huella de carbono.

### 7.1. Mediciones de CO<sub>2</sub>

Para obtener el valor de la emisión de CO<sub>2</sub> únicamente se considera el peso del acero de la estructura una vez colocado en obra. No se considera ni los trabajos de soldadura, ni la extracción del acero, ni la eliminación del acero. La información se extrae del banco de datos del Instituto de tecnología de la construcción de Cataluña (BEDEC, ITeC; <https://itec.es/nouBedec.e/>).

En las siguiente tabla, se recoge la información sobre el coeficiente que se usa para la obtención de la emisión de CO<sub>2</sub>. Se trata de un cálculo lineal, por lo que una vez calculado el peso total de cada nave, éste se multiplica por el coeficiente.

INFORMACIÓN AMBIENTAL		
Código	Descripción	Emisión CO2/kg
B44Z701A	Acero S275JR según UNE-EN 10025-2, formado por pieza simple, en perfiles laminados en caliente serie IPN, IPE, HEB, HEA, HEM, UPN, trabajando en el taller para colocar soldadura y con una capa de imprimación antioxidante	4,00

Tabla 7.1. Información ambiental sobre el acero. Elaboración propia.

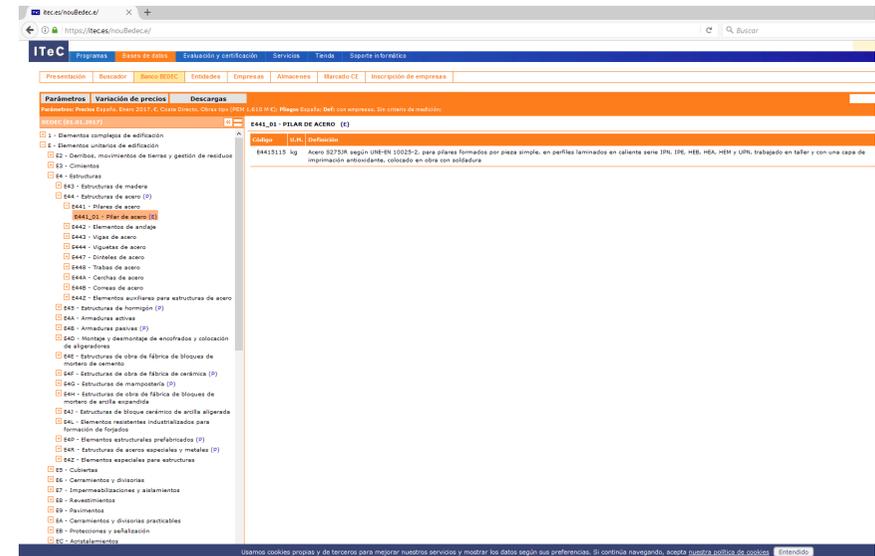


Imagen 7.1. Captura de pantalla ITeC. Fuente: <https://itec.es/nouBedec.e/>

Siendo las naves objeto de estudio, las definidas en el epígrafe 2 de este trabajo, luces de 12'5, 15, 17'5 y 20m y separación entre pórticos de 4, 5 y 6m. Con una superficie comprendida entre 500 y 1000m<sup>2</sup>. Que se recogen en las tablas 7.2 - 7.7.

7.2. Naves objeto de estudio.

7.2.1. Longitud de correas de 4 metros

	10 Pórticos	11 Pórticos	12 Pórticos	13 Pórticos	14 Pórticos	15 Pórticos	16 Pórticos	17 Pórticos	18 Pórticos
12,5 m									
			500 m <sup>2</sup>	550 m <sup>2</sup>	600 m <sup>2</sup>	650 m <sup>2</sup>	700 m <sup>2</sup>	750 m <sup>2</sup>	800 m <sup>2</sup>
15 m									
		540 m <sup>2</sup>	600 m <sup>2</sup>	660 m <sup>2</sup>	720 m <sup>2</sup>	780 m <sup>2</sup>	840 m <sup>2</sup>	900 m <sup>2</sup>	960 m <sup>2</sup>

Tabla 7.2. Naves de luz 12,5m y 15m con separación entre pórticos de 4m. Elaboración propia

17,5 m									
		560 m <sup>2</sup>	630 m <sup>2</sup>	700 m <sup>2</sup>	770 m <sup>2</sup>	840 m <sup>2</sup>	910 m <sup>2</sup>	980 m <sup>2</sup>	
20 m									
		560 m <sup>2</sup>	640 m <sup>2</sup>	720 m <sup>2</sup>	800 m <sup>2</sup>	880 m <sup>2</sup>	960 m <sup>2</sup>		
	8 Pórticos	9 Pórticos	10 Pórticos	11 Pórticos	12 Pórticos	13 Pórticos	14 Pórticos	15 Pórticos	16 Pórticos

Tabla 7.3. Naves de luz 17,5m y 20m con separación entre pórticos de 4m. Elaboración propia

7.2.2. Longitud de correas de 5 metros

	7 Pórticos	8 Pórticos	9 Pórticos	10 Pórticos	11 Pórticos	12 Pórticos	13 Pórticos	14 Pórticos	15 Pórticos	16 Pórticos	
12,5 m											
			500 m <sup>2</sup>	562,5 m <sup>2</sup>	625 m <sup>2</sup>	687,5 m <sup>2</sup>	750 m <sup>2</sup>	812,5 m <sup>2</sup>	875 m <sup>2</sup>	937,5 m <sup>2</sup>	1000 m <sup>2</sup>
15 m											
	525 m <sup>2</sup>	600 m <sup>2</sup>	675 m <sup>2</sup>	750 m <sup>2</sup>	825 m <sup>2</sup>	900 m <sup>2</sup>	975 m <sup>2</sup>				

Tabla 7.4. Naves de luz 12,5m y 15m con separación entre pórticos de 5m. Elaboración propia

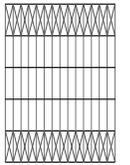
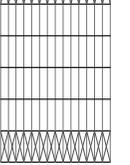
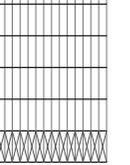
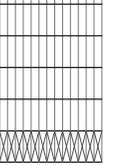
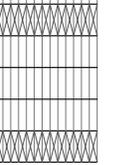
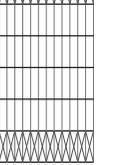
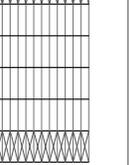
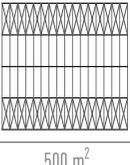
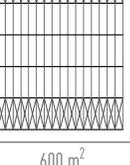
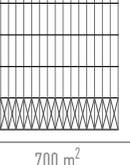
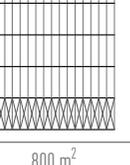
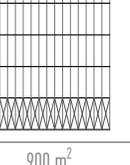
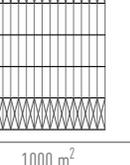
17,5 m										
		525 m <sup>2</sup>	612,5 m <sup>2</sup>	700 m <sup>2</sup>	787,5 m <sup>2</sup>	875 m <sup>2</sup>	962,5 m <sup>2</sup>	1050 m <sup>2</sup>		
20 m										
		500 m <sup>2</sup>	600 m <sup>2</sup>	700 m <sup>2</sup>	800 m <sup>2</sup>	900 m <sup>2</sup>	1000 m <sup>2</sup>			
	5 Pórticos	6 Pórticos	7 Pórticos	8 Pórticos	9 Pórticos	10 Pórticos	11 Pórticos	12 Pórticos	13 Pórticos	14 Pórticos

Tabla 7.5. Naves de luz 17,5m y 20m con separación entre pórticos de 5m. Elaboración propia

7.2.3. Longitud de correas de 6 metros

	5 Pórticos	6 Pórticos	7 Pórticos	8 Pórticos	9 Pórticos	10 Pórticos	11 Pórticos	12 Pórticos	13 Pórticos
12,5 m									
			525 m <sup>2</sup>	600 m <sup>2</sup>	675 m <sup>2</sup>	750 m <sup>2</sup>	825 m <sup>2</sup>	900 m <sup>2</sup>	975 m <sup>2</sup>
15 m									
		540 m <sup>2</sup>	630 m <sup>2</sup>	720 m <sup>2</sup>	810 m <sup>2</sup>	900 m <sup>2</sup>	990 m <sup>2</sup>		

Tabla 7.6. Naves de luz 12,5m y 15m con separación entre pórticos de 6m. Elaboración propia

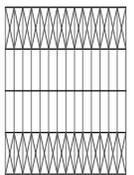
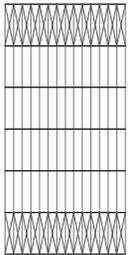
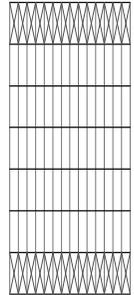
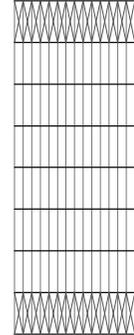
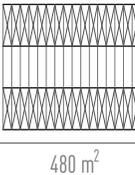
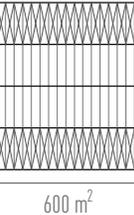
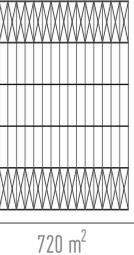
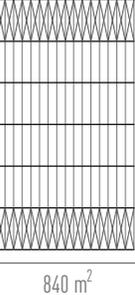
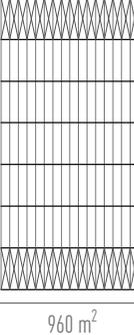
17,5 m									
		480 m <sup>2</sup>	525 m <sup>2</sup>	630 m <sup>2</sup>	735 m <sup>2</sup>	840 m <sup>2</sup>	945 m <sup>2</sup>		
20 m									
		480 m <sup>2</sup>	600 m <sup>2</sup>	720 m <sup>2</sup>	840 m <sup>2</sup>	960 m <sup>2</sup>	9 Pórticos	10 Pórticos	11 Pórticos

Tabla 7.7. Naves de luz 17,5m y 20m con separación entre pórticos de 6m. Elaboración propia

### 7.3. Gráficas de influencia de la luz

#### 7.3.1. Longitud de correas de 4 metros.

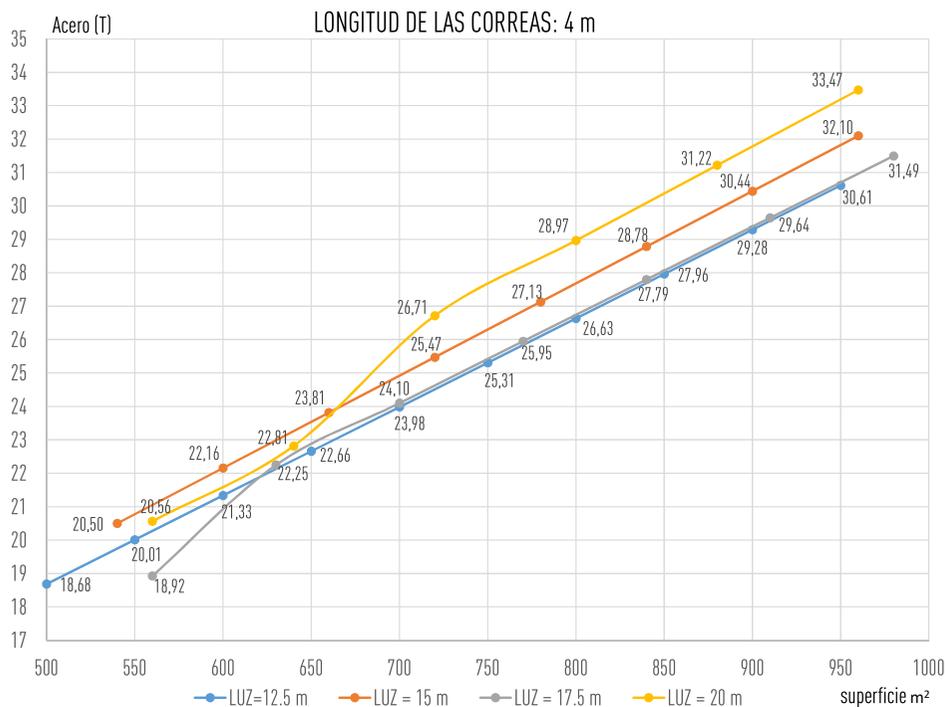


Imagen 7.2. Gráfica Acero/Superficie para longitudes de correa de 4m. Elaboración propia.

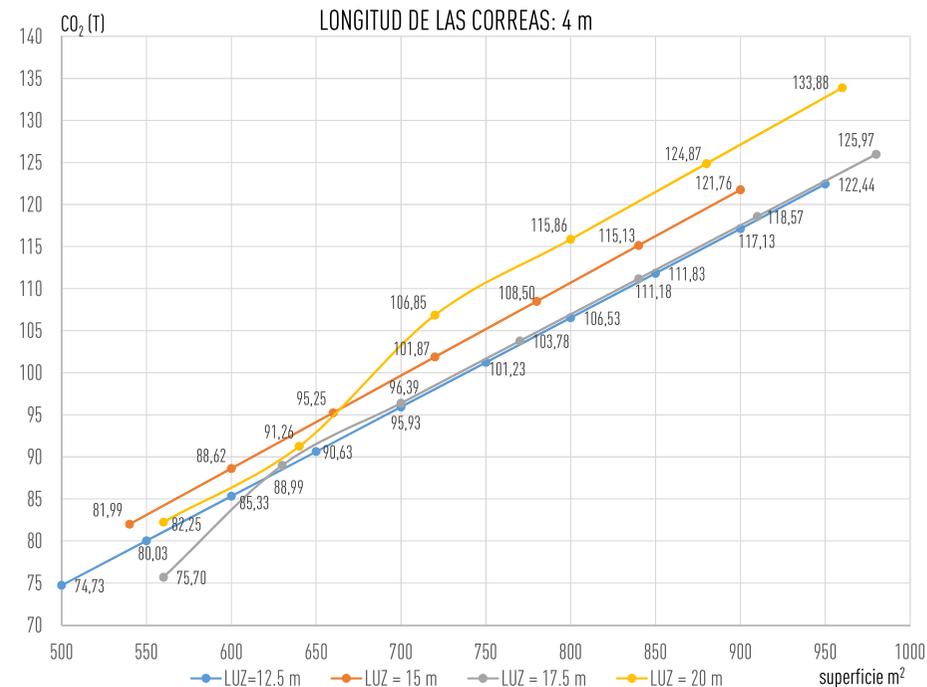


Imagen 7.3. Gráfica CO<sub>2</sub>/Superficie para longitudes de correa de 4m. Elaboración propia.

Tal y como se observa en las imágenes 7.2 y 7.3, para una distancia de pórticos de 4 metros, la solución más económica, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es la de pórticos de 17.5 metros de luz hasta una superficie de 650 m<sup>2</sup>. A partir de entonces tanto la solución de pórticos de 17.5 metros de luz como la de 12.5 metros de luz van a la par, presentando los mismos valores tanto de peso como de huella de carbono.

Por otro lado, la solución menos sostenible respecto a la huella de carbono es aquella que presenta mayor peso. Para separaciones entre pórticos de 4 metros esta solución es la de 20 metros hasta áreas de 650m<sup>2</sup>. Una vez alcanzado este valor de superficie la solución menos recomendada es la de pórticos de luces de 15 metros.

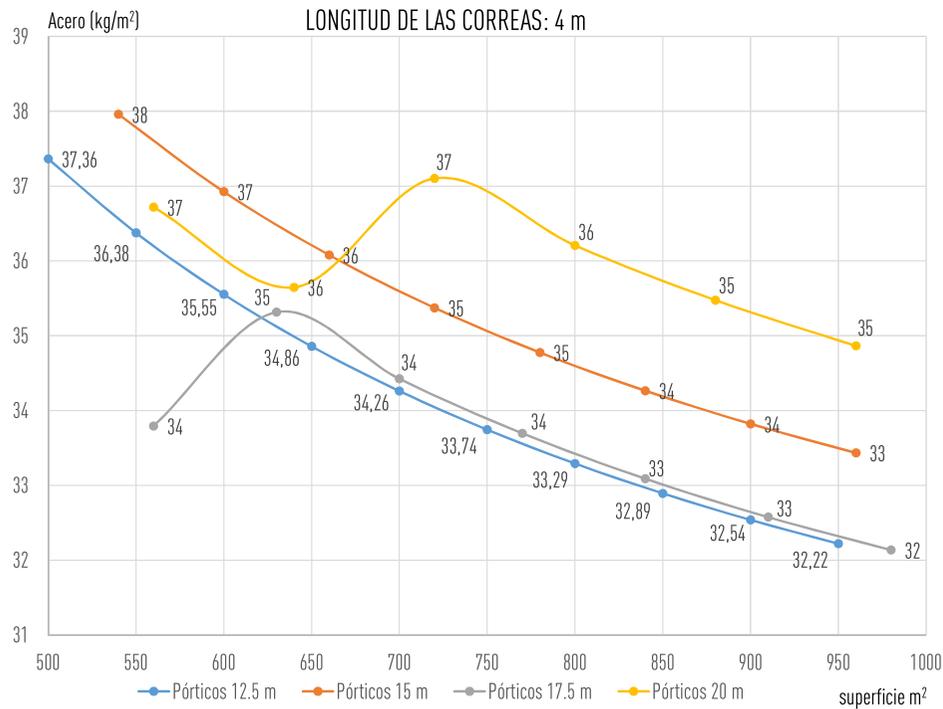


Imagen 7.4. Gráfica Acero(kg/m²)/Superficie para longitudes de correa de 4m. Elaboración propia.

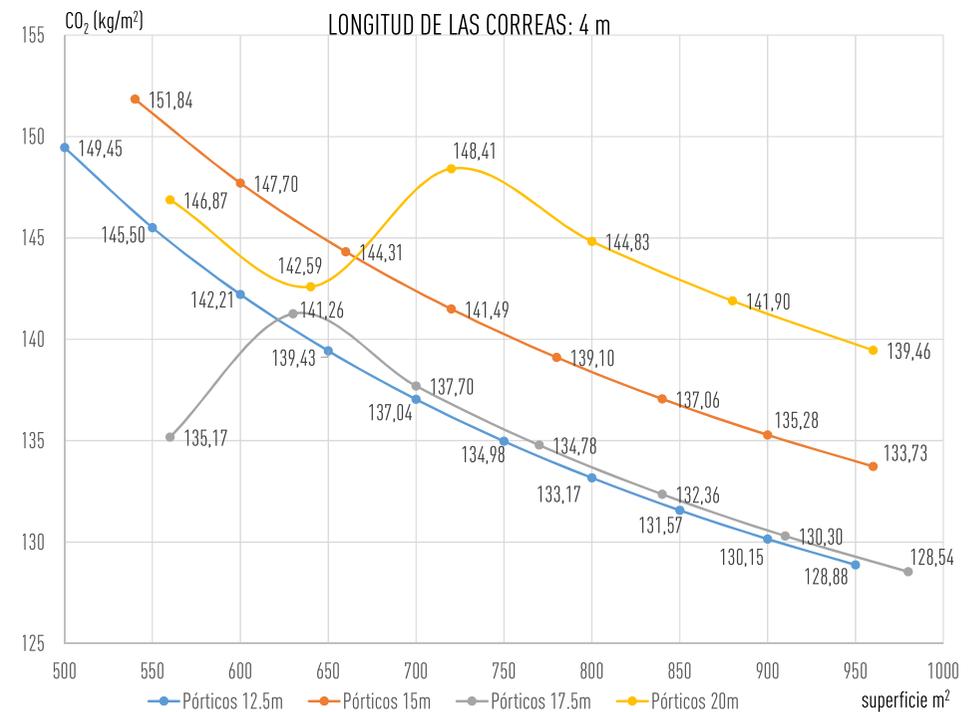


Imagen 7.5. Gráfica CO<sub>2</sub> (kg/m²)/Superficie para longitudes de correa de 4m. Elaboración propia.

Las mismas conclusiones extraídas de las imágenes anteriores, se reiteran en las imágenes 7.4 y 7.5, donde se estudia tanto el peso como la huella de carbono de la estructura en función de los metros cuadrados. Al igual que en las gráficas 7.2 y 7.3, la solución más óptima, desde el punto de vista de la huella de carbono es: Pórtico de 17,5m de luz hasta superficies de 650m<sup>2</sup>, y a partir de ese valor, tanto la luz de 12.5 como la de 17.5 presentan soluciones recomendadas.

En cambio, la solución menos económica, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es la nave de luz de 15 metros hasta 700m<sup>2</sup>, y desde ese punto, por cada m<sup>2</sup>, la nave de luz de 20 metros presenta un peso y una huella de CO<sub>2</sub>, mucho mayor.

7.3.2. Longitud de correas de 5 metros.

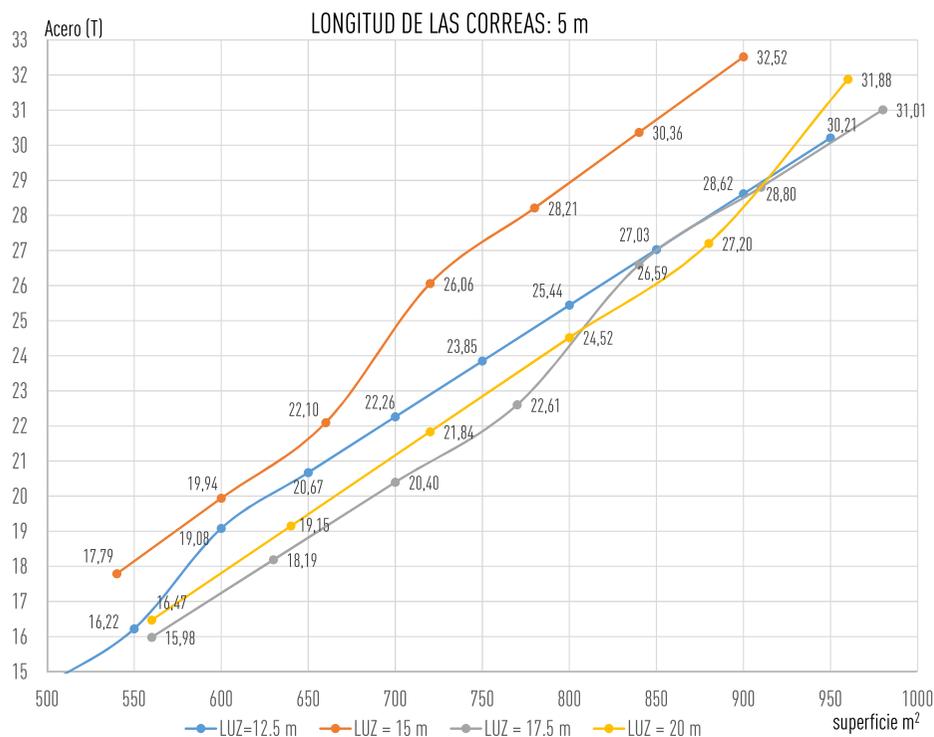


Imagen 7.6. Gráfica Acero/Superficie para longitudes de correa de 5m. Elaboración propia.

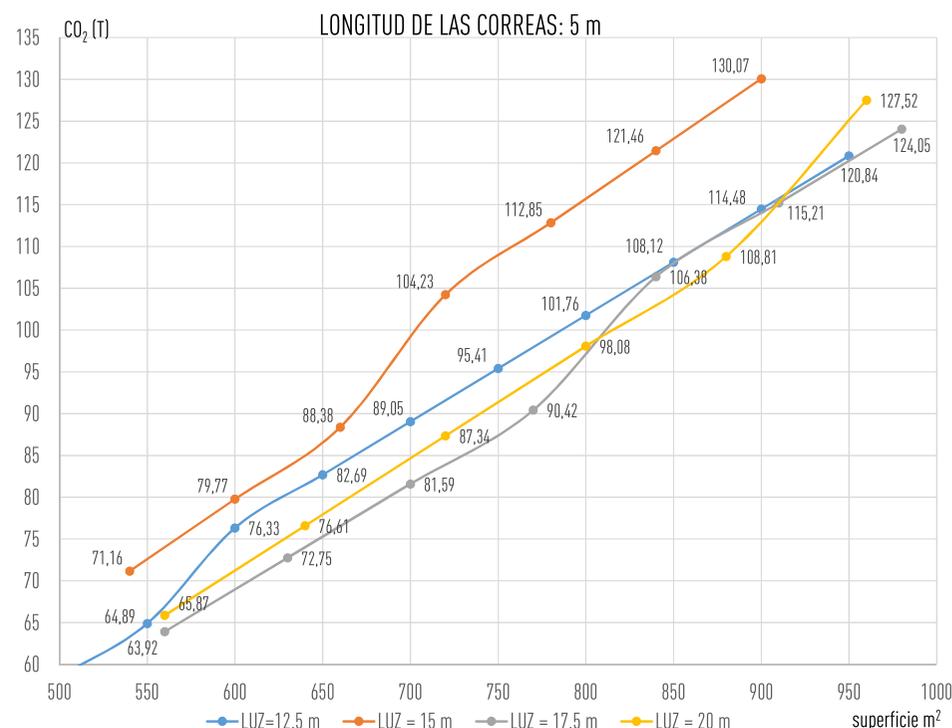


Imagen 7.7. Gráfica CO<sub>2</sub>/Superficie para longitudes de correa de 5m. Elaboración propia.

Tras examinar las gráficas 7.6 y 7.8, se concluye que para una distancia de pórticos de 5 metros, la solución más económica, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub> es la de pórticos de 17.5 metros de luz, hasta una superficie de 800m<sup>2</sup>. A partir de entonces el pórtico de 20 metros de luz presenta menor peso hasta una superficie de 950m<sup>2</sup>. Seguidamente, la solución más sostenible es, tanto la nave de luz 17.5 metros como la nave de luz 12.5 metros, pues presentan los mismos valores.

Por el contrario, la solución menos recomendada en todas las superficies estudiadas, es la de pórticos de 15m de luz.

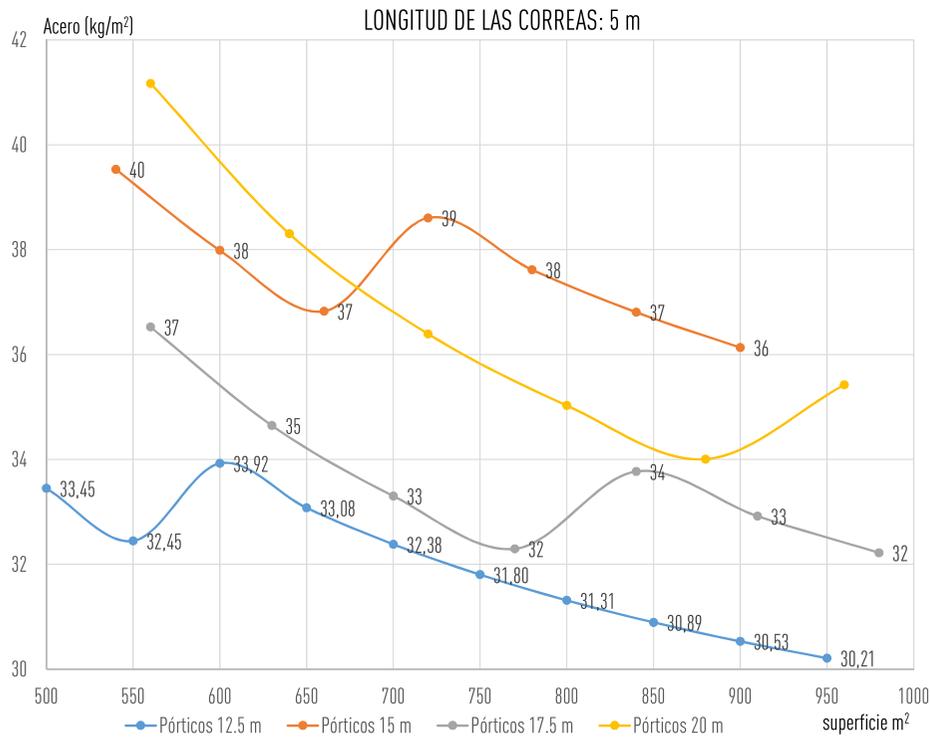


Imagen 7.8. Gráfica Acero (kg/m<sup>2</sup>)/Superficie para longitudes de correa de 5m. Elaboración propia.

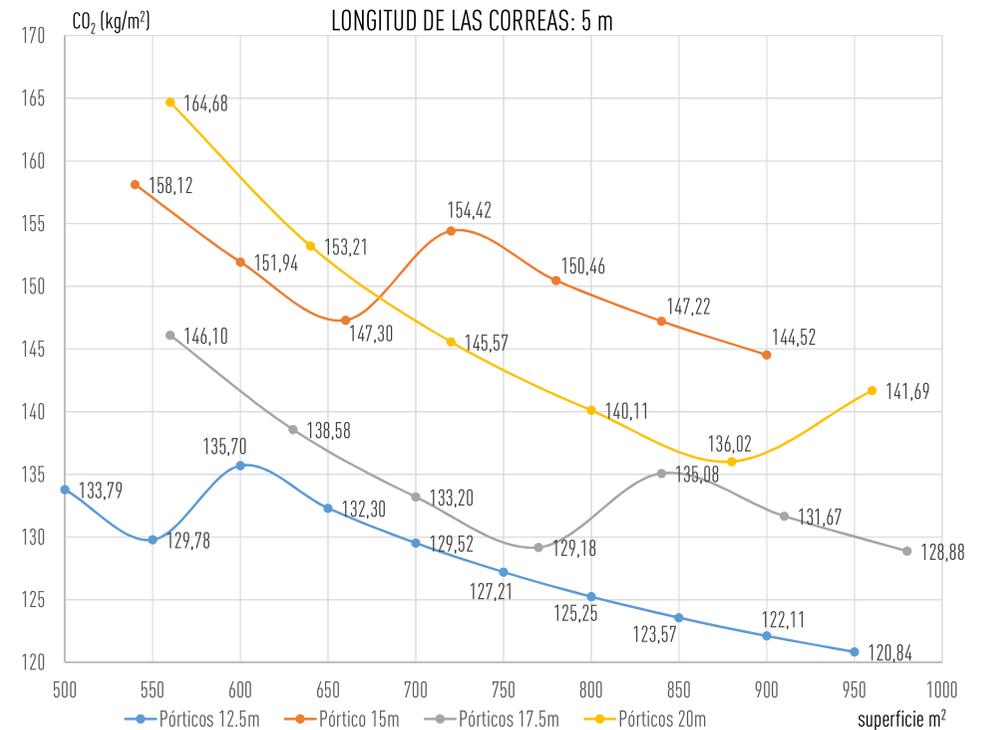


Imagen 7.9. Gráfica CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>2</sup>)/Superficie para longitudes de correa de 5m. Elaboración propia.

Tal como se observa en las imágenes 7.5 y 7.6, cuando se estudian los kilos de acero por metro cuadrado, no dan las mismas soluciones que en el estudio en toneladas de acero. En este caso, la solución más económica, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es la del pórtico de 12,5 metros de luz.

Lo mismo ocurre con la solución menos óptima, pues el pórtico de 15 metros es el menos recomendado a partir de una superficie de 700m<sup>2</sup>, hasta entonces, es el pórtico de 20 metros el que peor resultados presenta.

7.3.3. Longitud de correas de 6 metros.

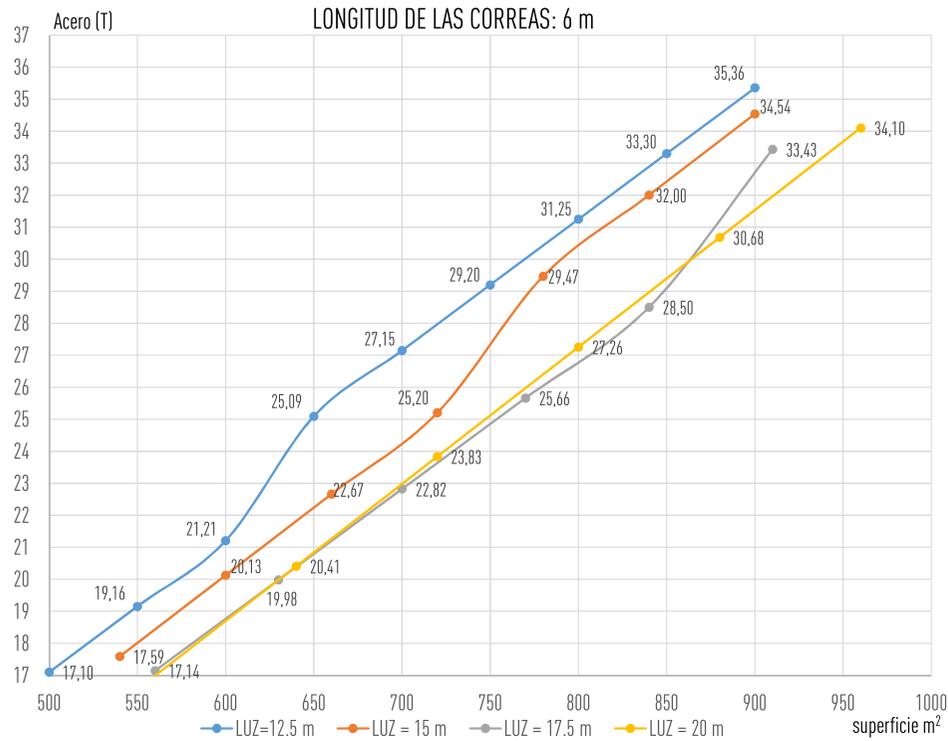


Imagen 7.10. Gráfica Acero/Superficie para longitudes de correa de 6m. Elaboración propia.

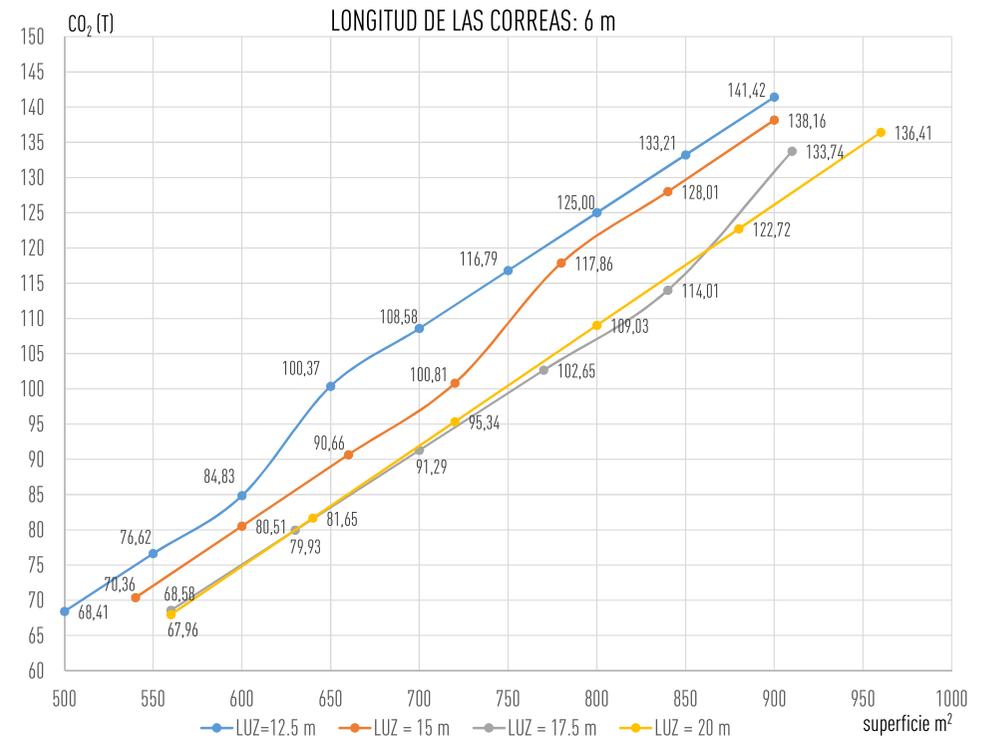


Imagen 7.11. Gráfica CO<sub>2</sub>/Superficie para longitudes de correa de 6m. Elaboración propia.

En este caso, tras el estudio de las imágenes 7.10 y 7.11, para una distancia de pórticos de 6 metros, las soluciones más económicas, desde el punto de vista de la huella de carbono, son las de pórticos de luz 17,5 y 20 metros, presentan pesos iguales hasta alcanzar superficies de 850m<sup>2</sup>, donde la solución más óptima es la de luz de 20 metros.

Mientras tanto, la solución menos recomendada, debido a su peso elevado en comparación al resto de soluciones, es la del pórtico de 12,5 metros de luz.

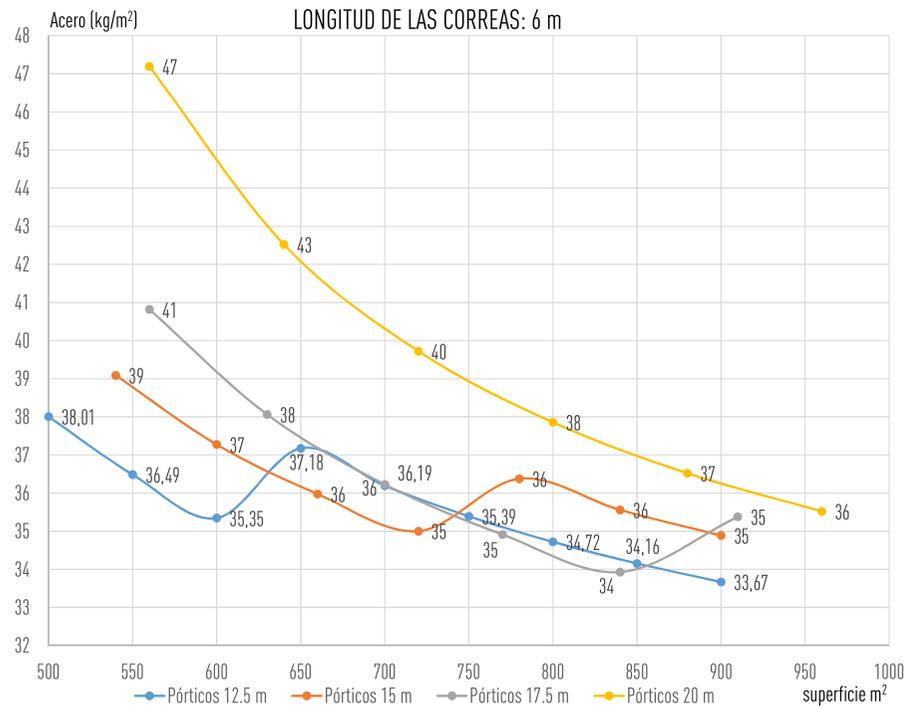


Imagen 7.12. Gráfica Acero (kg/m<sup>2</sup>)/Superficie para longitudes de correa de 6m. Elaboración propia.

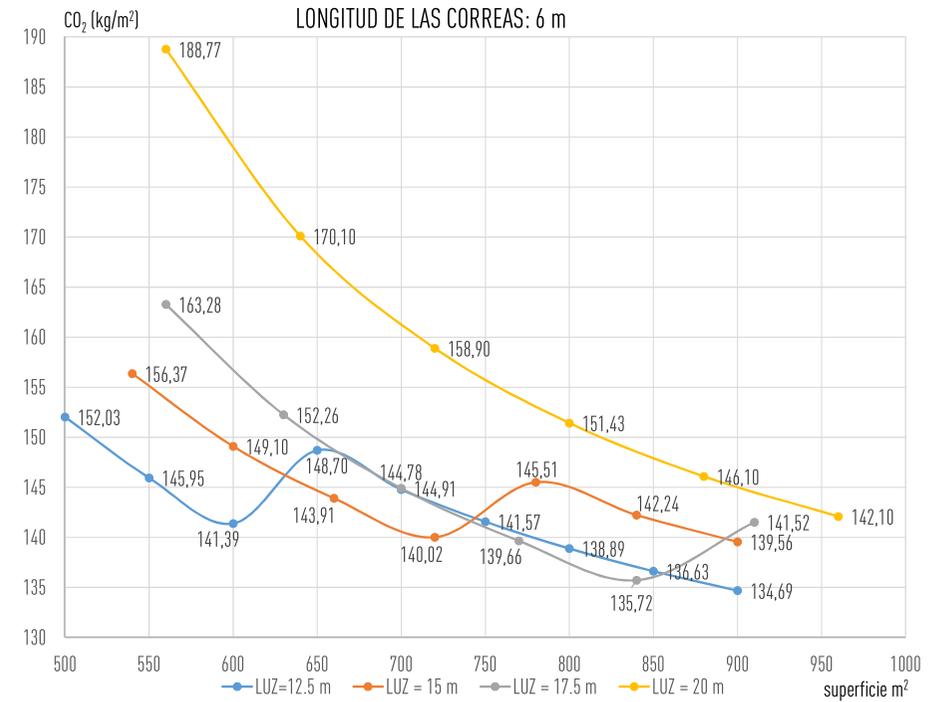


Imagen 7.13. Gráfica CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>2</sup>)/Superficie para longitudes de correa de 6m. Elaboración propia.

De la observación de las imágenes 7.12 y 7.13, para longitudes de correas de 6 metros, la solución menos económico de peso de acero por metro cuadrado, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es la del pórtico de 20m.

Por el contrario, la solución más óptima va variando en función de la superficie, hasta un área de 600m<sup>2</sup> la mejor solución es la del pórtico de 12.5 metros de luz. A partir de ahí, hasta 750m<sup>2</sup>, la mejor solución es la del pórtico de 15 metros de luz. Desde entonces, hasta 850m<sup>2</sup> de superficie el pórtico de 17,5 metros de luz, presenta mejores resultados. Finalmente, desde 850m<sup>2</sup> hasta el final, es el pórtico de 12,5 metros de luz.

7.4. Gráficas de influencia de la separación entre pórticos.

7.4.1. Pórticos de luz 12.5 metros

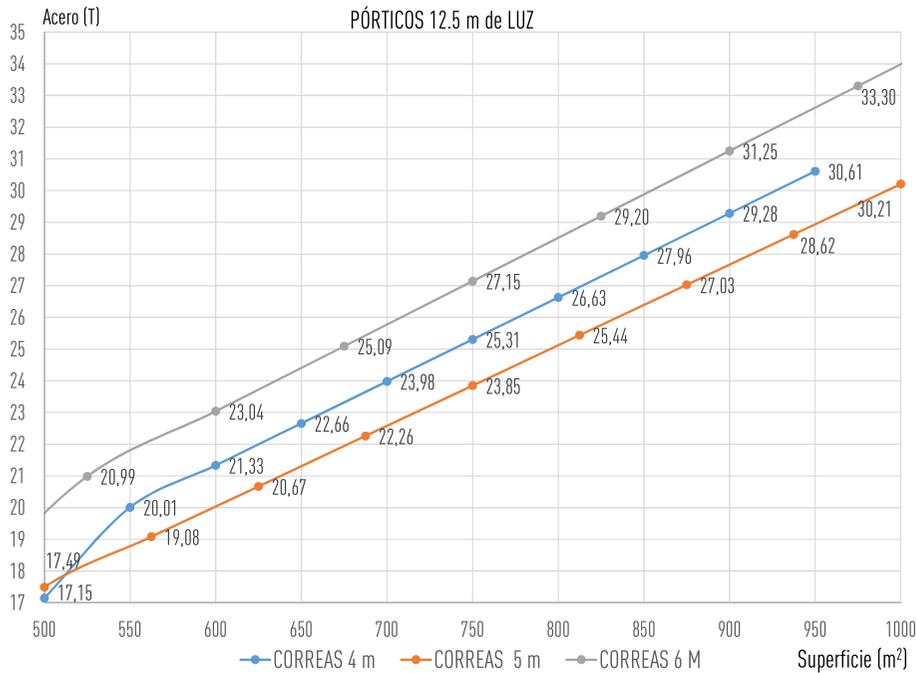


Imagen 7.14. Gráfica Acero/Superficie para naves de luz de 12,5m. Elaboración propia.

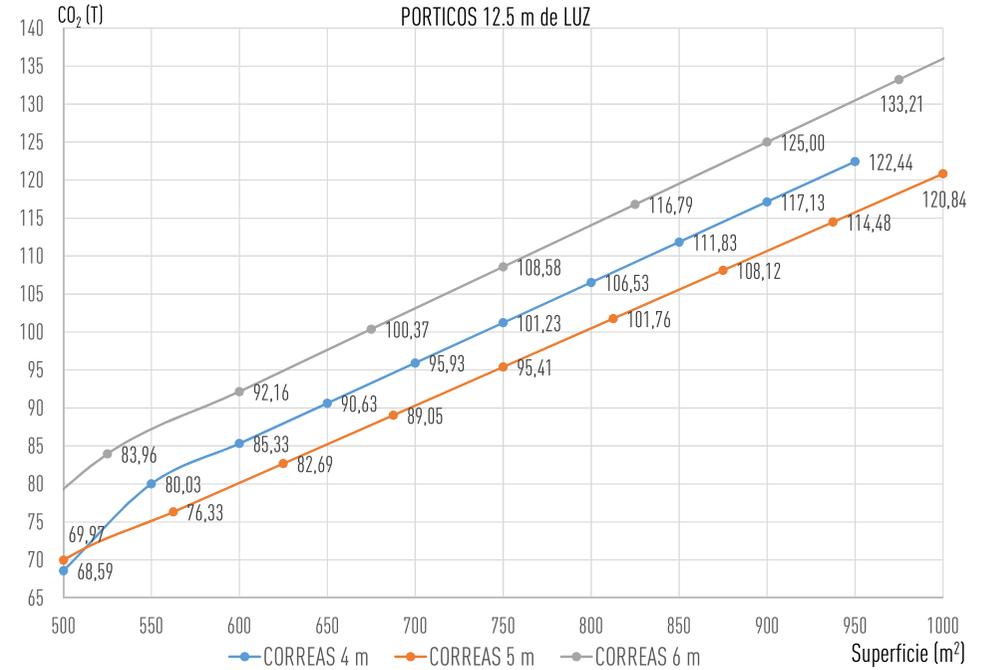


Imagen 7.15. Gráfica CO<sub>2</sub>/Superficie para naves de luz 12,5m. Elaboración propia.

De analizar las gráficas 7.14 y 7.15, se determina que para pórticos de luz 12.5 metros, la solución más económica, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es la de separación entre pórticos de 5 metros.

La peor solución para estas dimensiones de pórticos son las de longitud de correas de 6 metros.

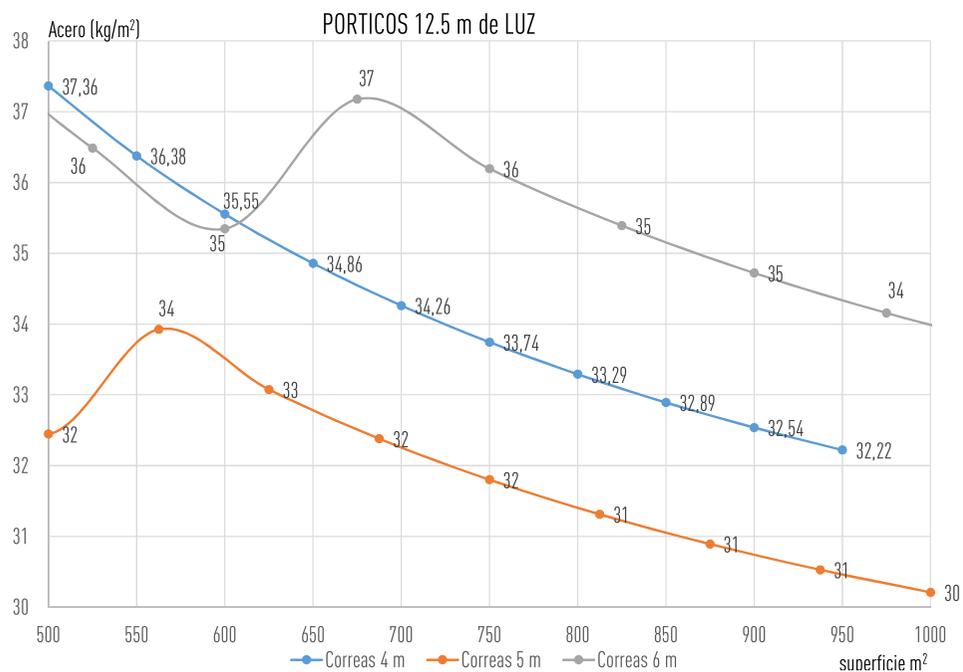


Imagen 7.16. Gráfica Acero (kg/m²)/Superficie para naves de luz de 12.5m. Elaboración propia.

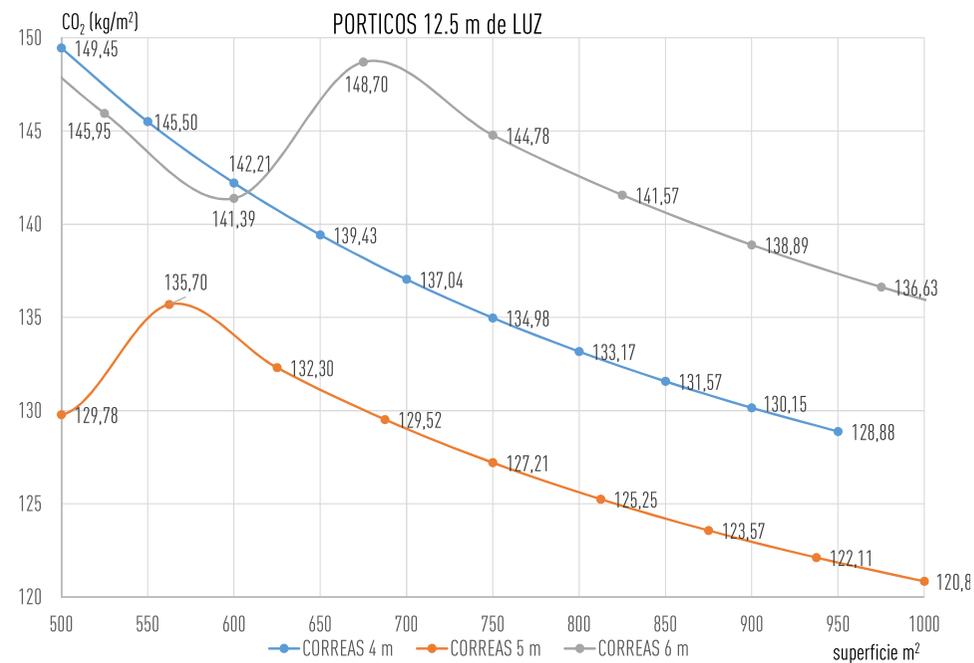


Imagen 7.17. Gráfica CO<sub>2</sub> (kg/m²)/Superficie para naves de luz 12.5m. Elaboración propia.

En las imágenes 7.16 y 7.17 se observa que para pórticos de luz 12.5 metros, la solución de menos acero por m<sup>2</sup>, es la de separación entre pórticos de 5 metros.

Mientras que la solución de mayor peso por superficie, es la de longitud de correas de 4 metros hasta una superficie de 600m<sup>2</sup>, a partir de ahí la solución menos recomendada es la de separación entre pórticos de 6 metros.

7.4.2. Pórticos de luz 15 metros

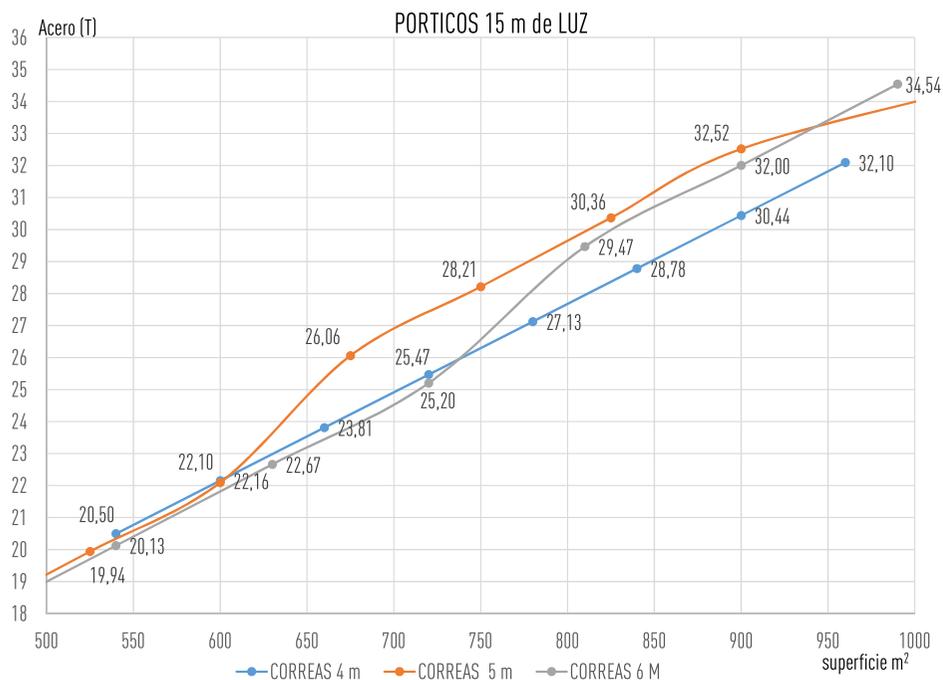


Imagen 7.18. Gráfica Acero/Superficie para naves de luz de 15m. Elaboración propia.

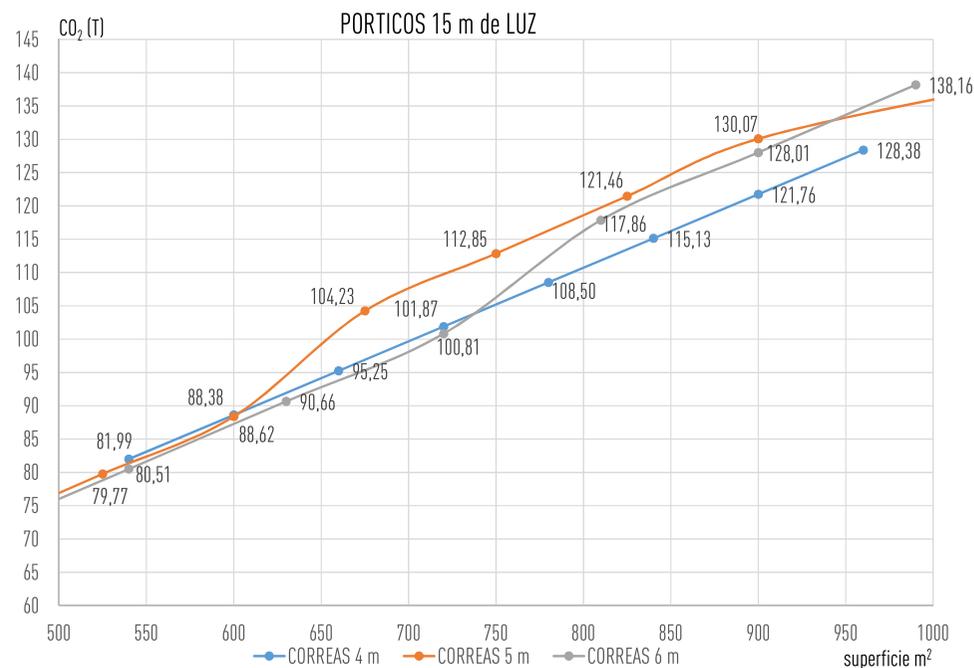


Imagen 7.19. Gráfica CO<sub>2</sub>/Superficie para naves de luz 15m. Elaboración propia.

Tal y como se observa en las gráficas 7.18 y 7.19, para pórticos de luz 15 metros, hasta una superficie de 600m<sup>2</sup>, cualquier solución es válida, pues presentan valores muy similares. A partir de ahí, las longitudes de 4 y 6 metros van a la par hasta los 750m<sup>2</sup>, donde los valores de menor peso los presenta la separación entre pórticos de 4 metros.

La solución menos recomendada, es por tanto la de separación entre pórticos de 5 metros, pues a partir de los 600m<sup>2</sup>, sus valores aumentan, siendo la solución que mayor peso presenta.

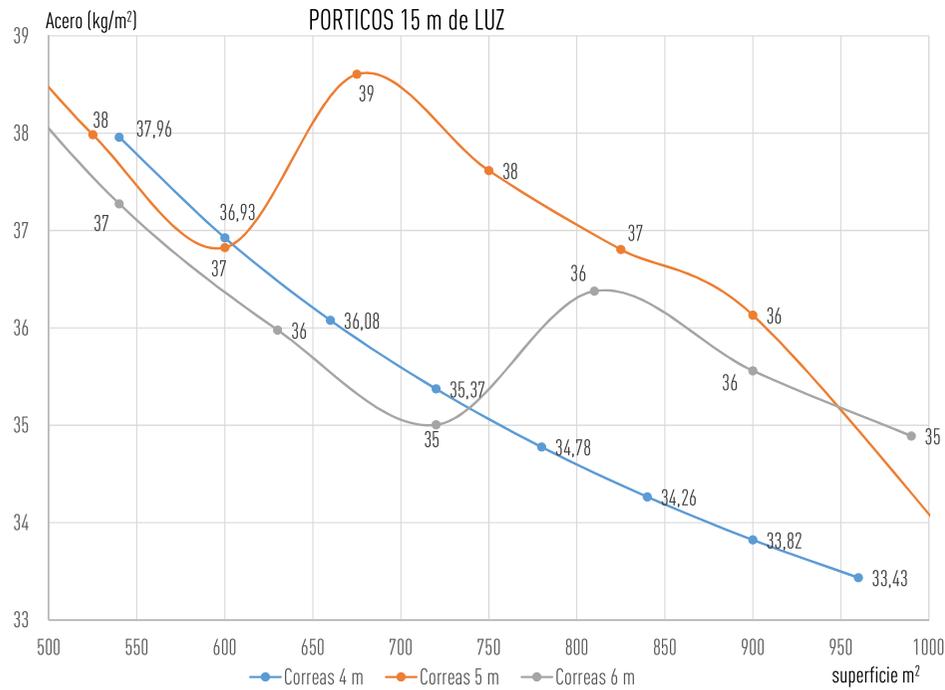


Imagen 7.20. Gráfica Acero (kg/m²)/Superficie para naves de luz 15m. Elaboración propia.

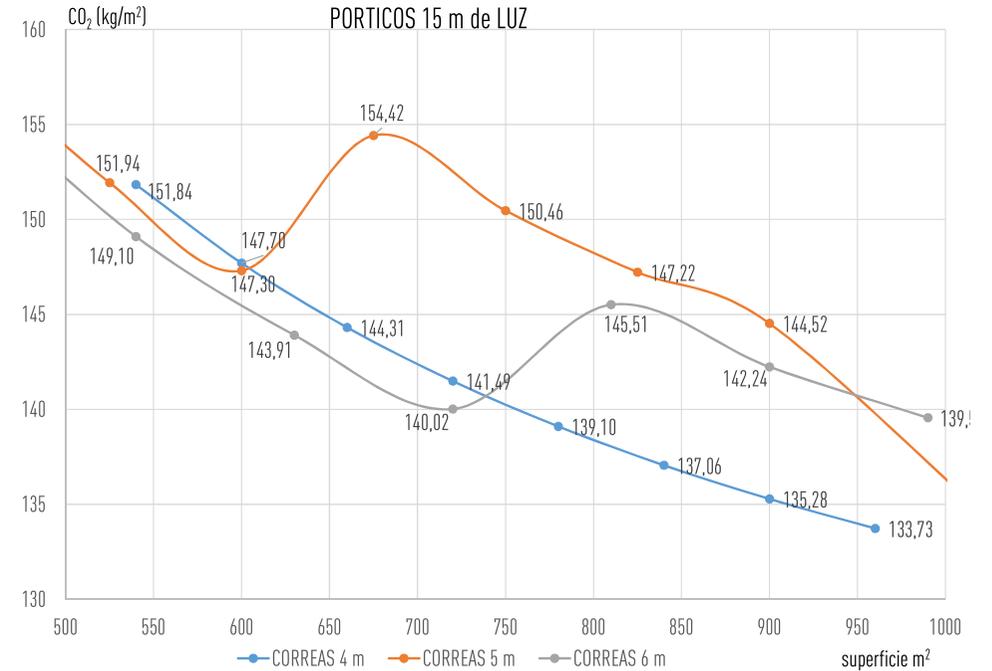


Imagen 7.21. Gráfica CO<sub>2</sub>(kg/m²)/Superficie para naves de luz 15m. Elaboración propia.

Tras examinar las gráficas 7.20 y 7.21, se puede concluir que para pórticos de luz 15 metros, la solución más económica de acero por metro cuadrado, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es la de separación entre pórticos de 6 metros, hasta un área de 750m<sup>2</sup>. Desde entonces la opción idónea es la de longitud de correas de 4 metros.

La solución menos recomendada, es la de separación entre pórticos de 5 metros, dado que sus valores aumentan a partir de los 600m<sup>2</sup>, siendo la solución que mayor peso presenta.

7.4.3. Pórticos de luz 17.5 metros

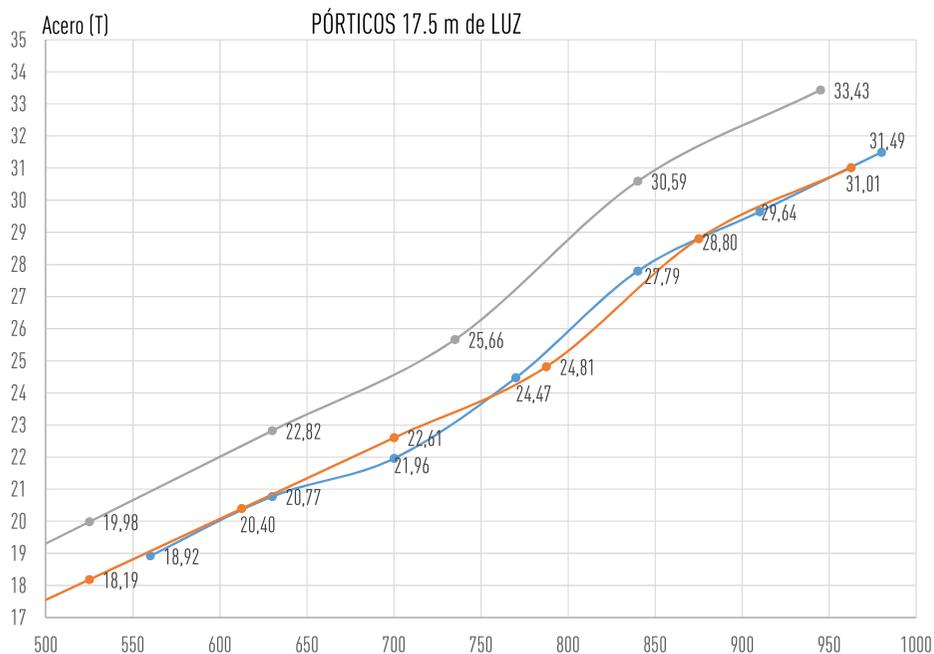


Imagen 7.22. Gráfica Acero/Superficie para naves de luz de 17,5m. Elaboración propia.

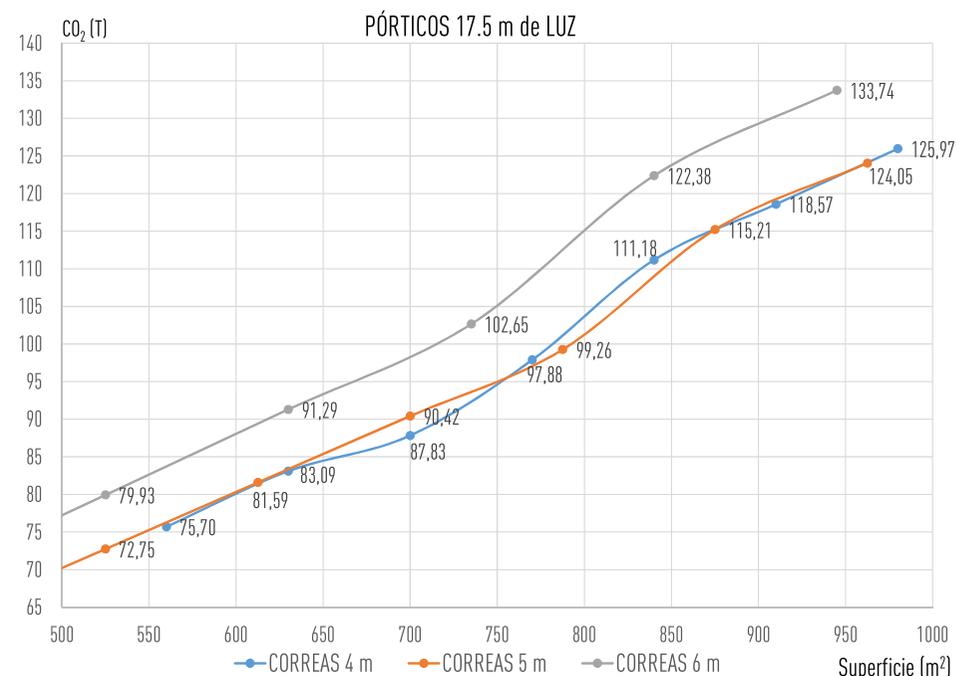


Imagen 7.23. Gráfica CO<sub>2</sub>/Superficie para naves de luz 17,5m. Elaboración propia.

Tal y como se observa en las imágenes 7.22 y 7.23, para pórticos de luz de 17.5 metros, tanto la separación entre pórticos de 4 metros como la de 5 metros presentan soluciones económicas, desde el punto de vista de la huella de carbono.

La solución menos recomendada, es por tanto la de separación entre pórticos de 6 metros, dado que en todas las superficies presenta valores de peso más elevados.

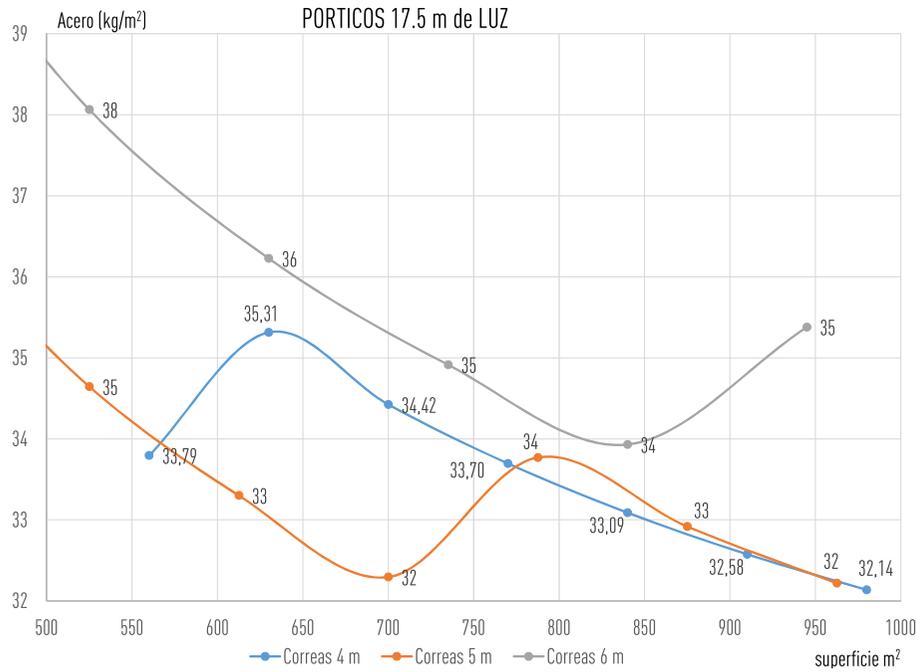


Imagen 7.24. Gráfica Acero (kg/m²)/Superficie para naves de luz 17.5m. Elaboración propia.

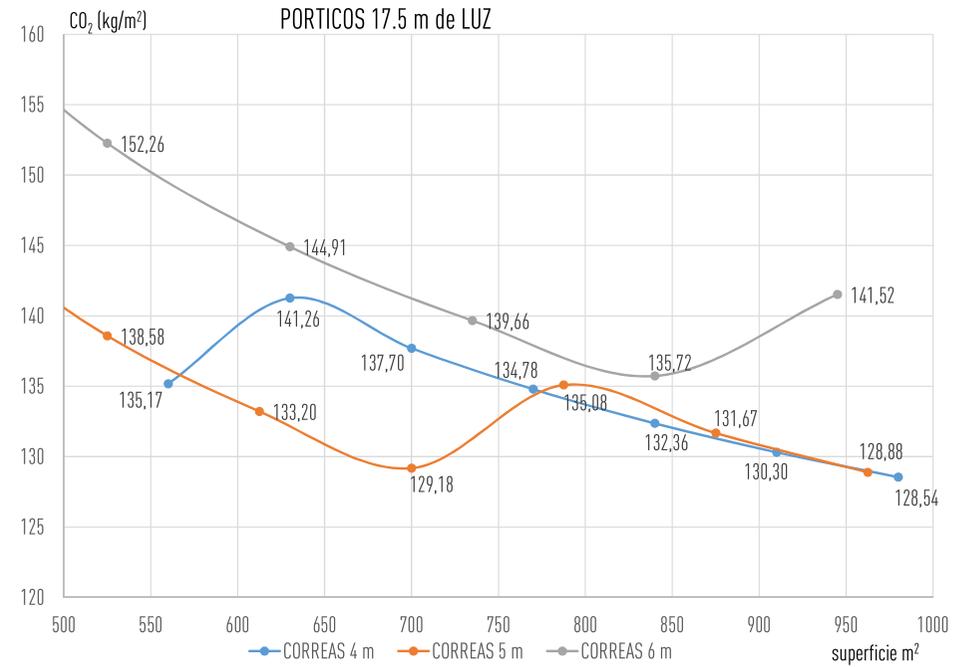


Imagen 7.25. Gráfica CO<sub>2</sub> (kg/m²)/Superficie para naves de luz 17.5m. Elaboración propia.

Después de realizar el estudio de las gráficas 7.24 y 7.25, para pórticos de luz de 17.5 metros la solución que mayor peso presenta, por metro cuadrado, es la de separaciones entre pórticos de 6 metros.

En cambio, la longitud de correas de 5 metros, presenta una solución óptima, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>, hasta alcanzar valores de 800m<sup>2</sup>. Desde ahí va a la par con la longitud de correas de 4 metros, dado que presentan valores muy similares.

7.4.4. Pórticos de luz 20 metros

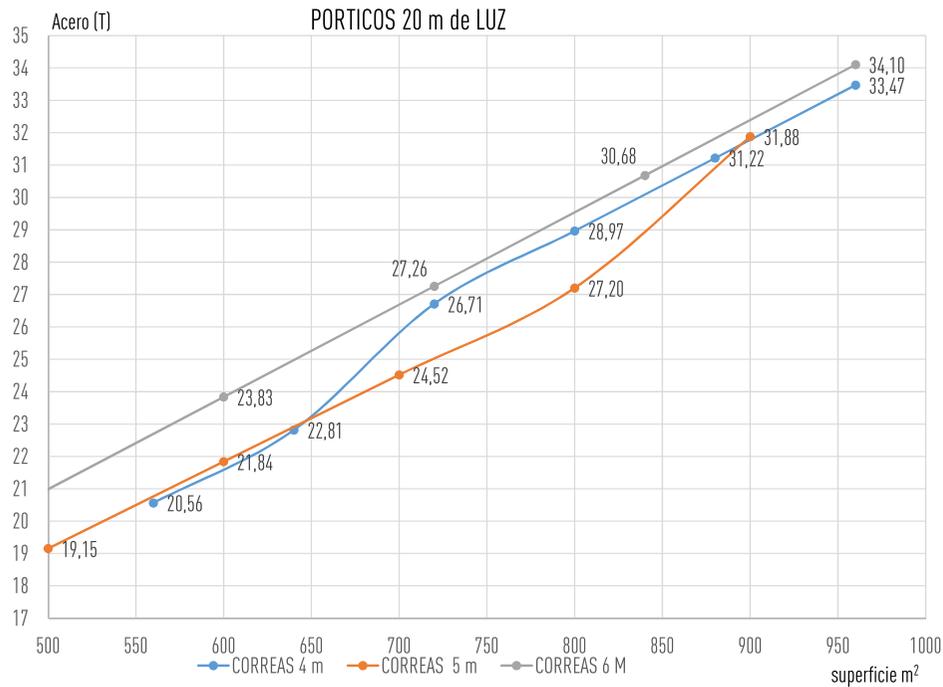


Imagen 7.26. Gráfica Acero/Superficie para naves de luz de 20m. Elaboración propia.

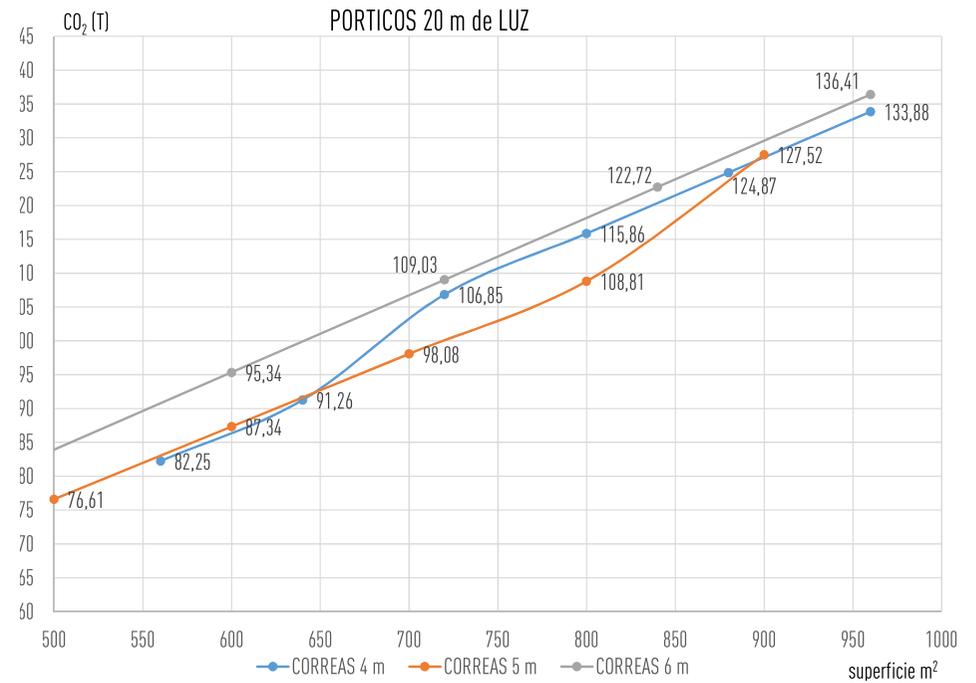


Imagen 7.27. Gráfica CO<sub>2</sub>/Superficie para naves de luz 20m. Elaboración propia.

De las imágenes 7.26 y 7.27, se observa que para pórticos de luz de 20 metros, la solución que mayor peso presenta por metro cuadrado, es la de separaciones entre pórticos de 6 metros.

Por el contrario, las longitudes de correas de 4 y 5 metros, presentan valores similares hasta una superficie de 650m<sup>2</sup>. A partir de ahí hasta 900m<sup>2</sup>, la solución de menor peso es la que presenta una separación entre pórticos de 5 metros. Finalmente, a partir de 900m<sup>2</sup>, la solución aconsejable es aquella que presenta una longitud de correa de 4 metros

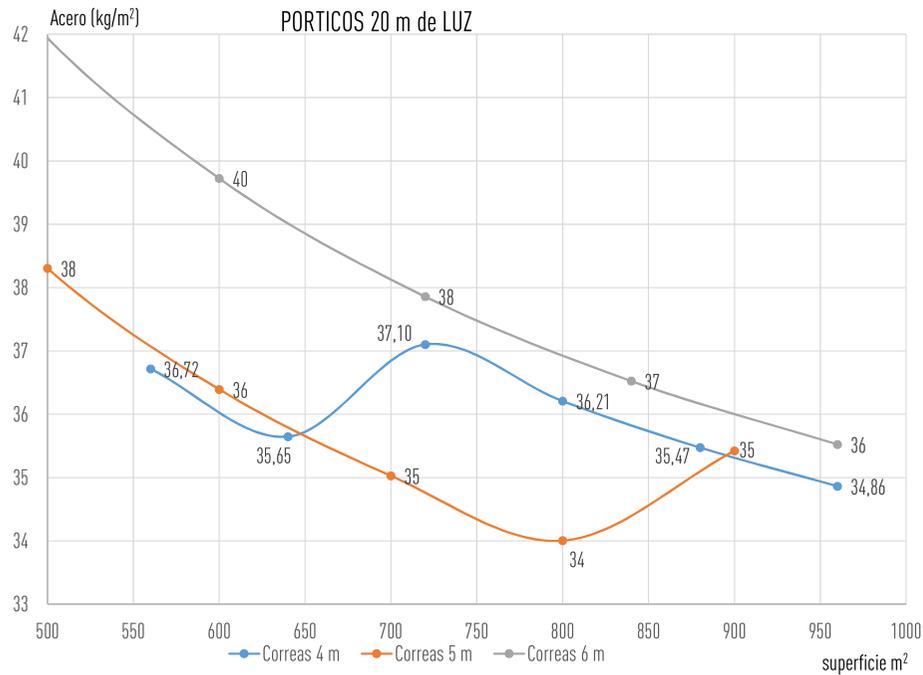


Imagen 7.28. Gráfica Acero (kg/m<sup>2</sup>)/Superficie para naves de luz 20m. Elaboración propia.

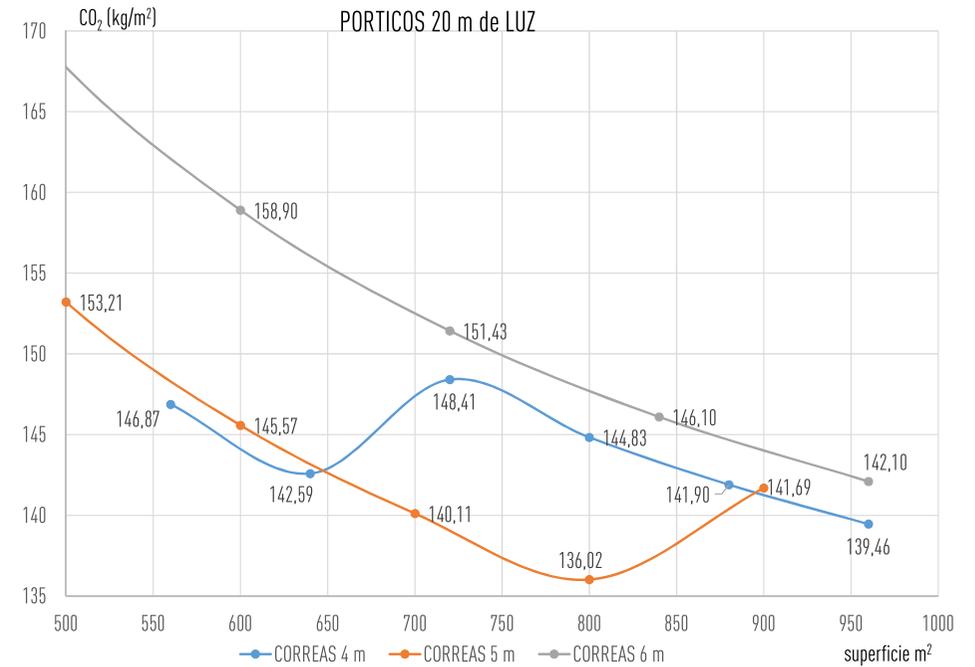


Imagen 7.29. Gráfica CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>2</sup>)/Superficie para naves de luz 20m. Elaboración propia.

De la observación de las gráficas 7.28 y 7.29, se concluye que para pórticos de luz de 20 metros, la solución que mayor peso presenta por metro cuadrado, es la de separaciones entre pórticos de 6 metros.

En cambio, la solución más económica, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es hasta 650m<sup>2</sup> la longitud de correas de 4 metros, desde entonces la separación entre correas de 5 metros presenta valores inferiores.

7.5. Gráficas resumen de todas las naves objeto de estudio.

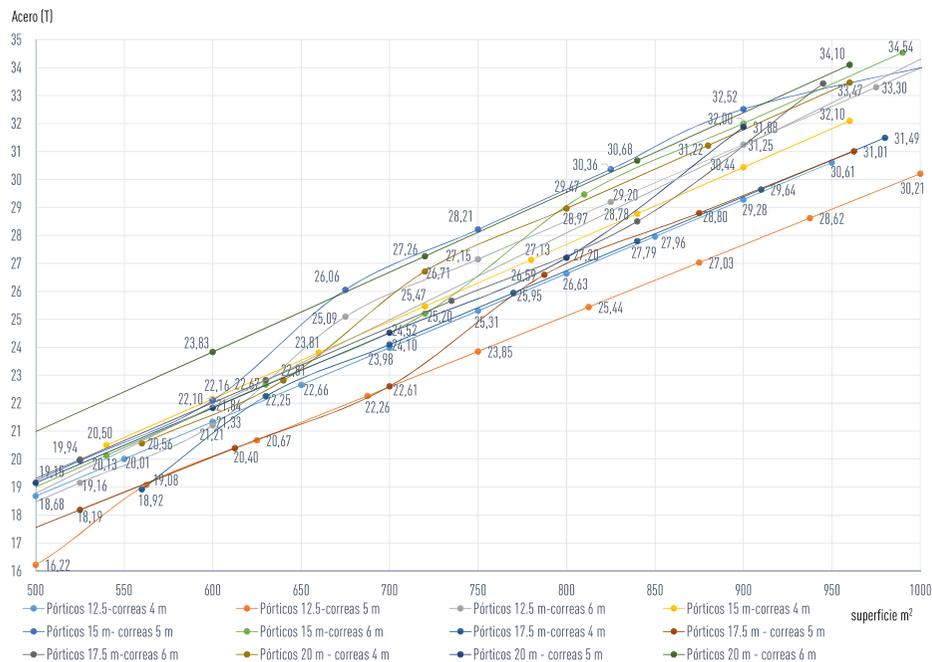


Imagen 7.30. Gráfica Acero/Superficie para todas las naves objeto de estudio. Elaboración propia.

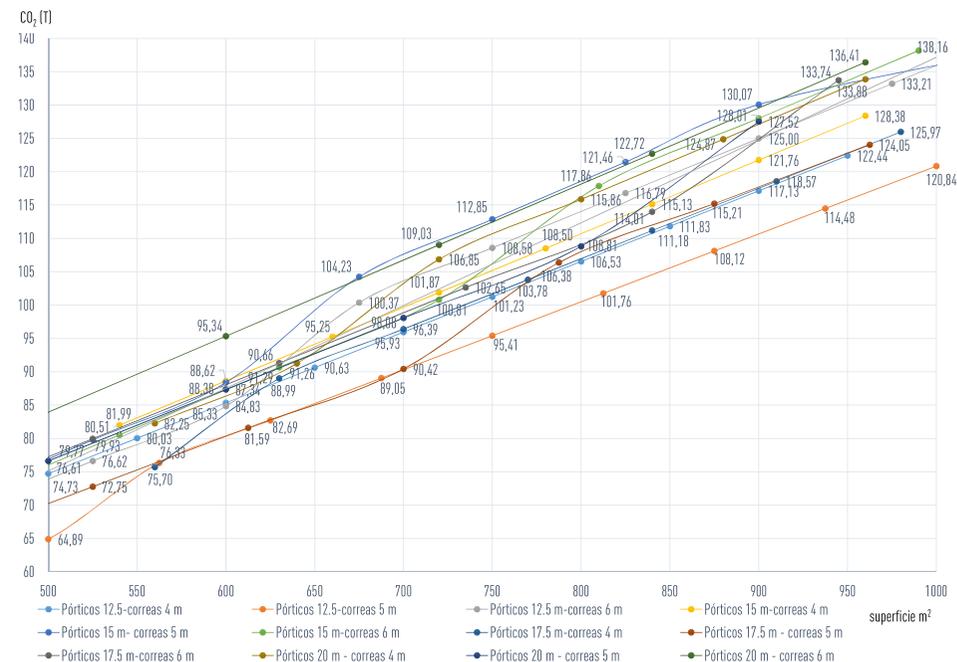


Imagen 7.31. Gráfica CO<sub>2</sub>/Superficie para todas las naves objeto de estudio. Elaboración propia.

Tras el estudio de cada separación entre pórticos y de cada luz por separado, observando que soluciones eran las óptimas en cada situación, se representan todas las opciones estudiadas en la misma gráfica. Tal y como se observa en las imágenes 7.30 y 7.31, las soluciones más económicas, desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub> son: el pórtico de 12.5 metros de luz y separación entre pórticos de 5 metros, junto al pórtico de 17.5 metros de luz y separación entre correas de 5 metros hasta una superficie de 700m<sup>2</sup>.

Por el contrario, la solución de mayor peso, es la de pórticos de 20 metros y separación entre correas de 6 metros. Además, a partir de los 650m<sup>2</sup>, el pórtico de 15 metros y separación entre correas de 5 metros, presenta valores prácticamente iguales que el pórtico 20x6.

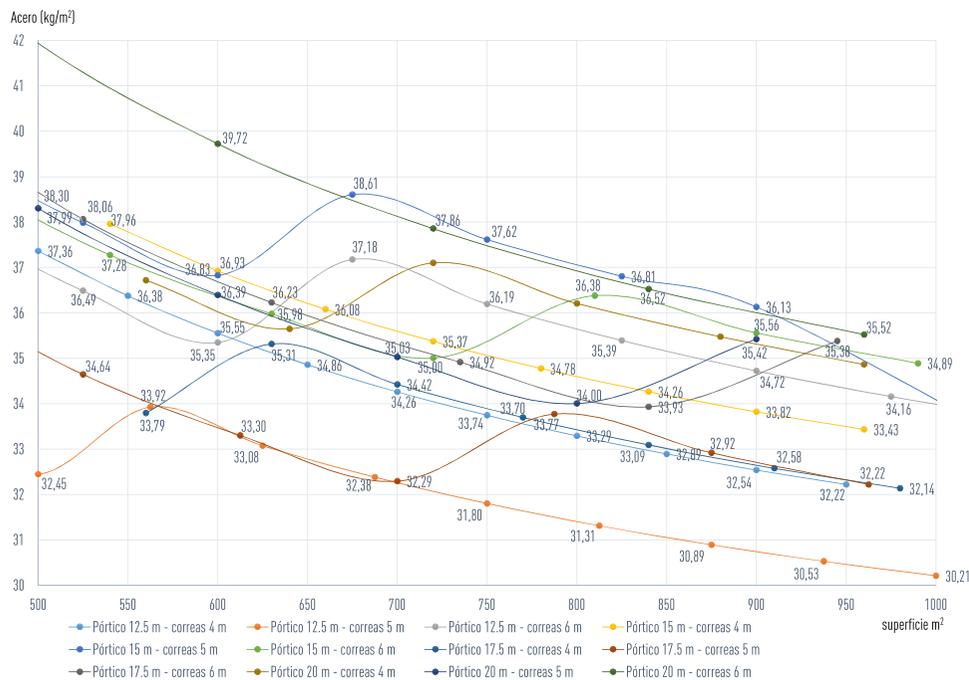


Imagen 7.32. Gráfica Acero (kg/m<sup>2</sup>)/Superficie para todas las naves objeto de estudio. Elaboración propia.

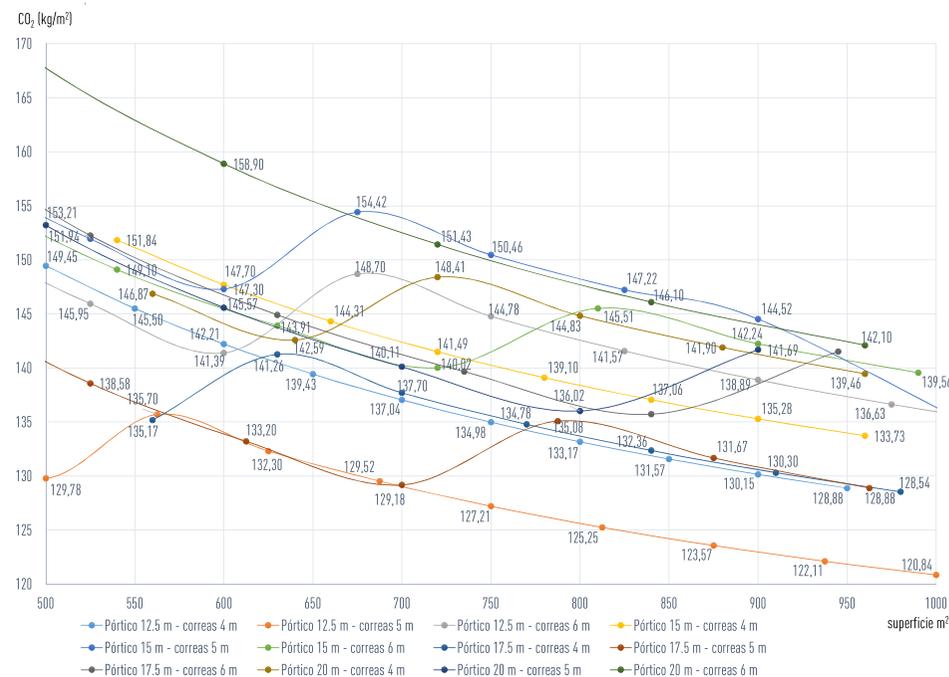


Imagen 7.33. Gráfica CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>2</sup>)/Superficie para todas las naves objeto de estudio. Elaboración propia.

A continuación, se procede al estudio de los kilos por metro cuadrado, tanto de acero como de CO<sub>2</sub>, mediante las imágenes 7.32 y 7.33. En ellas se reitera lo observado en las gráficas anteriores. Los pórticos que mejor solución presentan son: el de luz 12.5 metros y separación entre pórticos de 5 metros, en toda la franja de superficies estudiadas. Y además, para valores de 550 y 700m<sup>2</sup>, la solución de 17.5 metros y longitudes de correas de 5 metros presenta valores similares al pórtico 12,5x5.

En cambio, la solución menos recomendada por presentar pesos más elevados que el resto, y por ello presentar una huella más invasiva, es la del pórtico de 20 metros y separación entre pórticos de 6 metros. También se debe de tener en cuenta, que para superficies de 650 m<sup>2</sup> y 900m<sup>2</sup>, el pórtico de 15x5 metros presenta valores muy similares, y por tanto una solución poco idónea.

7.6. Gráficas resumen de todas las naves objeto de estudio, sin tener en cuenta el peso del arriostramiento.

Por último, a lo largo del análisis de las gráficas de los distintos casos objeto de estudio se observan saltos, que provocan un aumento de peso en la estructura. Esto se debe a que a partir de cierto número de pórticos, es necesario añadir un arriostramiento intermedio, tal y como se ha grafiado en las tablas 7.2-7.7. Por ello se aumenta el número de cruces de San Andrés en una de las crujías centrales de la nave. Se realiza una vez alcanzado los 10 pórticos.

Para comprobar que la singularidad en las gráficas se debe a la introducción del sistema de arriostramiento adicional, se procede a calcular el peso de las estructuras anteriores considerando sólo el peso de los pórticos y las correas (Imágenes 7.34 y 7.35). Se observa un comportamiento lineal en todos los pórticos y en cada una de las longitudes de correas.

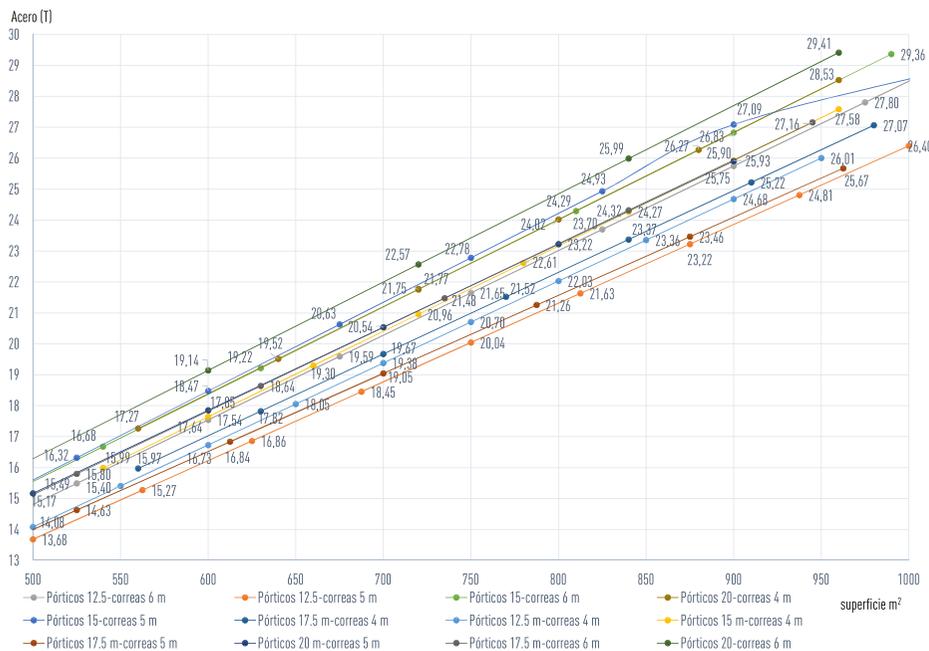


Imagen 7.34. Gráfica Acero/Superficie sin el peso del arriostramiento.

Elaboración propia.

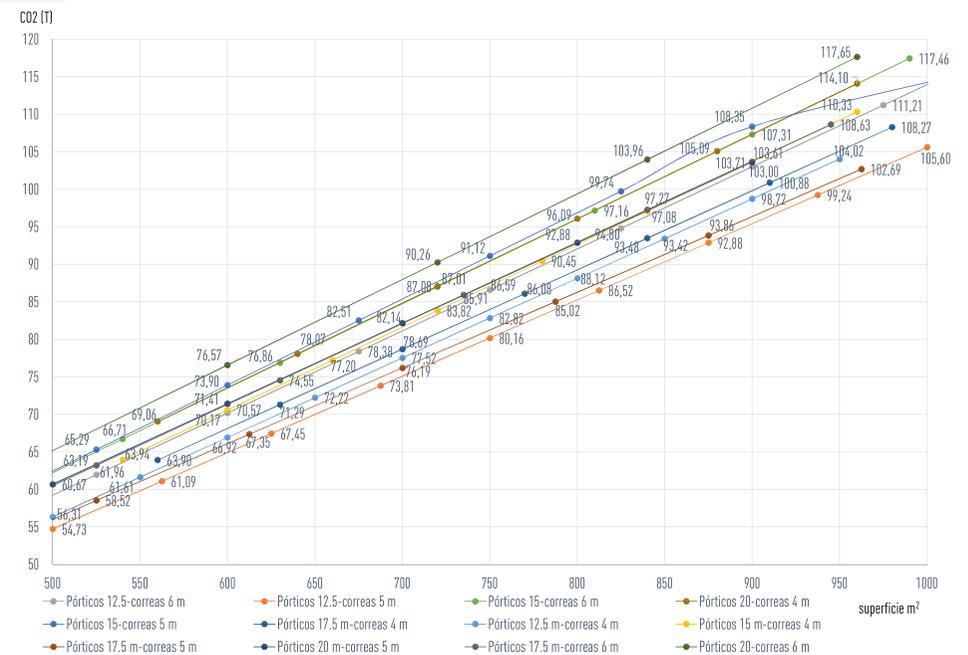


Imagen 7.35. Gráfica CO<sub>2</sub>/Superficie sin el peso del arriostramiento.

Elaboración propia.

## 8. CONCLUSIÓN

Para construir edificios que presenten menor impacto ambiental, una parte importante del proceso reside en el diseño de la estructura, prestando cuidado al dimensionado de los elementos estructurales, es posible conseguir una estructura con un peso inferior, y que por tanto, presente menor huella de carbono que otros dimensionados menos ajustados.

Tras el análisis de los resultados obtenidos en el presente, cabe destacar algunas de las geometrías que presentan soluciones óptimas para la construcción de naves industriales desde el punto de vista de las emisiones de CO<sub>2</sub>:

- Pórtico de luz 12.5 metros y longitud de correa 5 metros.
- Pórtico de luz de 17.5 metros y longitud de correa de 5 metros
- Pórtico de luz de 17.5 metros y longitud de correa de 6 metros
- Pórtico de luz de 20 metros y longitud de correa de 6 metros

De la misma forma, es importante señalar, aquellas soluciones que presentan resultados desaconsejables para construcciones sostenibles, es decir, presentan valores de huella de carbono elevados, entre ellos se encuentran:

- Pórtico de luz 12.5 metros y longitud de correa de 6 metros
- Pórtico de luz de 15 metros y longitud de correa de 5 metros
- Pórtico de luz de 20 metros y longitud de correa de 4 metros

Respecto a los dimensionados, es importante destacar los pórticos de luces de 15 metros que presentan, en general resultados peores que los pórticos de luces de 17.5 metros. Esto se debe a que ambos necesitan el mismo perfil, de forma que para la luz de 15 metros, éste queda sobredimensionado, pero el anterior no cumple.

El acero es un material que permite limitar las acciones que hasta ahora se venían produciendo en el campo de la construcción. Desde un correcto dimensionado, buscando siempre la optimización de los elementos estructurales, hasta su reciclaje, una vez alcanzado el fin de su vida útil, lo hacen un material idóneo para controlar nuestra huella medioambiental.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

AGRELO, MARÍA (2016). *Huella ambiental, huella de carbono, huella hídrica y de agua y ACV. ¿Quién es quién?* www.eco-huella.com [Consulta: 23 de agosto de 2017].

CABRERA I FAUSTO, IVAN. (2016). *Banco de pruebas de programas de cálculo de estructuras de edificación disponibles en el mercado español*. Valencia: Editorial UPV

CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (2005). *Protocolo Kyoto*. www.unfccc.int [Consulta: 23 de agosto de 2017]

DE ISLA, ANA BELÉN; MACHO, ELENA; PLAZA, FÁTIMA; RUEDAS, MIKEL; DE LA PUENTE, ANA; TRABUDUA, ITXASO; CAMPO, FRANCISCO; PUERTO, EUGENIO; OLMO, SANDRA (2014). *Más allá del Edificio del Consumo de Energía casi nulo, hallando la huella de carbono del edificio*. www.construible.es [Consulta: 23 de agosto de 2017]

GERVÁSIO, HELENA (2009). *La sustentabilidad del acero y las estructuras metálicas*. Revista Tecnología, 18-25.

LOTZ, MARCO Y BRENT, ALAN. (2012). *Carbon footprinting guide*. www.carbontrust.com [Consulta: 23 de agosto de 2017].

MINISTERIO DE FOMENTO. (2006). *EAE, Instrucción de acero estructural*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.

MINISTERIO DE FOMENTO. (2009). *Código Técnico de la Edificación (CTE). Seguridad Estructural*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.

MINISTERIO DE FOMENTO. (2009). *Código Técnico de la Edificación (CTE). Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y Acciones en la Edificación*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.

MINISTERIO DE FOMENTO. (2010). *Código Técnico de la Edificación (CTE). Seguridad Estructural: Acero*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.

MONFORT LLEONART, JOSÉ. (1995). *Pórticos metálicos: Criterios de cálculo*. Informes de la Construcción, Vol. 47 (437), pp. 33-42.

MONFORT LLEONART, JOSÉ. (2002). *Estructuras metálicas para edificación según criterios del Eurocódigo 3. Vol 1*. Valencia: Editorial UPV.

MONFORT LLEONART, JOSÉ (2006). *Estructuras metálicas para edificación. Adaptado al CTE*. Valencia: Editorial UPV.

MONFORT, JOSÉ. Y GIL, ENRIQUE. (1988). *Optimización geométrica de los pórticos a dos aguas con nudos acartelados*. Anales de Ingeniería Mecánica, 6(3), 361-366.

MONFORT LLEONART, JOSÉ; PARDO ROS, JOSÉ LUIS; GUARDIOLA VILLORA, ARIANNA (2008). *Problemas de estructuras metálicas adaptados al Código Técnico*. Valencia: Editorial UPV.

PÉREZ-GARCÍA, AGUSTÍN; ALONSO DURÁ, ALFONSO; GÓMEZ-MARTÍNEZ, FERNANDO; ALONSO AVALOS, JOSÉ MIGUEL Y LOZANO LLORET, PAU. (2015). *Architrave® 2015* [online]. Valencia, UPV. Available from: www.architrave.es

PÉREZ-GARCÍA, AGUSTÍN Y GUARDIOLA VILLORA, ARIANNA PAOLA. (2011). *Prontuario y herramientas informáticas para el cálculo de estructuras*. 3ª Edición. Valencia. Inter-tecnica Ediciones.

UNIÓN EUROPEA (2010). *Europa 2020. Objetivos*. www.mecd.gob.es [Consulta: 23 de agosto de 2017]

## 10. ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.1	Tabla de GEI y sus coeficientes de ponderación. Fuente: <i>Carbon Footprinting guide</i> .....08		
Imagen 2.1	Polígono industrial del municipio de Alboraya. Fuente: Google maps.....11		
Imagen 2.2	Pórticos adintelados. Elaboración propia.....12		
Imagen 2.3	Pórticos acartelados. Elaboración propia.....12		
Imagen 2.4	Estructura metálica de pórticos acartelados. Fuente: www.pinterest.com..12		
Imagen 2.5	Estructura metálica de pórticos acartelados. Fuente: www.gpstecnicasmetalicas.com.....12		
Imagen 2.6	Planta y alzado de los modelos estructurales de objeto de estudio con separación de pórticos de 4m. Elaboración propia.....13		
Imagen 2.7 y 2.8	Estructura de nave industrial (12,5x4) con arriostramiento. Fuente: <i>Architrave</i> ®.....14		
Imagen 2.9	Vínculos internos y externos de la estructura. Elaboración propia.....14		
Imagen 2.10	Alzado, planta y sección de la unión entre viga-soporte y apoyo de correa. Elaboración propia.....15		
Imagen 2.11	Alzado, planta y sección de la unión entre viga-viga y apoyo de correas en cumbrera. Elaboración propia.....15		
Imagen 3.1	Hipótesis de acciones permanentes (HIP01). Elaboración propia.....17		
Imagen 3.2	Hipótesis de sobrecarga de uso (HIP02). Elaboración propia.....18		
Imagen 3.3	Hipótesis de sobrecarga de nieve (HIP03). Elaboración propia.....18		
Imagen 3.4	Figura D.1. Mapa de zonas de exposición al viento. Fuente: CTE DB-SE-A.....19		
Imagen 3.5	Hipótesis de viento NORTE/SUD (HIP04). Elaboración propia.....21		
Imagen 3.6	Hipótesis de viento ESTE/OESTE presión (HIP05). Elaboración propia.....21		
Imagen 3.7	Hipótesis de viento ESTE/OESTE succión (HIP06). Elaboración propia.....21		
Imagen 4.1	Deformada de pórtico. Elaboración propia.....25		
Imagen 4.2	Deformada de correa. Elaboración propia.....25		
Imagen 4.3	Desplomes horizontales. Fuente: CTE DB-SE.....26		
Imagen 5.1	Pórticos simples biempotrados a la misma altura con dintel a dos aguas y carga repartida vertical. Fuente: <i>Prontuario y herramientas informáticas para cálculo de estructuras</i> .....28		
Imagen 5.2	Modelización de soporte y orientación de perfil. Elaboración propia.....26		
Imagen 5.3	Orientación de perfil. Elaboración propia.....31		
Imagen 5.4.	Orientación de perfil. Elaboración propia.....32		
Imagen 5.5.	Pórticos simples biempotrados a la misma altura con dintel a dos aguas y carga repartida vertical. Fuente: <i>Prontuario y herramientas informáticas para cálculo de estructuras</i> .....33		
Imagen 5.6.	Sección resistente. Fuente: <i>Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión</i> (Guardiola, A).....34		
Imagen 5.7.	Porción de alma objeto de cálculo. Fuente: <i>Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión</i> (Guardiola, A).....35		
Imagen 5.8.	Alma rigidizada frente a las cargas puntuales. Fuente: <i>Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión</i> (Guardiola, A).....35		
Imagen 5.9	Correa biarticulada con carga repartida en toda la barra. Fuente: <i>Prontuario y herramientas informáticas para cálculo de estructuras</i> .....38		
Imagen 5.10.	Sección resistente. Fuente: <i>Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión</i> (Guardiola, A).....39		
Imagen 5.11.	Porción de alma objeto de cálculo. Fuente: <i>Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión</i> (Guardiola, A).....40		
Imagen 5.12.	Alma rigidizada frente a las cargas puntuales. Fuente: <i>Dimensionado de vigas de acero solicitadas a flexión</i> (Guardiola, A).....40		
Imagen 6.1	Modelado estructura. Fuente: Captura de Pantalla de <i>AutoCAD</i> ® y la aplicación de dibujo de <i>Architrave</i> ® .....45		
Imagen 6.2	Menú del programa de dibujo Fuente: <i>Architrave</i> ® .....45		
Imagen 6.3	Menú del programa de modelo de <i>Architrave</i> ®. Fuente: <i>Architrave</i> ® .....45		
Imagen 6.4	Menú del programa de modelo de <i>Architrave</i> ® (desplegable de áreas de reparto). Fuente: <i>Architrave</i> ® .....45		
Imagen 6.5	Cocientes de longitud de pandeo a longitud de barra. Fuente: CTE DB-SE-A.....46		
Imagen 6.6	Dibujo de pórtico. Elaboración propia.....46		
Imagen 6.7	Orientación de perfil. Elaboración propia.....46		
Imagen 6.8	Orientación y modelado del soporte. Elaboración propia.....46		
Imagen 6.9	Longitudes de correas, modelado y deformada. Elaboración propia.....47		
Imagen 6.10	Estructura arriostrada. Elaboración propia.....47		
Imagen 6.11	Estructura no-arriostrada. Elaboración propia.....47		
Imagen 6.12	Dibujo de pórtico 12,5x4. Elaboración propia.....48		
Imagen 6.13	Dibujo de pórtico 12,5x5. Elaboración propia.....49		
Imagen 6.14	Dibujo de pórtico 12,5x6. Elaboración propia.....50		
Imagen 6.15	Dibujo de pórtico 15x4. Elaboración propia.....51		
Imagen 6.16	Dibujo de pórtico 15x5. Elaboración propia.....55		
Imagen 6.17	Dibujo de pórtico 15x6. Elaboración propia.....53		
Imagen 6.18	Dibujo de pórtico 17,5x4. Elaboración propia.....54		

Imagen 6.19	Dibujo de pórtico 17,5x5. Elaboración propia.....	55	Imagen 7.17	Gráfica CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para naves de luz 12.5m. Elaboración propia.....	78
Imagen 6.20	Dibujo de pórtico 17,5x6. Elaboración propia.....	56	Imagen 7.18	Gráfica Acero/Superficie para naves de luz de 15m. Elaboración propia.....	79
Imagen 6.21	Dibujo de pórtico 20x4. Elaboración propia.....	57	Imagen 7.19	Gráfica CO <sub>2</sub> /Superficie para naves de luz 15m. Elaboración propia.....	79
Imagen 6.22	Dibujo de pórtico 20x5. Elaboración propia.....	58	Imagen 7.20	Gráfica Acero (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para naves de luz de 15m. Elaboración propia.....	80
Imagen 6.23	Dibujo de pórtico 20x6. Elaboración propia.....	59	Imagen 7.21	Gráfica CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para naves de luz 15m. Elaboración propia.....	80
Imagen 7.1	Captura de pantalla ITeC. Fuente: <a href="https://itec.es/nouBedec.e/">https://itec.es/nouBedec.e/</a> .....	60	Imagen 7.22	Gráfica Acero/Superficie para naves de luz de 17,5m. Elaboración propia.....	81
Imagen 7.2	Gráfica Acero/Superficie para longitudes de correa de 4m. Elaboración propia.....	71	Imagen 7.23	Gráfica CO <sub>2</sub> /Superficie para naves de luz 17,5m. Elaboración propia.....	81
Imagen 7.3	Gráfica CO <sub>2</sub> /Superficie para longitudes de correa de 4m. Elaboración propia.....	71	Imagen 7.24	Gráfica Acero (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para naves de luz de 17.5m. Elaboración propia.....	82
Imagen 7.4	Gráfica Acero(kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para longitudes de correa de 4m. Elaboración propia.....	72	Imagen 7.25	Gráfica CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para naves de luz 17.5m. Elaboración propia.....	82
Imagen 7.5	Gráfica CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para longitudes de correa de 4m. Elaboración propia.....	72	Imagen 7.26	Gráfica Acero/Superficie para naves de luz de 20m. Elaboración propia.....	83
Imagen 7.6	Gráfica Acero/Superficie para longitudes de correa de 5m. Elaboración propia.....	73	Imagen 7.27	Gráfica CO <sub>2</sub> /Superficie para naves de luz 20m. Elaboración propia.....	83
Imagen 7.7	Gráfica CO <sub>2</sub> /Superficie para longitudes de correa de 5m. Elaboración propia.....	73	Imagen 7.28	Gráfica Acero (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para naves de luz de 20m. Elaboración propia.....	84
Imagen 7.8	Gráfica Acero(kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para longitudes de correa de 5m. Elaboración propia.....	74	Imagen 7.29	Gráfica CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para naves de luz 20m. Elaboración propia.....	84
Imagen 7.9	Gráfica CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para longitudes de correa de 5m. Elaboración propia.....	74	Imagen 7.30	Gráfica Acero/Superficie para todas las naves objeto de estudio. Elaboración propia.....	85
Imagen 7.10	Gráfica Acero/Superficie para longitudes de correa de 6m. Elaboración propia.....	75	Imagen 7.31	Gráfica CO <sub>2</sub> /Superficie para todas las naves objeto de estudio. Elaboración propia.....	85
Imagen 7.11	Gráfica CO <sub>2</sub> /Superficie para longitudes de correa de 6m. Elaboración propia.....	75	Imagen 7.32	Gráfica Acero (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para todas las naves objeto de estudio. Elaboración propia.....	86
Imagen 7.12	Gráfica Acero(kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para longitudes de correa de 6m. Elaboración propia.....	76	Imagen 7.33	Gráfica CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para todas las naves objeto de estudio. Elaboración propia.....	86
Imagen 7.13	Gráfica CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para longitudes de correa de 6m. Elaboración propia.....	76	Imagen 7.34	Gráfica Acero/Superficie sin el peso del arriostamiento. Elaboración propia.....	87
Imagen 7.14	Gráfica Acero/Superficie para naves de luz de 12,5m. Elaboración propia.....	77	Imagen 7.35	Gráfica CO <sub>2</sub> /Superficie sin el peso del arriostamiento. Elaboración propia.....	87
Imagen 7.15	Gráfica CO <sub>2</sub> /Superficie para naves de luz 12,5m. Elaboración propia.....	77			
Imagen 7.16	Gráfica Acero (kg/m <sup>2</sup> )/Superficie para naves de luz de 12.5m. Elaboración propia.....	78			

## 11. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Parámetros urbanísticos de un sector industrial tipo. (Cabrera, 2016). Elaboración propia.....	11	Tabla 5.9	nave 15x6. Elaboración propia.....	31
Tabla 2.2	Altura de cumbrera de cada modelo. Elaboración propia.....	13	Tabla 5.10	Coefficientes C1. Fuente: Monfort, 2006, página 125.....	33
Tabla 2.3	Características mecánicas del catálogo de panel HUT, Aceralia. Elaboración propia.....	13	Tabla 5.11	Curvas de pandeo lateral. Fuente: CTE DB-SE-A.....	34
Tabla 3.1	Valores característicos de las sobrecargas de uso. Fuente: CTE-DB-SE-AE, tabla 3.1.....	17	Tabla 5.12	Coefficientes de pandeo ( $\chi$ ). Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.3.....	34
Tabla 3.2	Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas. Fuente: CTE DB-SE-AE, tabla 3.8.....	18	Tabla 5.13	Coefficientes de pandeo ( $\chi$ ). Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.3.....	35
Tabla 3.3	Presión dinámica del viento ( $q_p$ ). Elaboración propia.....	19	Tabla 5.14	Hoja de cálculo del predimensionado de viga más desfavorable CASO 1. Elaboración propia.....	36
Tabla 3.4.	Corrección de velocidad básica en función del periodo de servicio. Fuente CTE DB-SE-AE, tabla D.1.....	19	Tabla 5.15	Hoja de cálculo del predimensionado de viga más desfavorable CASO 2. Elaboración propia.....	37
Tabla 3.5	Coefficiente para tipo de entorno. Fuente: CTE DB-SE-AE, tabla D.2.....	19	Tabla 5.16	Coefficientes C1. Fuente: Monfort, 2006, página 125.....	38
Tabla 3.6.	Hoja de cálculo de los coeficientes de exposición ( $c_e$ ). Elaboración propia.....	19	Tabla 5.17	Curvas de pandeo lateral. Fuente: CTE DB-SE-A.....	39
Tabla 3.7	Paramentos verticales. Fuente CTE-SE-AE, tabla D.3.....	20	Tabla 5.18	Coefficientes de pandeo ( $\chi$ ). Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.3.....	39
Tabla 3.8	Hoja de cálculo del coeficiente de presión ( $c_p$ ) en paramentos verticales. Elaboración propia.....	20	Tabla 5.19	Coefficientes de pandeo ( $\chi$ ). Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.3.....	40
Tabla 3.9	Paramentos horizontales. Fuente: CTE DE-SE-AE, tabla D.6.....	20	Tabla 5.20	Hoja de cálculo de predimensionado de correa de luz 4m. Elaboración propia....	41
Tabla 3.10	Hoja de cálculo del coeficiente de presión ( $c_p$ ) en paramentos horizontales. Elaboración propia.....	21	Tabla 5.21	Hoja de cálculo de predimensionado de correa de luz 5m. Elaboración propia....	42
Tabla 3.11	Hipótesis consideradas para el estudio. Elaboración propia.....	22	Tabla 6.1	Hoja de cálculo de predimensionado de correa de luz 6m. Elaboración propia....	43
Tabla 4.1	Coefficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones. Fuente CTE DB-SE, tabla 4.1.....	24	Tabla 6.2	Cálculo de coeficientes de distribución. Elaboración propia.....	46
Tabla 4.2.	Coefficientes de simultaneidad ( $\psi$ ). Fuente: CTE DB-SE, tabla 4.2.....	24	Tabla 6.3	Hojas de cálculo de coeficientes $\beta$ . Elaboración propia.....	46
Tabla 4.3	Combinaciones ELU consideradas para el estudio. Elaboración propia.....	25	Tabla 6.4	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 12.5x4. Elaboración propia.....	48
Tabla 4.4	Combinaciones ELS. Elaboración propia.....	26	Tabla 6.5	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 12.5x5. Elaboración propia.....	49
Tabla 5.1	Curva de pandeo en función de la sección transversal. Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.2.....	29	Tabla 6.6	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 12.5x6. Elaboración propia.....	50
Tabla 5.3	Coefficientes C1. Fuente: Monfort, 2006, página 125.....	29	Tabla 6.7	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 15x4. Elaboración propia.....	51
Tabla 5.4	Curva de pandeo lateral. Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.6.....	29	Tabla 6.8	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 15x5. Elaboración propia.....	52
Tabla 5.5	Coefficientes de momento equivalente. Fuente: CTE DB-SE-A, tabla 6.10.....	30	Tabla 6.9	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 15x6. Elaboración propia.....	53
Tabla 5.6	Coefficientes $k_y$ . Fuente: CTE-SE-A, tabla 6.9.....	30	Tabla 6.10	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 17.5x4. Elaboración propia.....	54
Tabla 5.7	Hoja de cálculo de predimensionado de soporte más desfavorable de la nave 15x6. Elaboración propia.....	31	Tabla 6.11	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 17.5x5. Elaboración propia.....	55
Tabla 5.8	Hoja de cálculo de predimensionado de soporte más desfavorable de la nave 15x6. Elaboración propia.....	31		Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 17.5x6. Elaboración propia.....	56

Tabla 6.12	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 20x4. Elaboración propia.....	57
Tabla 6.13	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 20x5. Elaboración propia.....	58
Tabla 6.14	Hoja de cálculo resumen de dimensionado del pórtico 20x6. Elaboración propia.....	59
Tabla 6.15	Tabla resumen del pórtico 12.5x4. Elaboración propia.....	60
Tabla 6.16	Tabla resumen del pórtico 12.5x5. Elaboración propia.....	60
Tabla 6.17	Tabla resumen del pórtico 12.5x6. Elaboración propia.....	60
Tabla 6.18	Tabla resumen del pórtico 15x4. Elaboración propia.....	60
Tabla 6.19	Tabla resumen del pórtico 15x4. Elaboración propia.....	60
Tabla 6.20	Tabla resumen del pórtico 15x4. Elaboración propia.....	60
Tabla 6.21	Tabla resumen del pórtico 17.5x4. Elaboración propia.....	61
Tabla 6.22	Tabla resumen del pórtico 17.5x4. Elaboración propia.....	61
Tabla 6.23	Tabla resumen del pórtico 17.5x4. Elaboración propia.....	61
Tabla 6.24	Tabla resumen del pórtico 20x4. Elaboración propia.....	61
Tabla 6.25	Tabla resumen del pórtico 20x4. Elaboración propia.....	61
Tabla 6.26	Tabla resumen del pórtico 20x4. Elaboración propia.....	61
Tabla 6.27	Dimensionado final de las barras que componen los distintos modelos estructurales. Elaboración propia.....	62
Tabla 7.1	Información ambiental sobre el acero. Elaboración propia.....	64
Tabla 7.2	Naves de luz 12.5m y 15m con separación entre pórticos de 4m. Elaboración propia.....	65
Tabla 7.3	Naves de luz 17.5m y 20m con separación entre pórticos de 4m. Elaboración propia.....	66
Tabla 7.4	Naves de luz 12.5m y 15m con separación entre pórticos de 5m. Elaboración propia.....	67
Tabla 7.5	Naves de luz 17.5m y 20m con separación entre pórticos de 5m. Elaboración propia.....	68
Tabla 7.6	Naves de luz 12.5m y 15m con separación entre pórticos de 6m. Elaboración propia.....	69
Tabla 7.7	Naves de luz 17.5m y 20m con separación entre pórticos de 4m. Elaboración propia.....	70