



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Reformado técnico del pórtico central de una nave industrial de  
estructura metálica**

Autora: Dña. Laura Cuesta Fernández

Tutor: D. Antolín Lorenzana Iban

Valladolid, 1 de Septiembre, 2022



## RESUMEN

En este trabajo de fin de máster se ha realizado una comparación entre estructuras metálicas de dos tipologías distintas, de una nave industrial dedicada a fabricar vigas aligeradas. El objetivo es comparar una estructura metálica de pórticos estándar con una estructura de pórticos aligerados, y ver si se puede conseguir las mismas prestaciones estructurales, así como mantener el coste económico con una estructura más estética.

**Palabras clave:** Nave industrial, estructura metálica, vigas aligeradas, Cype, generador de pórticos.

## ABSTRACT

In this master's project, a comparison has been made between different types of steel structures in an industrial building dedicated to the production of boyd beams. The objective is to compare a metal structure with IPE profiles with a structure boyd beams, and to see if we can achieve the same structural performance, as well as maintain the economic cost with a more aesthetic structure.

**Keywords:** Industrial building, metal structure, boyd beams, Cype, portico generator



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>4</b>
<b>3. OBJETIVO</b>	<b>6</b>
<b>4. DESCRIPCIÓN DE LA NAVE Y PROCESO PRODUCTIVO</b>	<b>7</b>
4.1 Emplazamiento	7
4.2 Distribución de planta	8
4.3 Cerramientos	11
4.4 Proceso productivo	12
4.5 Beneficios de la venta de vigas	16
<b>5. CÁLCULO ESTRUCTURAL</b>	<b>19</b>
5.1 Diseño de la estructura en Cype 3D	19
5.2 Estructura metálica estándar	33
5.3 Estructura metálica de vigas aligeradas	40
<b>6. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS Y PROPUESTA DE REFORMADO TÉCNICO</b>	<b>46</b>
6.1 Valoración de los resultados	46
6.2 Propuesta de reformado técnico	48
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>52</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo es un ejercicio académico para finalizar el máster de ingeniería industrial en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid. No obstante, también constituye un ejercicio profesional donde se plantea un “reformado técnico”, que es un tipo de informe técnico muy usual en el ejercicio de la actividad profesional de ingenieros industriales en el sector de la construcción.

El proyecto consiste en comparar la solución técnica y económica que se logra con una nave de estructura metálica estándar frente a una de vigas de alma aligerada. La ocupación de la nave es la fabricación de vigas aligeradas a partir de planchas de acero siguiendo un proceso de corte, soldadura y pintura hasta conseguir el producto final.



*Figura 1. 1 Local con vigas boyd [1]*

El interés en este cambio viene de varias ideas:

- Dada la dedicación de dicha nave sería buen marketing para esta empresa que su propio producto se use en su infraestructura.
- Trabajar en un lugar que de aspecto de limpio, ordenado y atractivo para la vista, facilita a los empleados sentirse cómodos y así conseguir un mejor ambiente de trabajo, mejorando el estado de ánimo de estos, y una producción más eficiente por el mismo motivo.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada



*Figura 1. 2 Pórtico con dintel y pilares alveolados [1]*

Se pretende simular una situación lo más real posible, partiendo de una nave de 60 m de largo, 20 m de ancho y 12 m de alto con la cubierta a dos aguas con un 20% de pendiente.



*Figura 1. 3 Nave con cerramientos de panel sándwich [18]*

El terreno a utilizar será de uso industrial en el polígono San Cristóbal en Valladolid y se precisará de distintas estaciones en el proceso de fabricación, que se desarrollarán más adelante.

Conociendo todo esto, se procederá al cálculo de las distintas estructuras consideradas para la nave. Teniendo en cuenta para dicho cálculo las cargas de viento y de nieve serán mayores o menores dependiendo de donde este ubicada la nave, las cargas de uso del edificio según su dedicación y las cargas de peso propio de la misma estructura. Y para finalizar se hará una comparativa global de los dos tipos de estructura teniendo en cuenta los diferentes aspectos valorados y obtenidos en el cálculo.

## 2. ANTECEDENTES

El sector de la construcción es una de las actividades más antiguas de la sociedad. Comenzó siendo algo liviano, como un escudo para refugiarse del viento y la lluvia, hasta llegar a desafiar a la física con algunas construcciones modernas.

Teniendo en cuenta los diferentes materiales utilizados a lo largo de la historia, la madera ha estado siempre presente, usada para construir chozas o cabañas con las ramas de los árboles de la zona. [15] Si bien es cierto que la madera sin tratar no tiene mucha durabilidad y por eso la tendencia, dentro de los materiales en la construcción, es conseguir un aumento de la durabilidad de los mismos.

Después de las ramas se hizo uso de materiales naturales como la arcilla y la piedra y, por último, entraron en juego los materiales sintéticos como el ladrillo, el hormigón, el plástico y el metal. Cientos de años después, aparecieron máquinas específicas para facilitar la mano de obra (poleas y grúas básicas), lo que permitió reducir el tiempo de construcción. [20]

A mediados del siglo XVIII obtuvimos hierro fundido en grandes cantidades, adquiriendo una importancia decisiva. Más adelante, se logró desarrollar maquinaria que funcionaba con combustibles fósiles (montacargas, retroexcavadora, ...), que permitieron realizar obras en lugares de mayor dificultad y mejorar las condiciones de trabajo. [5]

El acero, sustituyó al hierro al unir las características de resistencia y elasticidad, mejorando las prestaciones de la madera y el hormigón. Uno de los usos más importantes de las vigas de acero es como parte de la construcción de puentes. Los primeros puentes que se construyeron se hacían con vigas de madera, que puede soportar grandes esfuerzos de tracción, lo que no sucede con otros materiales tradicionales pétreos y cerámicos, como el ladrillo. En 1840, se construyó el primer puente con vigas de hierro. Luego, en general, se utilizaron vigas de acero, que podemos encontrar en casos tan emblemáticos y gigantes como el de Brooklyn en Nueva York. [12]

En los años 30, la escasez de material y los elevados precios del acero, propiciaron la creación de las vigas de alma aligerada, como lo son las alveolares, también llamadas vigas Boyd, en honor a su creador Geoffrey Murray Boyd. Las vigas que tenía en stock para realizar el trabajo tenían el ancho de ala requerido para que la grúa pudiera desplazarse, pero ninguna tenía la suficiente rigidez como para poder salvar la luz que necesitaba abarcar. [3] Boyd decidió cortar las vigas estándar en doble T que tenía mediante una línea quebrada de tal manera que las dos partes resultantes podían superponerse y soldarse. Con ello, se conseguía obtener un perfil de mayor inercia (resistencia) sin añadir material y por tanto, manteniendo el peso del perfil original. [6]

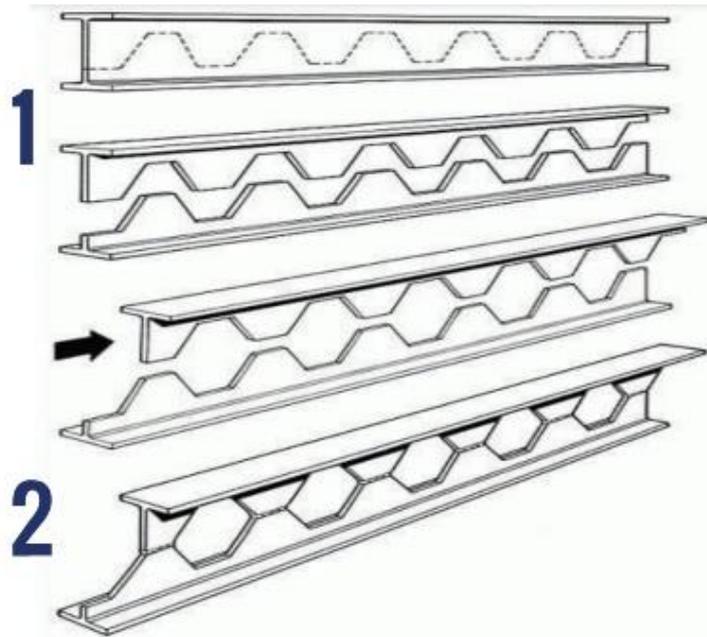


Figura 2. 1 - Proceso de fabricación de una viga Boyd [4]

Actualmente son cada vez más las estructuras que incluyen vigas aligeradas, tanto por el efecto visual que producen como por la ventaja real a la hora de salvar grandes luces. Normalmente se usan en grandes naves industriales, polideportivos, pasarelas, etc. Además de las ventajas de aumento de rigidez, módulo resistente y disminución de flecha, las conducciones para las instalaciones pueden atravesar estas vigas por los huecos, con lo que también existe un ahorro de espacio. [6] Con el tiempo, la construcción sigue avanzando y mejora la eficacia de las herramientas que ahora tenemos. Se espera que la automatización también impacte en este sector, trayendo nuevos cambios y mejoras.



Figura 2. 2 - Nave industrial actual [25]

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

### 3. OBJETIVO

El presente trabajo de fin de máster tiene como objeto principal demostrar las competencias adquiridas en la titulación del Máster de Ingeniería industrial realizando un reformado técnico estructural.

Se ha optado por aprender a usar la herramienta de Cype para el cálculo de estructuras, consiguiendo con esto proponer una alternativa a la estructura estándar de acero de una nave industrial, planteándose un reformado técnico con vigas de alma aligerada, teniendo estas que soportar las mismas cargas que con la estructura estándar, las cuales son: peso propio, viento y nieve, además de tener que cumplir con la normativa pertinente.

El objetivo es conseguir un aspecto interior de la nave más actual y estético, además de ser un perfecto marketing para esta empresa. Logrando así un ambiente de trabajo más agradable y confortable, provocando en el trabajador un sentimiento de bienestar haciendo que mejore su rendimiento y sus resultados.

Por último, se realizará un análisis económico para comprobar que las alternativas propuestas ofrecen ventajas competitivas con respecto a la estructura estándar, además de la estética perseguida, que en el caso de optar por ellas repercutirán en el presupuesto final.



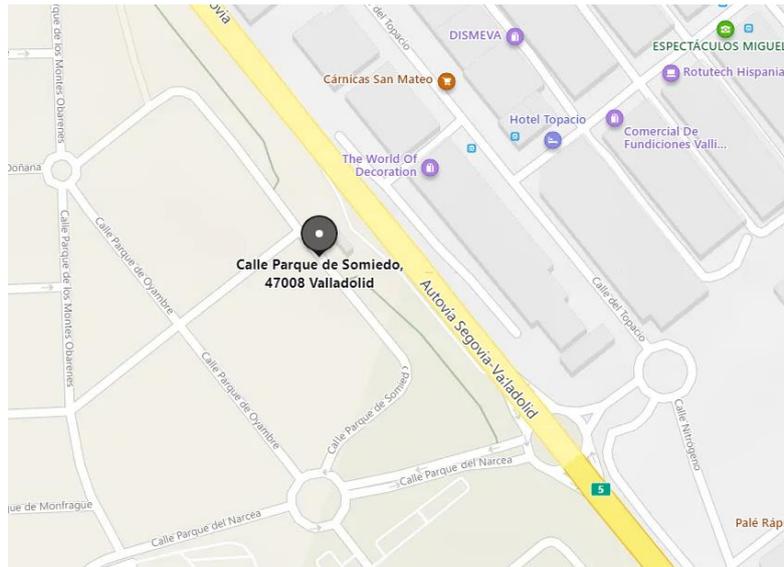


Figura 4. 2 Localización de la parcela de la nave

La parcela tiene un total de 8523 m<sup>2</sup> de superficie, lo que permite tener superficie suficiente para maniobras de carga y descarga necesarias, dado que se recomienda disponer de 32 m desde el punto de carga hasta el final de la parcela. También se cuenta con espacio para respetar los retranqueos y se tiene previsto un lugar destinado para estacionamiento.

Cómo se comentaba, se ha elegido este emplazamiento como el adecuado dada su cercanía y fácil acceso a la principal autovía que cruza Valladolid, la A-601, que une esta ciudad con Madrid y Segovia. Además, de estar relativamente cerca de otros núcleos industriales como el de Madrid a 203 km por la A-601 (como hemos dicho anteriormente) y Bilbao y Burgos a 280 km y 132 km, respectivamente, por la A-62.

#### 4.2 Distribución de planta

Como se ha introducido al comienzo del trabajo, se trata de una nave de 60 m de largo, 20 m de ancho y 12 m de alto con la cubierta a dos aguas con un 20% de pendiente. Está compuesta por 12 pórticos (2 hastiales y 10 centrales) con un módulo de 6 m entre ellos. La altura de cumbrera son 12 m por lo que, con el 20% de inclinación de cubierta, los pilares miden 10 m de largo.

La parcela de la nave y la misma en el interior está distribuida en zonas diferenciadas según la actividad que se va a llevar a cabo en cada espacio. A continuación, se describe la distribución de la nave:

- ◆ Accesos
  - El acceso peatonal a las oficinas para los empleados y los visitantes se efectuará a través del recibidor de la fachada sureste.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

- El acceso a la nave para los empleados se realizará por la misma fachada, accediendo a la zona de vestuarios primero.
- El acceso a la nave para carga y descarga de la materia prima y las vigas terminadas se efectuará por dos puertas diferenciadas desde la fachada noroeste las cuales darán acceso al almacén de materia prima y producto terminado, respectivamente.
- El acceso a la parcela se efectuará según la Figura 4.3 siguiente.

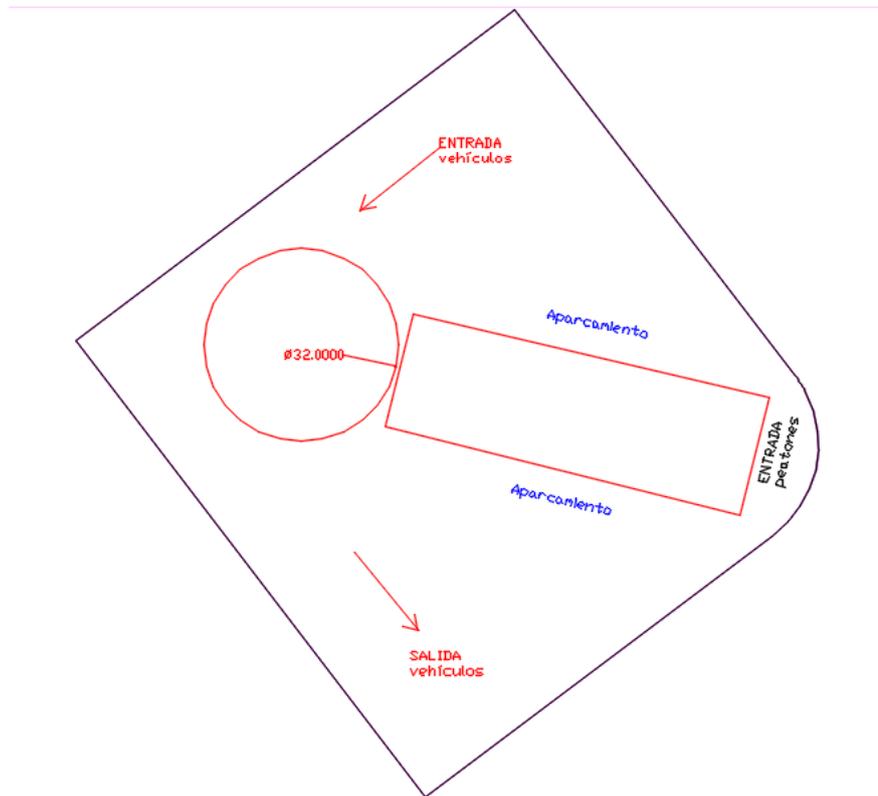


Figura 4. 3 Accesos a la parcela

◆ Planta baja

Dentro de la planta baja se pueden diferenciar 4 zonas como se puede ver en la Figura 4.5.

- Zona de Carga y Descarga y almacén. Se ha decidido posicionar los almacenes de materia prima y producto terminado en el mismo lado de la nave, aprovechando el espacio de maniobra de los camiones para la carga y descarga del material y beneficiándose de la distribución en U elegida.
- Zona de producción. Se encuentra en el centro de la nave, en ella se puede diferenciar diferentes áreas:

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

-Área de corte. La materia prima que se recepciona es en forma de planchas metálicas, las cuales hay que cortar para crear las vigas. Exactamente las operaciones realizadas en esta área son:

- Cortar la geometría para alveolar las vigas.
- Cortar las vigas para que tengan la longitud deseada.
- Cortar las placas de testa.



*Figura 4. 4 Proceso de corte de una chapa de acero [22]*

-Área de soldadura. Dentro de esta área las operaciones que se llevarán a cabo son:

- Soldar la geometría para alveolar las vigas.
- Soldar las placas de testa a las vigas.

-Área de taladro. Donde se aligeran las almas de las vigas.

-Área de pintura. Las vigas una vez terminadas se pintan para protegerlas de la corrosión.

- Zona de residuos. La viruta del área de taladrado y cualquier otro residuo que pueda producirse se desecha en esta zona para su posterior eliminación.
- Zona de vestuarios. Los empleados acceden a la nave por esta zona. También se encuentran aquí los aseos y las duchas, además de la sala de máquinas.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

◆ Planta primera

En esta planta la única zona que se puede diferenciar es la zona de oficinas, por encima de la zona de vestuarios, y consta de 90m<sup>2</sup> de superficie. Consta de despachos y sala de reuniones.

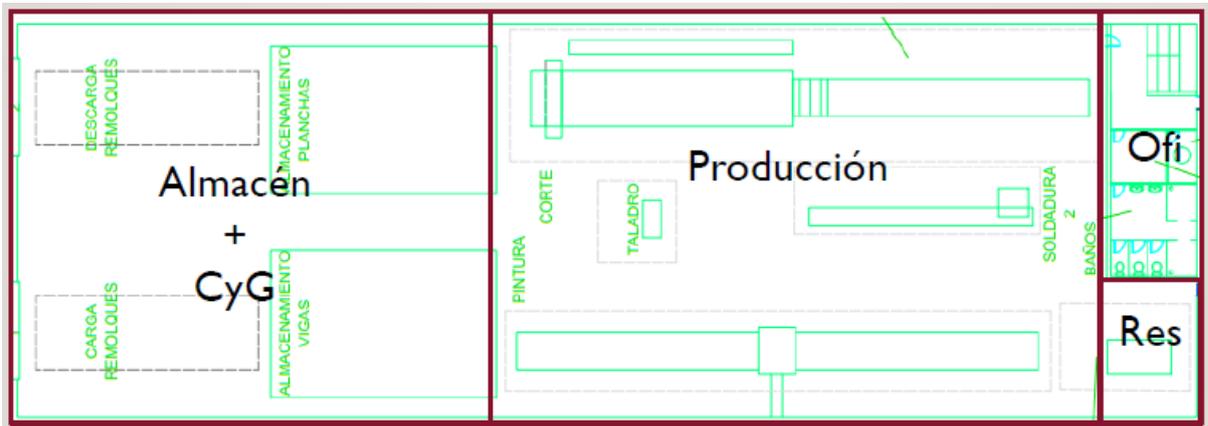


Figura 4. 5 Distribución de planta proceso industrial de la nave

### 4.3 Cerramientos

Los cerramientos que se han elegido para la construcción de esta nave son de panel sándwich, tanto para la cubierta como para la fachada. Se ha elegido este tipo de material porque son rápidos de instalar y baratos.

El panel de cubierta esta grecado por la parte superior, para esta construcción se ha elegido un panel de 3 grecas que tiene 60mm de espesor. Tiene un peso propio de 11 kg/m<sup>2</sup>.

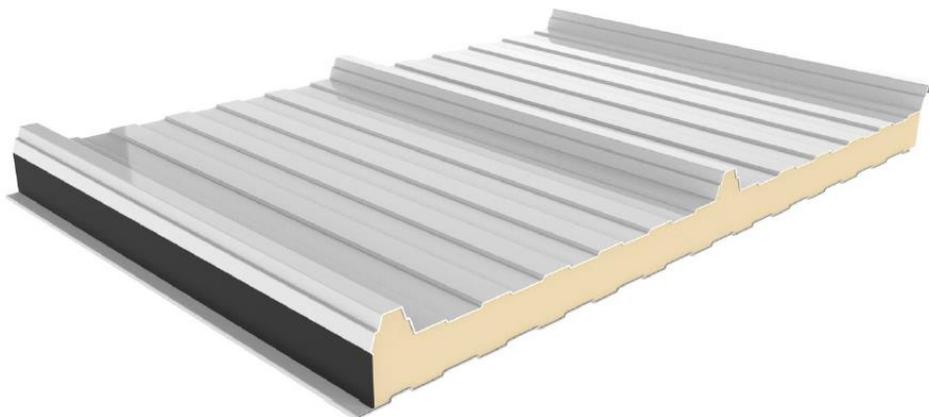


Figura 4. 6 Panel sándwich para cubierta

El panel de fachada es plano a diferencia del panel de cubierta, en este caso se ha elegido un panel que tiene 60 mm de espesor como en el caso anterior. Tiene un peso propio de 12 kg/m<sup>2</sup>.



*Figura 4. 7 Panel sándwich para fachada*

#### 4.4 Proceso productivo

En este punto se va a desarrollar más detalladamente cómo funciona la empresa dedicada a fabricar vigas de alma aligerada. Para comenzar se va a especificar la materia prima de la que se parte para fabricar las vigas.

Como materia prima se tienen planchas de acero de diferentes longitudes dependiendo del perfil que se vaya a fabricar, en este caso ninguna plancha sobrepasará los 12 m de largo ya que la nave está diseñada teniendo en cuenta esas dimensiones.

Se fabrican perfiles de alma aligerada partiendo de las dimensiones de perfiles IPE, por ejemplo:

- ◆ **Viga IPE 240:**
  - Kilos: 31.47 kg/m
  - Longitud: 6 m
  - Altura “h” : 240 mm

- Ancho "b" : 120 mm
- "e" : 6.2 mm
- "e1" : 9.8 mm

◆ Viga IPE 300:

- Kilos: 43.26 kg/m
- Longitud: 6 m
- Altura "h" : 300 mm
- Ancho "b" : 150 mm
- "e" : 7.1 mm
- "e1" : 10.70 mm

◆ Viga IPE 360:

- Kilos: 58.53 kg/m
- Longitud: 6 m
- Altura "h" : 360 mm
- Ancho "b" : 170 mm
- "e" : 8 mm
- "e1" : 12.70 mm

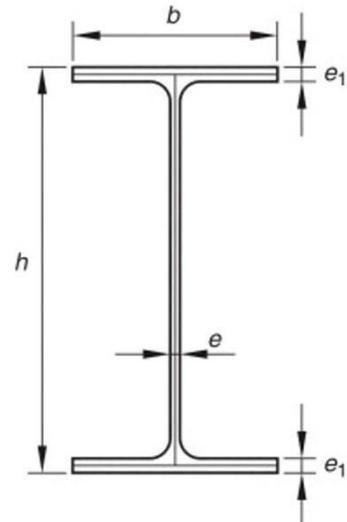


Figura 4. 8 - Dimensiones Perfil IPE

◆ Viga IPE 400:

- Kilos: 567.96 kg/m
- Longitud: 6 m
- Altura "h" : 400 mm
- Ancho "b" : 180 mm
- "e" : 8.6 mm
- "e1" : 13.50 mm



Figura 4. 9 Perfil IPE

Conociendo estas dimensiones se puede estimar la cantidad de acero que se necesita de materia prima. Se hará la estimación del coste de materia prima partiendo de unas planchas de 9 m de largo y 2,5 m de ancho. Cogiendo como referencia un perfil IPE360, se puede calcular cuántas alas y cuántas almas podemos cortar de una plancha. Considerando el ancho “b” de cada ala y la altura “h” menos el espesor de las alas “e1” tenemos:

- ◆ **Viga IPE 360:**
  - Almas/ plancha - 7
  - Par de alas/plancha - 7

Partiendo de esto, se va a estimar el volumen de producción que soporta la fábrica. Se sabe que el cuello de botella se sitúa en el área de soldadura debido a que las máquinas de las que se precisa son:

- Máquina de corte CNC 1 cabezal, 6 kW, 14 m x 1 m en planta, **1 m/mto/10 mm.**

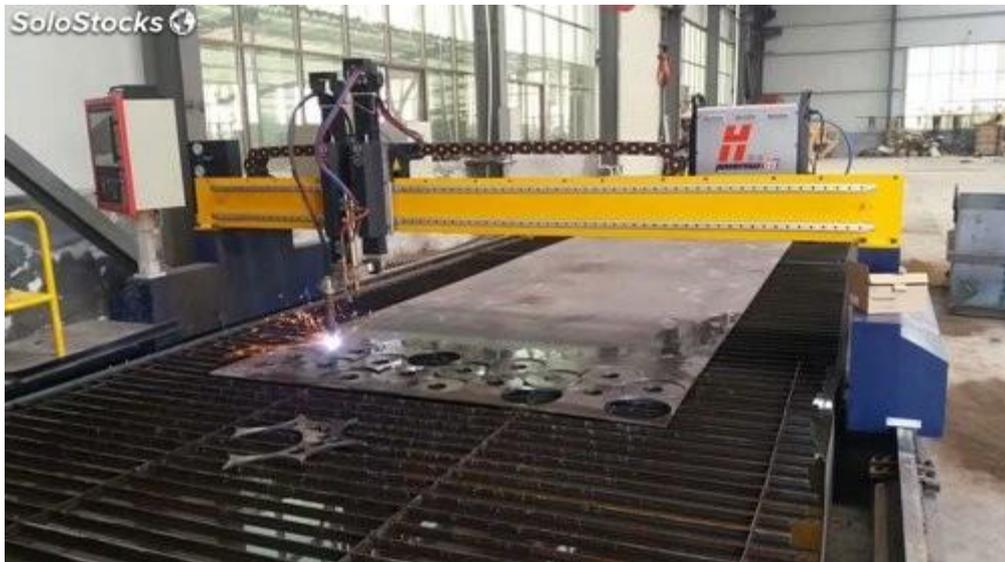


Figura 4. 10 Máquina de corte CNC [23]

- Máquina de soldadura CNC 1 cabezal, 50 kW, 14 m x 1 m en planta, **0.5 m/mto/10 mm.**



Figura 4. 11 Máquina de soldadura CNC [10]

Con los datos conocidos se puede saber cuántas vigas se pueden fabricar en un día, en una jornada de 16 horas repartidas en dos turnos diferentes. Se debe tener en cuenta que si el espesor de la plancha supera los 10 mm hay que dar dos pasadas, por lo que el tiempo de soldadura se duplicará.

Por último, el número de vigas fabricadas en un día laboral se calculará como:

$$\text{Nº vigas} = \frac{16h \cdot \frac{60\text{min}}{h}}{\text{tiempo en hacer una viga}}$$

Por lo tanto, se tiene lo siguiente:

- ◆ Para las Vigas IPE 360 de 9 metros de longitud:
  - Velocidad real= 0.64 m/min
  - Longitud a soldar= 36 m
  - Tiempo en hacer una viga= 75.59 min
  - Vigas fabricadas en un día= 8.5
  - Vigas fabricadas en una semana (redondeando)= 42

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

Las planchas de las que se parte como materia prima son de 9 m de largo con un ancho de 2.5 m como se había dicho anteriormente. A la semana se necesitarán 12 planchas de 9 m de longitud. Lo que supone 624 planchas al año.



*Figura 4. 12 Garaje con vigas aligeradas con los alveolos hexagonales [7]*

#### **4.5 Beneficios de la venta de vigas**

Para hacer un cálculo aproximado del beneficio anual de esta empresa se va a tener en cuenta los sueldos brutos de los empleados, el consumo de la maquinaria utilizada, el coste de la materia prima y por último los ingresos que se producirán de la venta de las vigas de alma aligerada.

Recordando lo descrito en el punto 2.2 de este documento, según la distribución de planta presentada, se cuenta con un trabajador por área de trabajo:

- 1 trabajador en el área de corte
- 1 trabajador en el área de taladrado
- 1 trabajador en el área de soldadura
- 1 trabajador en el área de pintura

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

Esto suma un total de 4 operarios en planta más un encargado por turno, teniendo en cuenta que se va a contar con dos turnos diferentes, hace un total de 8 operarios y dos encargados.

Suponiendo que los operarios ganan 25.000€ brutos anuales y los encargados 35.000€, se tendrá un gasto al año en salarios de 270.000€.

La fábrica cuenta con una máquina para cada área de trabajo teniendo el siguiente coste cada una:

- Máquina de corte CNC de 6kW, con unas dimensiones de 14 m por 1 m en planta. Tiene una velocidad de corte de 1 m/min por cada 10 milímetros. Tiene un precio de 40.000€ y se deduce un 4% del coste en mantenimiento anual.
- Máquina de soldadura CNC de 50 kW, con unas dimensiones de 14 m por 1 m en planta. Tiene una velocidad de soldadura de 0.5 m/min por cada 10 mm a partir de 10 mm de anchura de la placa debe dar 2 pasadas. Tiene un precio de 150.000€ y se deduce un 6% del coste en mantenimiento anual.
- Máquina de taladrado de 25.4 kW. Puede alcanzar las 3000 rpm. Tiene un coste de unos 30.000€ y se estima un 5% de coste en mantenimiento. [10]
- Máquina de pintado de 90 kW. Tiene una velocidad de 0.5 a 4 mm/min. Tiene un precio de 11.000€ y se estima un 5% de coste en mantenimiento. [16]

Tabla 4. 1 Cálculo del coste diario producido por la maquinaria

Consumo de maquinaria	Mantenimiento	Consumo diario [kWh]	Coste [€/día]
Máquina de corte CNC	0,04	96	12,76
Máquina de soldadura CNC	0,06	800	108,37
Máquina de taladrado	0,05	406,4	54,53
Máquina de pintado/acabado	0,05	1440	193,23
<b>Total/día</b>		<b>2742,4</b>	<b>368,90</b>

En la tabla 4.1 se muestran los costes diarios de cada máquina. El consumo diario se ha calculado con el producto de la potencia con el número de horas al día que va a estar funcionando, que son 16 horas, y en el coste diario se ha tenido en cuenta el incremento por mantenimiento de cada una de las máquinas.

Contando con que los días hábiles son 250, las máquinas suponen un coste anual de 92.225€.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

El coste de la materia prima vamos a estimarlo tomando un precio de 1,40€/kg de chapa, ayudándonos de una página que nos calcula el peso de una placa de chapa por sus dimensiones [19]. Para este cálculo hemos introducido las medidas de la placa de 10 mm de espesor, ancho de 2,5 m y longitud de 9 m, y nos ha dado un peso de 1800 kg por plancha.

Teniendo en cuenta que al año tenemos 624 planchas de 9 m de largo, tenemos un consumo de 1.123.200 kg de chapa, lo que económicamente supone 1.572.480€ al año.

Como ingresos tenemos el beneficio de la venta de las vigas, cuyo precio asciende a 2,50€/kg (se ha considerado un precio mayor que el de la base de datos de Cype, ya que este año han ascendido mucho los precios y se considera obsoleta para esta estimación). Cogiendo como referencia el peso de los perfiles IPE360 tendremos que al día se venden 10.500 kg de acero, que supone 26.250€/día. Los ingresos anuales ascenderían a 6.562.500€.

En la tabla 4.2 se muestran estos últimos valores descritos y se refleja el beneficio que se llegaría a conseguir según nuestras estimaciones.

Tabla 4. 2 Cálculo del beneficio anual de la empresa

	€/año
Sueldos	- 270.000,00 €
Maquinaria	- 92.225,00 €
Materia prima	- 1.572.480,00 €
Ingresos	6.562.500,00 €
<b>Total</b>	<b>4.627.795,00 €</b>

## 5. CÁLCULO ESTRUCTURAL

### 5.1 Diseño de la estructura en Cype 3D

Para realizar este trabajo se ha decidido utilizar Cype, una herramienta de cálculo de estructuras por su gran utilidad en el mundo profesional y por realizar un cálculo lo más cercano a la realidad posible.

Contempla normas nacionales e internacionales que se aplican para realizar el cálculo, dimensionamiento y comprobación de estructuras de hormigón, acero laminado, conformado, etc., sometidas a acciones gravitatorias, viento, sismo y nieve. Dentro de las normas que tiene en cuenta están incluidas las normas vigentes y las normas derogadas que se siguen utilizando. Estas se usan para comprobar y revisar estructuras que se dimensionaron cuando eran de aplicación, o bien porque siguen siendo de aplicación en otros países distintos al de su origen. [8] En el caso de España, destacar las normas del Código Técnico de la Edificación y del Eurocódigo, aunque también contiene otras opciones dónde elegir como la norma EAE y la NTE.



Figura 5. 1 Inicio Cype

Para comenzar con el cálculo del reformado se utilizará el generador de pórticos para definir las dimensiones de la nave, las cargas a las que se va a ver sometida y también se van a calcular las dimensiones de las correas de la cubierta, decidiendo el perfil y la separación entre ellas.

Seguidamente se exportará este archivo al Cype 3D, donde se indicará la normativa que se quiere que tenga en cuenta para el cálculo, el acero que van a llevar los pilares y las vigas y la categoría de uso que se le va a dar a la nave.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

Se definen los perfiles de los pórticos importados del generador de pórticos, se añaden los pilares y las vigas que se consideren oportunas y también se añaden cruces de san Andrés y los tirantes que hagan falta.

Después se procede a indicar el coeficiente de pandeo a aquellos perfiles que no se han importado del generador de pórticos, ya que estos se importan con un coeficiente de pandeo calculado por el propio Cype. Una vez se tiene todo definido, Cype 3D resuelve la estructura devolviendo los valores de los perfiles que cumplen con la normativa para la estructura definida.

Teniendo introducido el procedimiento, se va a desarrollar como se ha procedido en el programa detallando lo máximo posible, para que se llegue a percibir el trabajo realizado.

Para comenzar, se abre el generador de pórticos, que como ya se ha dicho, es una herramienta que ayuda a ser más rápidos al crear la nave. En la primera ventana (ver Figura 5.2) se debe describir las dimensiones de los pórticos que forman la nave. En este caso, teniendo unas dimensiones de 60 m de largo, 20 m de ancho y 12 m de alto con la cubierta a dos aguas, se pueden introducir los datos que se muestran a continuación.

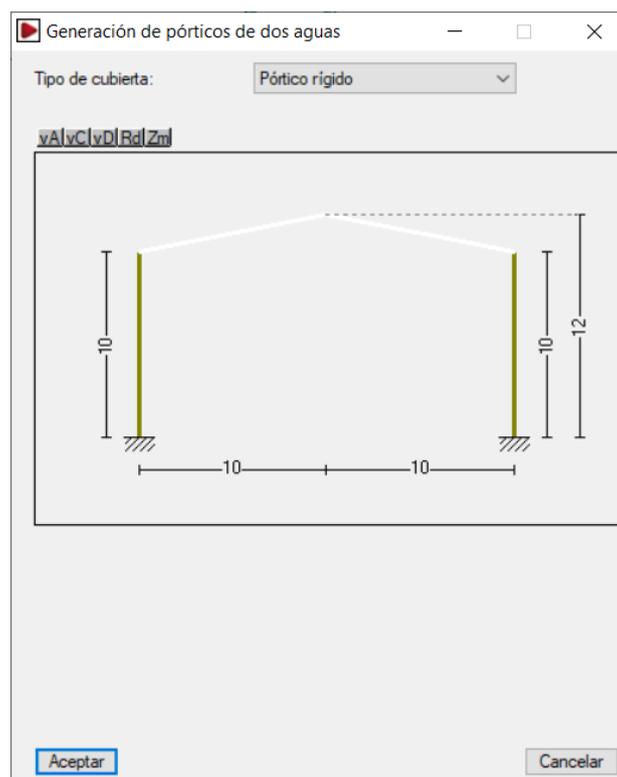


Figura 5. 2 Dimensiones de los pórticos

Una vez descrito esto, se deben introducir los datos generales de la nave. Estos son:

- El número de vanos de los que consta la nave.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

- La distancia de separación que existe entre pórticos.
- Los cerramientos que existen, en cubierta y a los laterales, introduciendo el peso de estos y si existiera algún tipo de sobrecarga. En este caso solo se ha tenido en cuenta que será transitada para mantenimiento.
- Indicar si existe sobrecarga por viento o nieve.

Para saber la sobrecarga que puede existir en la localidad de Valladolid de viento y nieve, Cype facilita un menú rápido donde tiene resumida la normativa vigente.

Para viento se abre una ventana donde se puede elegir la normativa que hay que cumplir, en este caso el Código técnico de la edificación, en la cual se rellenan los distintos apartados.

La zona eólica en la que se encuentra la nave será la A según el mapa que adjuntan (ver figura 5.3) con una velocidad básica de 26 m/s y el grado de aspereza será el IV ya que se construirá en una zona industrial.

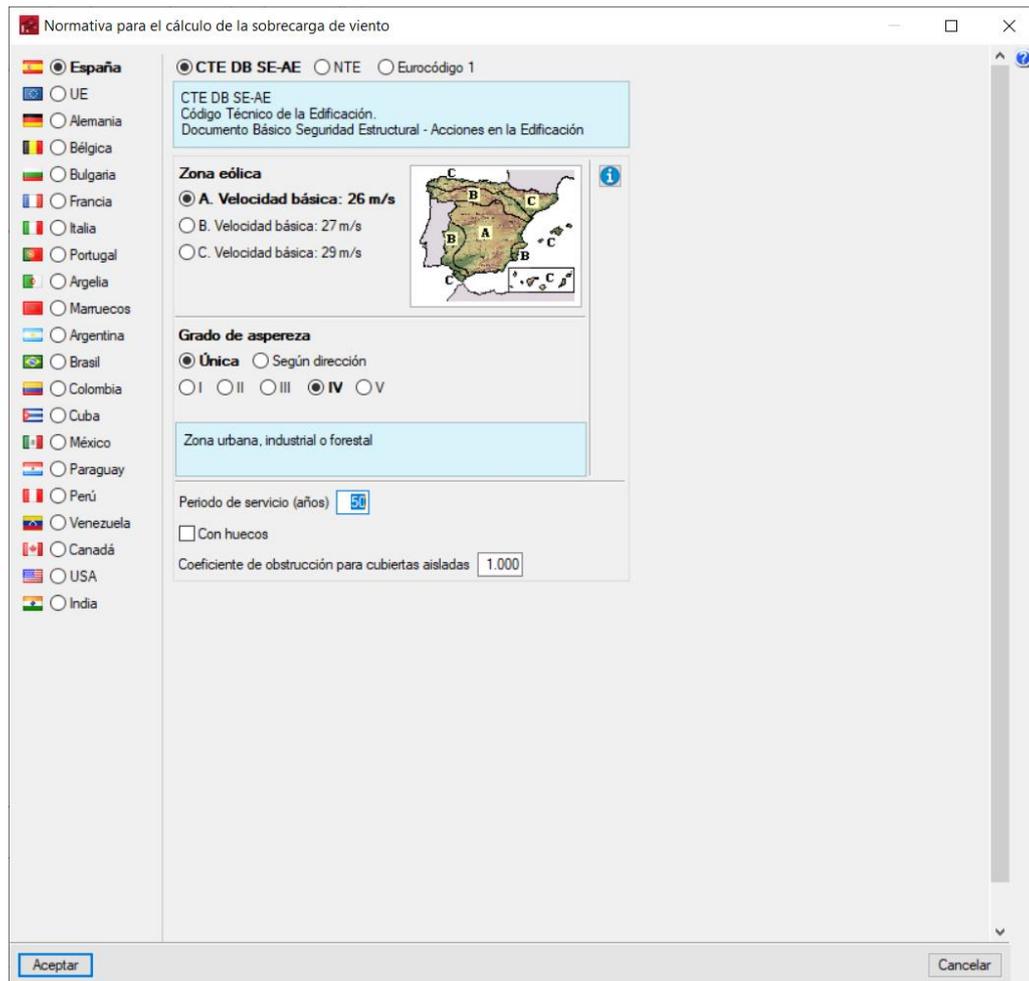


Figura 5. 3 Cálculo sobrecarga por viento

Para el cálculo de nieve (Figura 5.4) se tiene lo mismo, una ventana nueva en la que se procede de la misma manera indicando ahora la zona de clima invernal, la altitud exacta de la localidad y la exposición al viento.

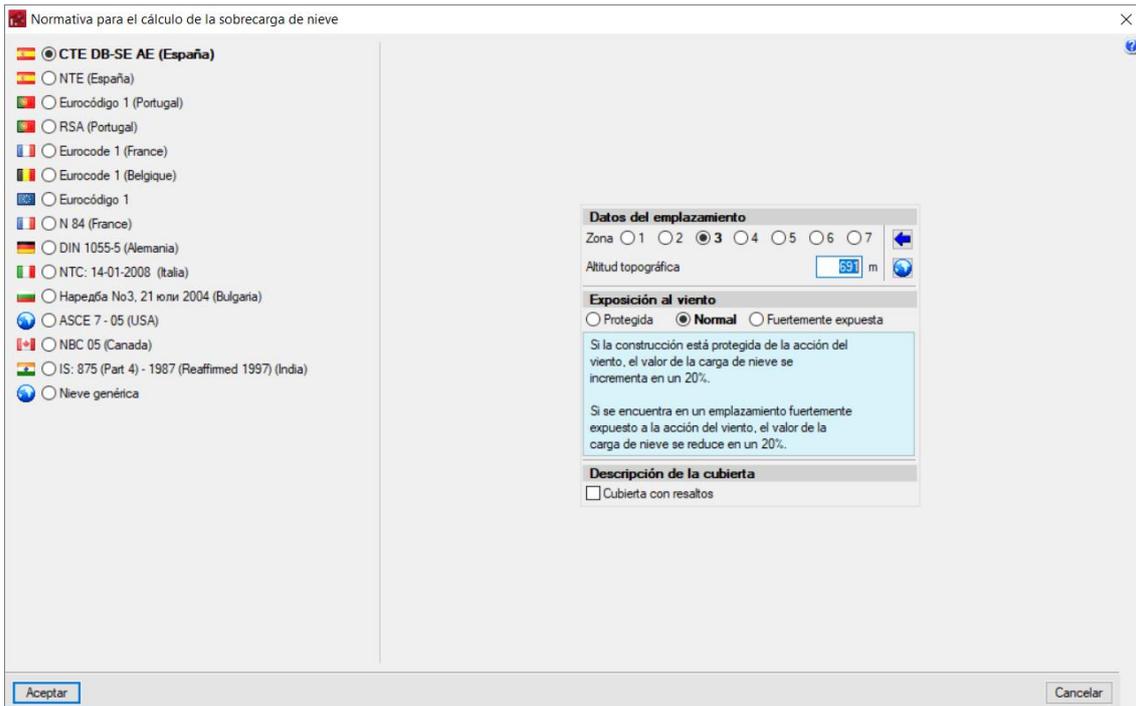


Figura 5. 4 Cálculo sobrecarga por nieve

Y para el cálculo de correas se tiene en cuenta que la nave estará en Valladolid cuya altitud es inferior de los 1000 metros y el uso para el que está destinada. (Figura 5.5)

**Datos generales**

Número de vanos: 12

Separación entre pórticos: 6.00 m

Con cerramiento en cubierta

Peso del cerramiento: 0.12 kN/m<sup>2</sup>

Sobrecarga del cerramiento: 0.40 kN/m<sup>2</sup>

Con cerramiento en laterales

Peso del cerramiento: 0.12 kN/m<sup>2</sup>

Con sobrecarga de viento: CTE DB SE-AE (España)

Con sobrecarga de nieve: CTE DB-SE AE (España)

Combinaciones de cargas para cálculo de correas

**Estados límite**

E.L.U. de rotura. Acero conformado: Eurocódigos 3 y 4

E.L.U. de rotura. Acero laminado: Eurocódigos 3 y 4

Nieve: Altitud inferior o igual a 1000 m

**Desplazamientos**

Acciones características

**Categorías de uso**

Acero laminado: Eurocódigos 3 y 4

Acero conformado: Eurocódigos 3 y 4

E. Almacenes

Aceptar Cancelar

Figura 5. 5 Datos generales de la nave y las cargas aplicadas

Para el cálculo de los perfiles de las correas se diferencia entre correas de cubierta (Figura 5.6) y correas laterales (Figura 5.7), aunque para ambas se ha escogido un perfil conformado en frío en forma de C (Figura 5.8), con acero S275 y fijación rígida, con una separación entre correas de 0.7 metros.

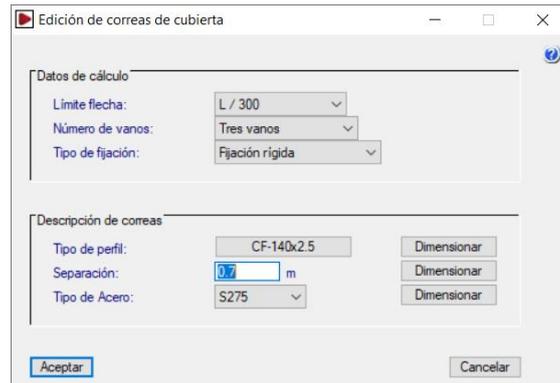


Figura 5. 6 Cálculo correas de la cubierta

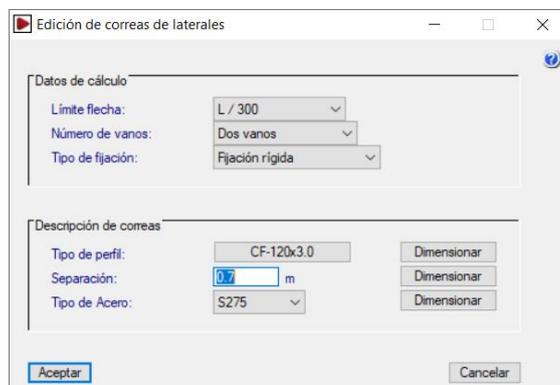


Figura 5. 7 Cálculo correas laterales

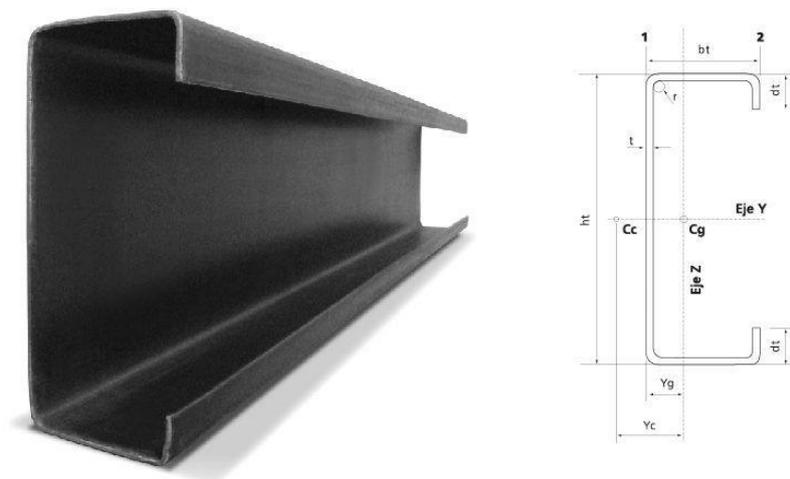


Figura 5. 8 Perfil conformado en frío en forma de C

El pórtico creado quedaría de la siguiente manera:

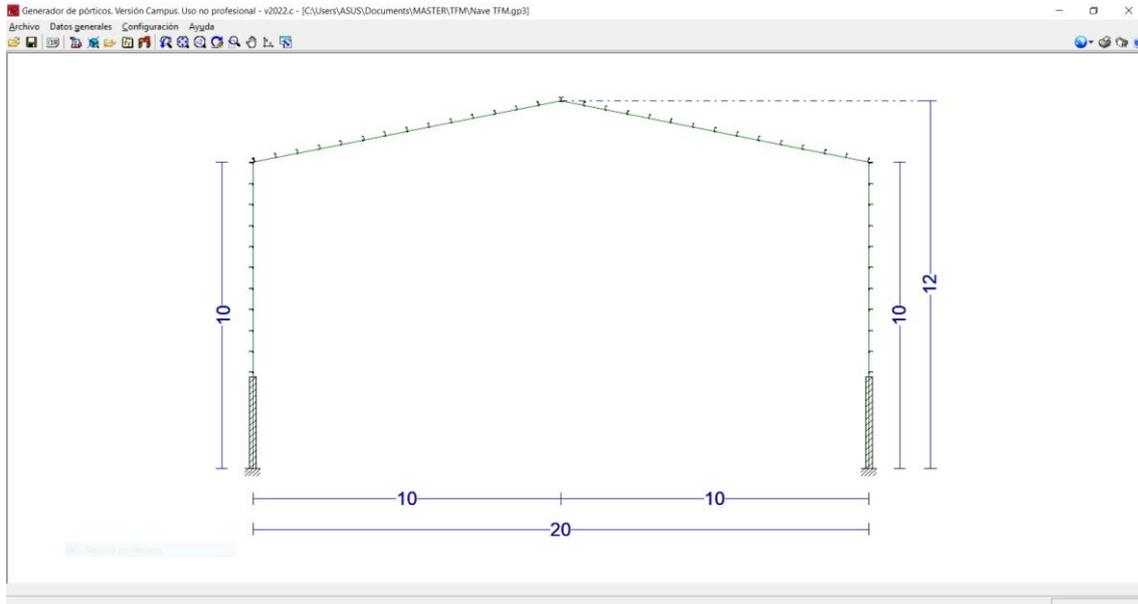


Figura 5. 9 Vista frontal de pórtico tipo

Teniendo las correas calculadas, se exporta desde el generador de pórticos a Cype 3D. Los pórticos se exportan como biempotrados y traslacionales. En la primera ventana (Figura 5.10) que aparece al exportar desde el generador se debe definir:

- ◆ La normativa que se va a cumplir.
- ◆ El tipo de materiales que se va a utilizar.
- ◆ Las acciones son las que se han exportado desde el generador de pórticos. Se va a tener en cuenta la resistencia al fuego contando con pintura intumescente aunque no se va a incluir la acción del sismo dinámico ya que la zona no lo precisa.

Figura 5. 10 Datos generales al comenzar diseño en Cype 3D

Se va a crear la estructura de la nave con perfiles IPE de acero S275, ya que la estructura original de esta construcción esta formada por dichos perfiles. Inicialmente se describirán todas las barras del mismo perfil y una vez calculada la estructura se afinará el tamaño al perfil más pequeño que resista los esfuerzos a los que esta sometido. Para facilitar el trabajo posterior se pueden agrupar las barras según su carácter y donde están ubicadas, ya sean pilares, vigas o tirantes. En este caso se han diferenciado 8 grupos.

El primer grupo se compone de los pilares de los pórticos (marcados en naranja en la figura 5.12). Estos pilares se han importado desde el generador de pórticos el cual calcula el coeficiente de pandeo de los planos xy y xz (ver Figura 5.11). Los pilares se encuentran empotrados al suelo y soldados a las vigas de la cubierta.

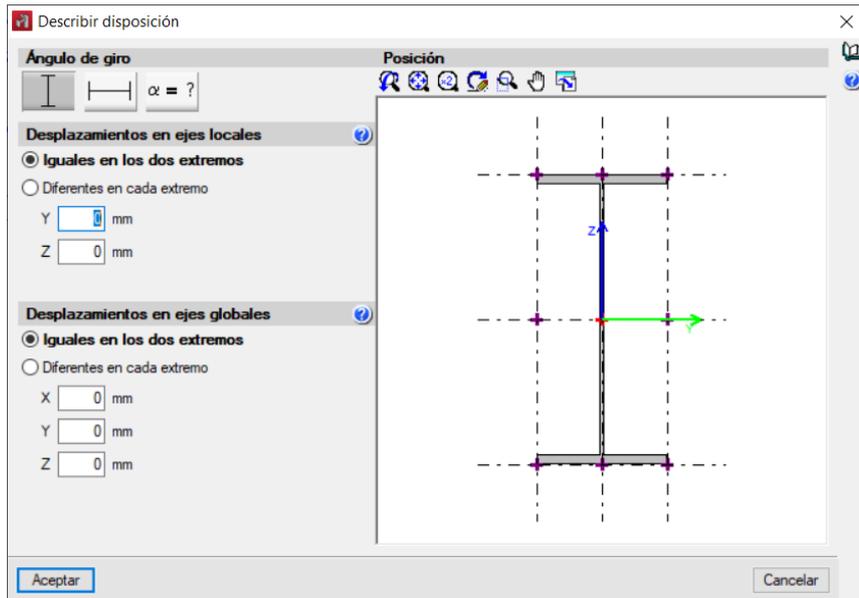


Figura 5. 11 - Disposición de los ejes en las barras de grupos 1, 2, 3, 5, 6 y 7.

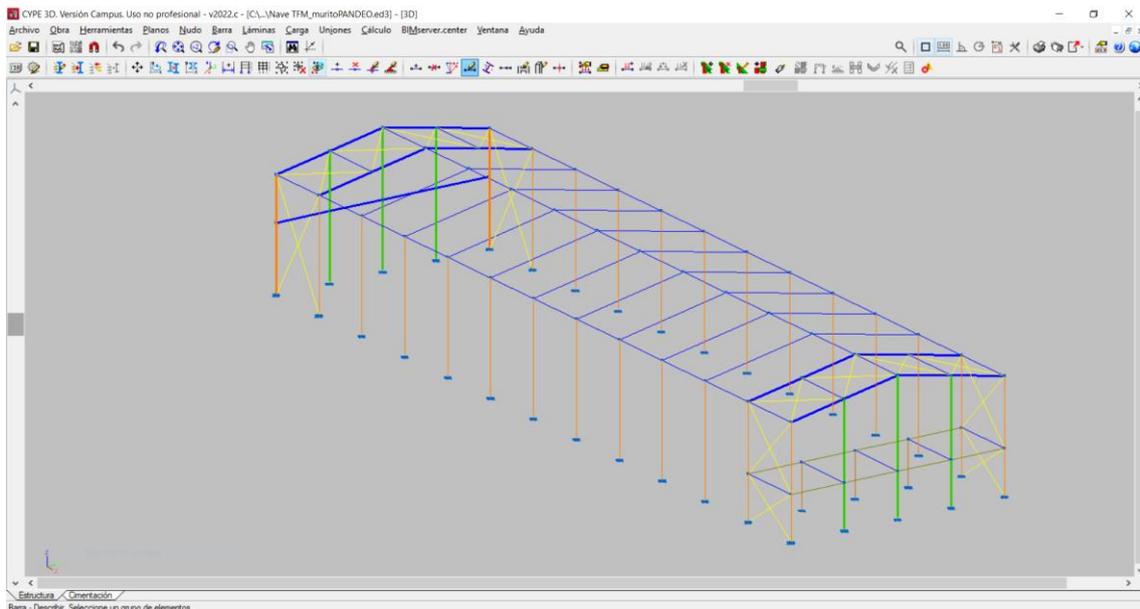


Figura 5. 12 Barras de grupo 1 – Pilares indicados en naranja

En la figura 5.13, se muestra el segundo grupo compuesto por los dinteles de los pórticos. Al exportar desde el generador de pórticos, Cype ha calculado para estas, igual que los pilares anteriores, los coeficientes de pandeo.

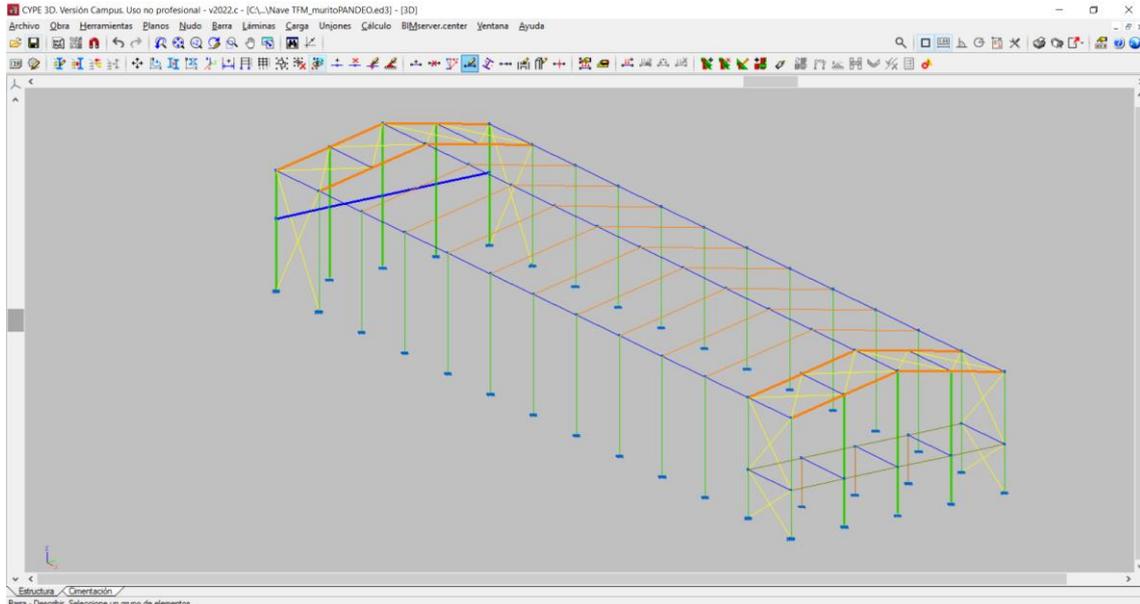


Figura 5. 13 Barras de grupo 2 – Dinteles indicados en naranja

Para el tercer grupo mostrado en la figura 5.14, formado por las vigas de atado se ha definido con un coeficiente de pandeo de 0 para el plano xy y un  $\beta=1$  en el plano xz. Como se ha explicado antes, en el generador de pórticos se han calculado las correas en la cubierta, por lo tanto, contando con estas se puede considerar que no pandearán en el plano xy.

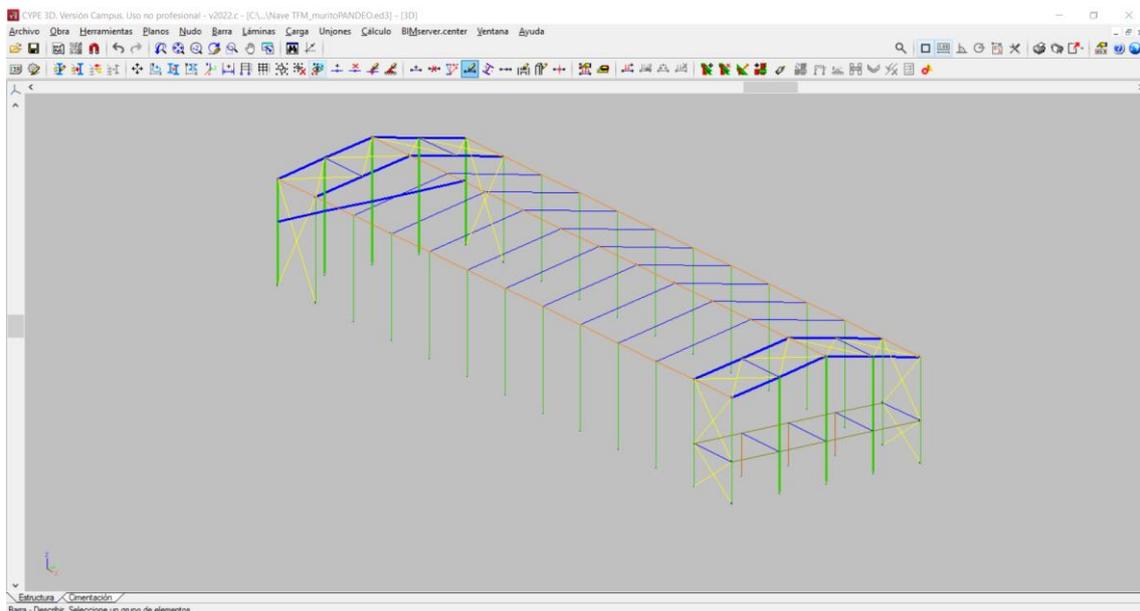


Figura 5. 14 Barras de grupo 3 – Vigas de atado indicados en naranja

El cuarto grupo está formado por los pilares que sostienen la primera planta, la zona de oficinas, (figura 5.15) se ha definido un coeficiente de pandeo de  $\beta=0.7$  en el plano xy y en el plano xz (barra empotrada en la base y articulada en el extremo).

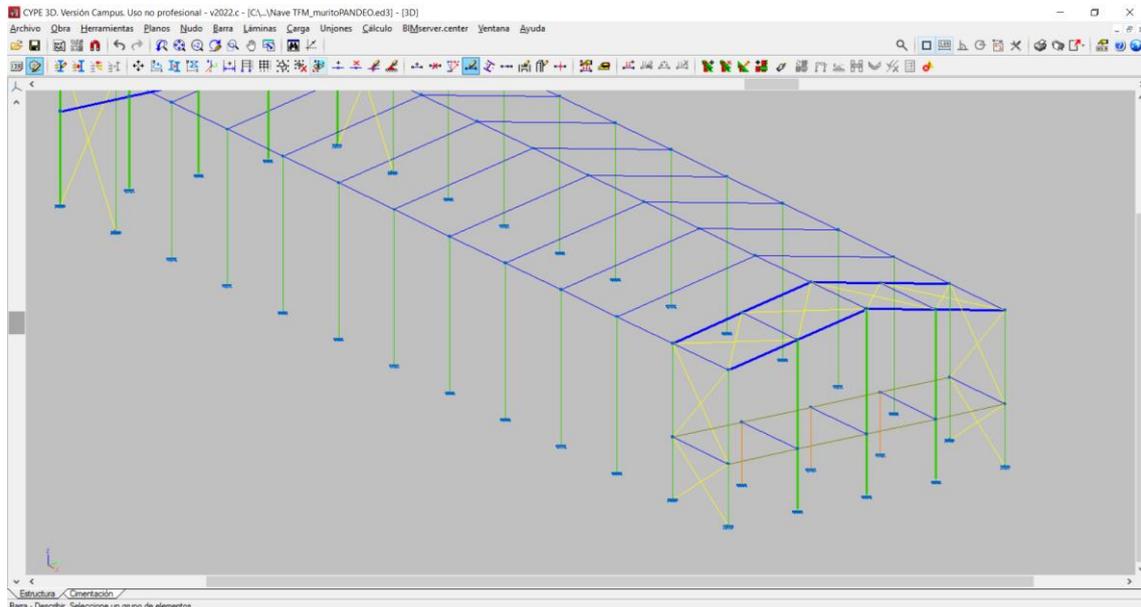


Figura 5. 15 Barras de grupo 4 – Pilares zona oficinas indicados en naranja

En la figura 5.16 se muestra el quinto grupo formado por los tirantes, que por definición se conoce que el coeficiente de pandeo es cero en ambos planos, ya que son cables que trabajan a tracción únicamente.

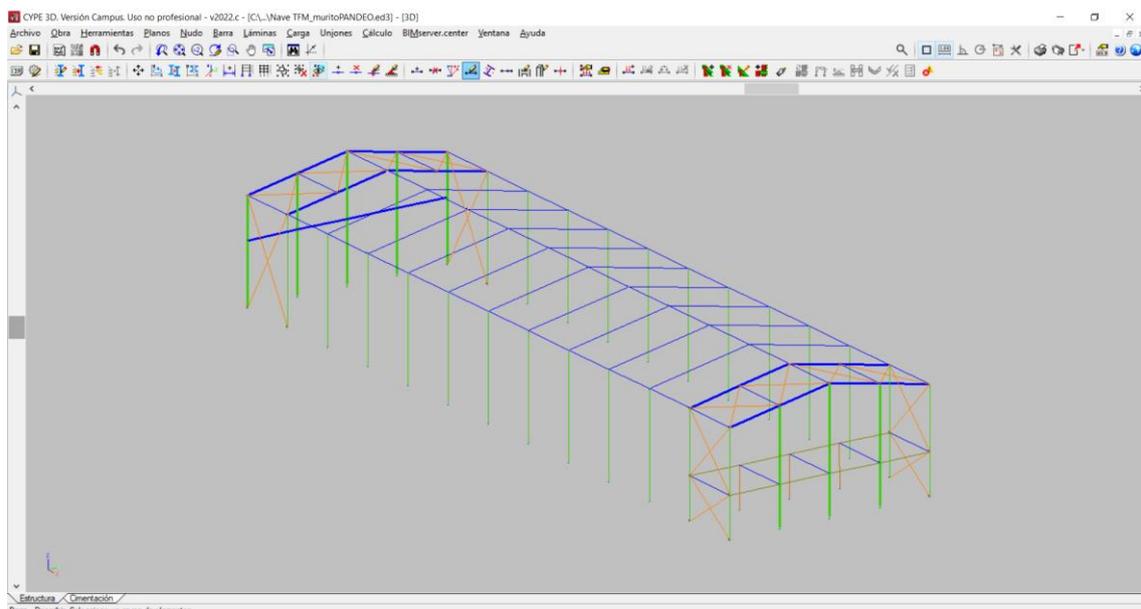


Figura 5. 16 Barras de grupo 5 – Tirantes indicados en naranja

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

El sexto grupo mostrado en la figura 5.17 está formado por las vigas longitudinales que forman el forjado de la primera planta. Estas vigas tienen impedido el pandeo en el plano xy por el forjado y en el plano xz se ha definido un  $\beta=1$  porque tiene los dos extremos articulados.

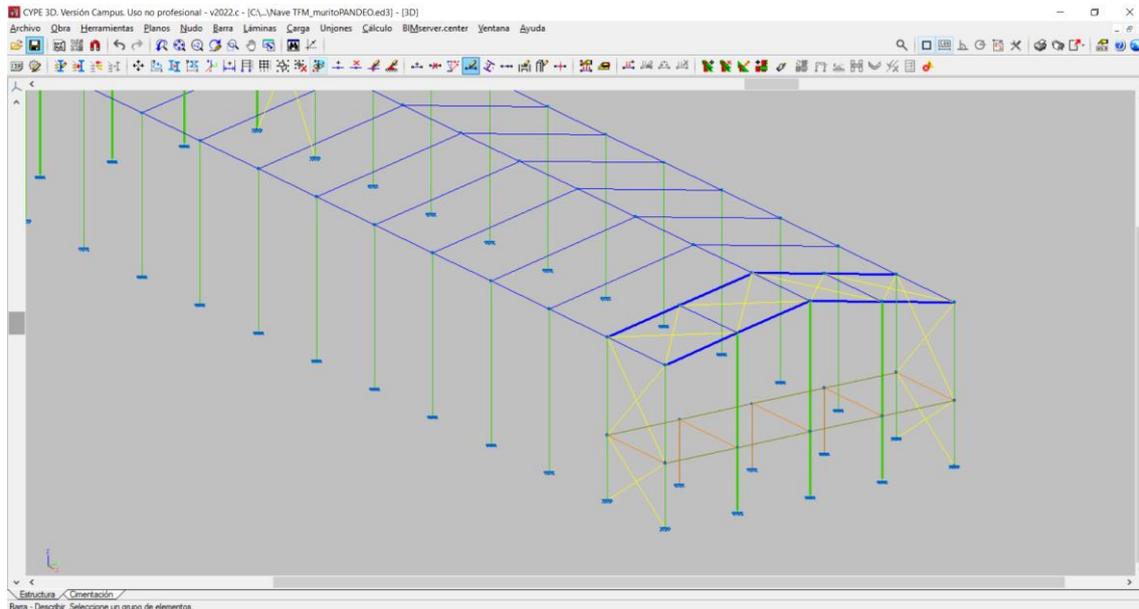


Figura 5. 17 Barras de grupo 6 – Vigas longitudinales 1ª planta indicados en naranja

En la figura 5.18 se muestra el séptimo grupo formado por las vigas transversales que forman el forjado de la primera planta y que une los pilares de los muros piñón donde se encontrarán los accesos de las materias primas. Se han definido con un coeficiente de pandeo  $\beta=0$  en el plano xy y en el plano xz, igual que en el caso anterior tienen impedido el pandeo por el forjado pero esta vez en ambos planos no solamente en uno.

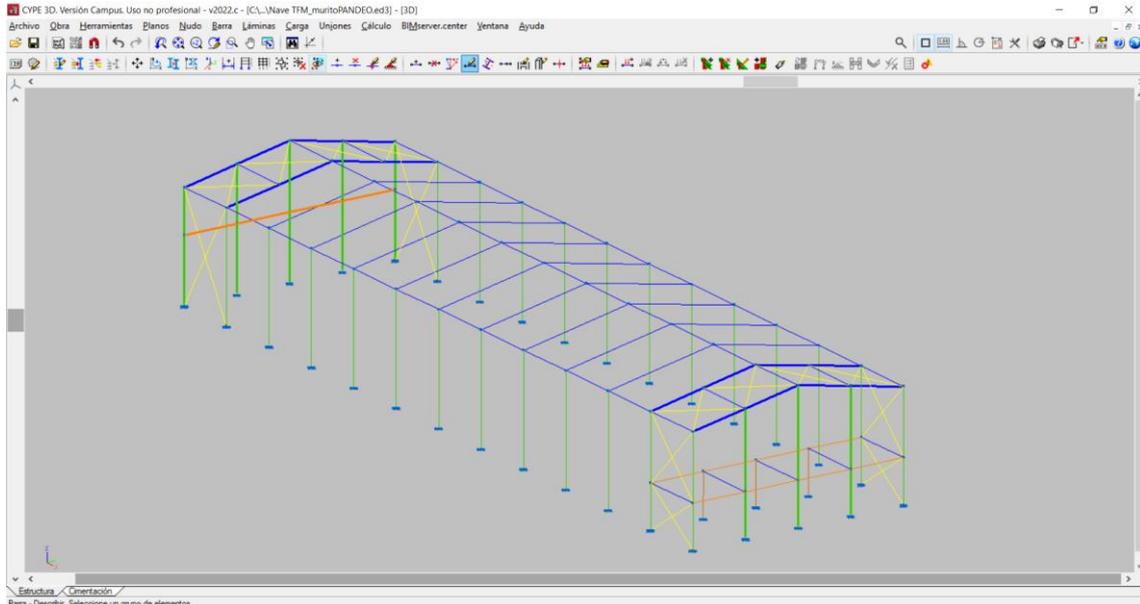


Figura 5. 18 Barras de grupo 7 - Vigas transversales 1ª planta indicados en naranja

Por último, en la figura 5.20, se muestra el octavo grupo formado por los pilares de los muros piñón. Se han definido con un coeficiente de pandeo  $\beta=0$  en el plano xy, ya que están arriostrados por los muros laterales de la nave en esta dirección. Para el plano xz (Figura 5.19), se ha considerado un coeficiente de pandeo de  $\beta=0.7$ .

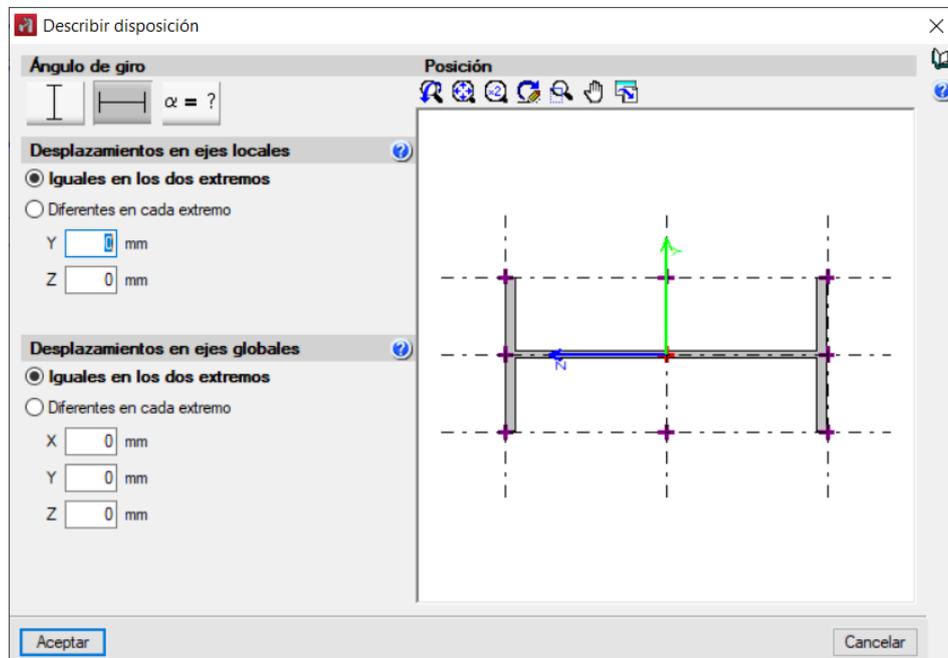


Figura 5. 19 - Disposición de los ejes en los pilares de muro piñón y los pilares del forjado de 1º planta (Barras del grupo 4 y 8)

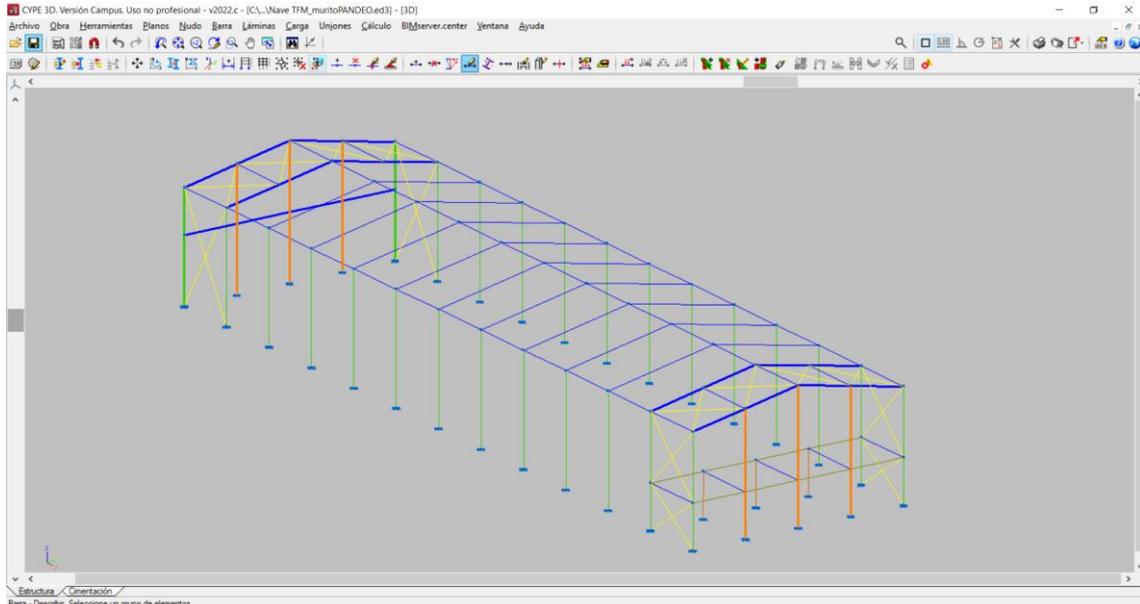
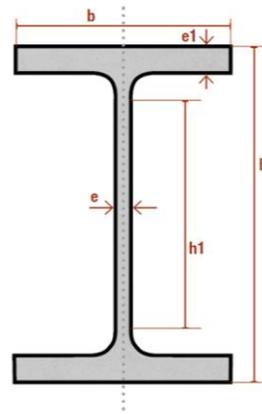


Figura 5. 20 Barras de grupo 8 – Pilares muros piñón indicados en naranja

## 5.2 Estructura metálica estándar

Como se ha mencionado anteriormente, la estructura de esta nave industrial viene definida por pórticos de acero de perfiles IPE. En este apartado se van a introducir las vigas IPE y a realizar el estudio económico para posteriormente comparar esta estructura con la de vigas aligeradas.

Las vigas IPE son vigas de acero estructural o de uso estructural que se utilizan principalmente en el sector industrial, el comercio y la construcción. Este nombre se refiere a su sección en forma de “I”, la “P” de perfil y la “E” de europeo. [11] Estos elementos estructurales se definen porque tienen una sección normalizada con forma de I, como se ha dicho, o también denominada forma de doble T.

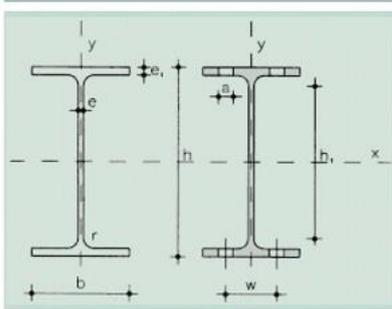


**I.P.E.**

Fabricación según la norma de producto  
UNE 36526: 96 EN 10024-1: 06  
Calidad S275JR

Figura 5. 21 Perfil IPE (alas de espesor constante)

La designación de estos perfiles se hace utilizando las letras IPE seguidas de una cifra, que es la que indica su altura total nominal ( $h$ ), expresada en milímetros. Así, se puede encontrar diferentes tipos de vigas IPE (Figura 5.20), cuyas series van desde IPE 80 hasta IPE 600. Dependiendo de dicha designación, estos elementos estructurales soportarán mayor o menor peso.



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

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

Figura 5. 22 Tabla de perfiles IPE

Estas estructuras metálicas nos ofrecen una relación entre resistencia y peso mayor que la que pueden brindar el hormigón o la madera. Por ello, soportan mucho mejor los esfuerzos de tracción, tensión, flexión y compresión.

Las ventajas que presentan estos perfiles metálicos en el sector de la construcción es que su instalación resulta muy sencilla y su diseño está simplificado y optimizado para ofrecernos el mejor rendimiento. Son elementos flexibles que se adaptan a toda clase de necesidades estructurales. [24]

Además, es fácil mantener la buena salud de las estructuras, pues basta con que apliquemos tratamientos para prevenir el óxido (Figura 5.21) y proteger contra el fuego. Existen muchos métodos para conseguir esto, desde utilizar pilares galvanizados o aleaciones inoxidables para la corrosión, hasta cajear los perfiles para protegerlos del fuego.

En este caso, la mejor solución sería optar por pinturas para proteger la estructura metálica tanto para la corrosión como para el fuego, dado que es la opción más económica y permitirá apreciar la estética del pórtico reformado.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada



Figura 5. 23 Perfil IPE oxidado

Para la nave, teniendo en cuenta los cálculos de Cype 3D según la estructura que se ha diseñado (Figura 5.24), se seleccionan los siguientes perfiles IPE que resisten la estructura, prescindiendo del grupo 5 que son cables y por lo tanto no son perfiles IPE:

Tabla 5. 1 Perfiles IPE seleccionados

<b>Grupo 1</b>	<b>IPE400</b>
<b>Grupo 2</b>	<b>IPE360</b>
Grupo 3	IPE330
Grupo 4	IPE270
Grupo 6	IPE360
Grupo 7	IPE270
Grupo 8	IPE330



Figura 5. 24 - Estructura de la nave con pórticos IPE

En la siguiente figura (5.25) se muestra el resultado después de comprobar todos los perfiles seleccionados. Se aprecian todas las barras en verde lo que demuestra que cumplen con las especificaciones.

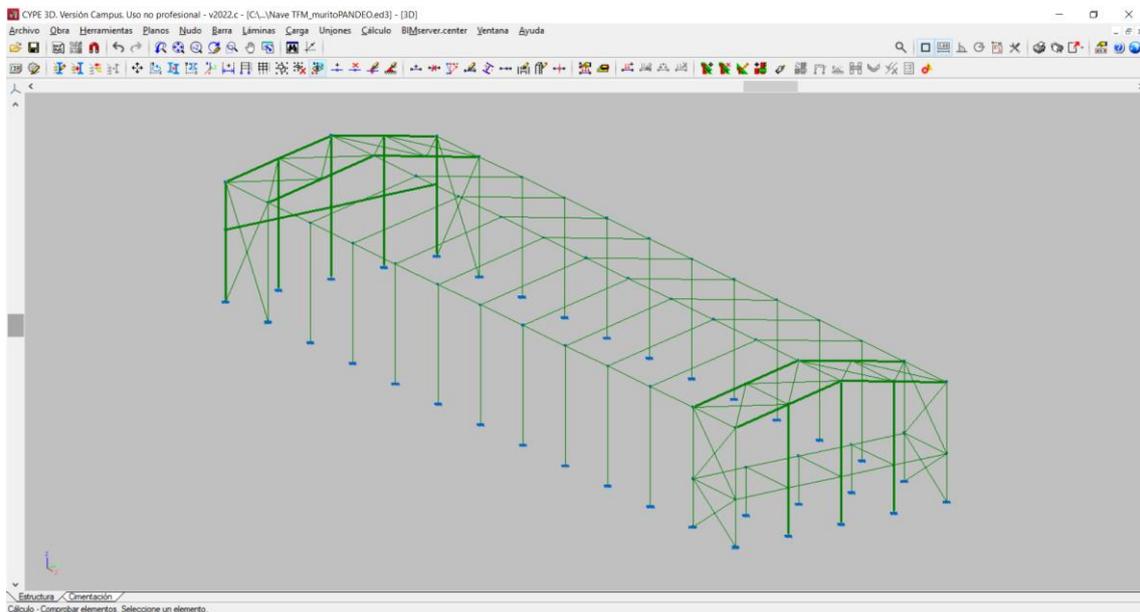


Figura 5. 25 Verificación de que la estructura de la nave resiste

Se sabe que la estructura no está sobredimensionada porque Cype calcula un listado como el de la Figura 5.26, donde se identifica la dimensión de cada perfil y el porcentaje que identifica el grado de resistencia alcanzado por cada barra. Si el Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

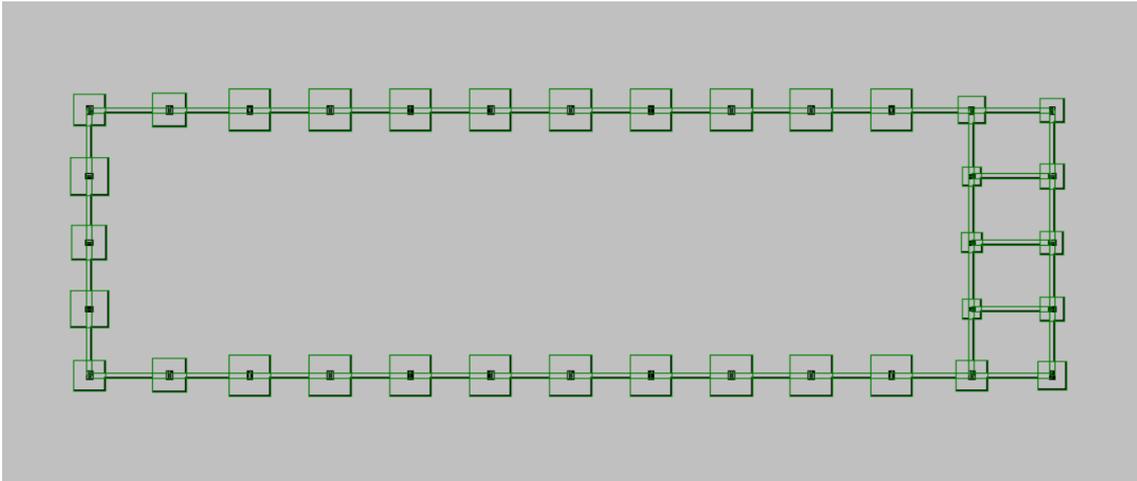
porcentaje es mayor de 100% significa que se superan los esfuerzos que puede soportar la barra y por lo tanto el perfil no cumple con las especificaciones. También tiene en cuenta la resistencia al fuego en el cálculo de dicho dimensionamiento, indicando el grosor de pintura intumescente a aplicar en cada barra.

Perfil	Peso	Resistencia	Resistencia incendio
✗ IPE 80	5.97	—	—
✗ IPE 100	8.09	2656.99 %	—
✗ IPE 120	10.36	1691.80 %	—
✗ IPE 140	12.87	1166.50 %	—
✗ IPE 160	15.78	833.31 %	—
✗ IPE 180	18.76	624.21 %	—
✗ IPE 200	22.37	470.36 %	—
✗ IPE 220	26.22	365.65 %	—
✗ IPE 240	30.69	284.82 %	90.42 % (362.5 °C / 0.6 mm)
✗ IPE 270	36.03	216.83 %	77.41 % (450.0 °C / 0.4 mm)
✗ IPE 300	42.23	167.76 %	57.84 % (435.0 °C / 0.4 mm)
✗ IPE 330	49.14	131.62 %	81.94 % (586.5 °C / 0.2 mm)
✗ IPE 360	57.07	104.29 %	58.67 % (569.0 °C / 0.2 mm)
✓ IPE 400	66.33	81.78 %	78.01 % (656.5 °C / No es necesario)
✓ IPE 450	77.56	63.25 %	25.12 % (276.5 °C / 0.6 mm)
✓ IPE 500	90.67	49.40 %	22.03 % (347.0 °C / 0.4 mm)

Figura 5. 26 Dimensionamiento de un pilar aleatorio

Teniendo la estructura definida se calcula la cimentación. Se ha decidido optar por zapatas cuadradas unidas por una viga corrida entre sí. Además, toda la cimentación irá armada con barras de acero.

Como se puede apreciar en la Figura 5.27, las zapatas son de distintas dimensiones, esto depende de los esfuerzos que tenga que soportar y es directamente proporcional al tamaño de los pilares que van unidas a ellas.



*Figura 5. 27 Comprobación del dimensionamiento de la cimentación*

A continuación, se va a valorar económicamente los elementos en que difieren el reformado y el proyecto original de la nave industrial, estos son: Los pilares, los dinteles, la cimentación y también tendremos en cuenta el coste de la pintura intumescente según la superficie que haya que proteger. Para realizar esto nos vamos a basar en los datos recogidos por Cype 3D y en el generador de precios de Cype.

Tabla 5. 1 Coste estructura con pórticos estándar

Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
m³	<b>Zapata de cimentación de hormigón armado.</b> Zapata de cimentación de hormigón armado, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 44 kg/m³. Incluso armaduras de espera del pilar, alambre de atar, y separadores	214,07	160,42 €	34.341,11 €
m³	<b>Viga entre zapatas.</b> Viga de atado de hormigón armado, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 59 kg/m³. Incluso alambre de atar, y separadores.	20,81	186,49 €	3.880,86 €
m²	<b>Capa de hormigón de limpieza.</b> Capa de hormigón de limpieza y nivelado de fondos de cimentación, de 10 cm de espesor, de hormigón HL-150/B/20, fabricado en central y vertido desde camión, en el fondo de la excavación previamente realizada.	31,22	6,60 €	206,05 €
Kg	<b>Acero en pilares.</b> Acero UNE-EN 10025 S275JR, en pilares formados por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, colocado con uniones soldadas en obra, a una altura de hasta 3 m.	15.919,80	2,09 €	33.272,38 €
Kg	<b>Acero en vigas.</b> Acero UNE-EN 10025 S275JR, en vigas formadas por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m.	16.844,01	2,11 €	35.540,86 €
m²	<b>Imprimación antioxidante sobre superficie de acero.</b> Aplicación manual de dos manos de imprimación anticorrosiva, bicomponente, Maxepox AC, "DRIZORO", hasta alcanzar un espesor total de 100 µm, para la protección de elementos de acero frente a la corrosión.	769,158	17,86 €	13.737,16 €
				<b>120.978,42 €</b>

### 5.3 Estructura metálica de vigas aligeradas

Como se ha comentado, para el reformado técnico se ha propuesto cambiar los perfiles IPE por perfiles de alma aligerada. Los motivos son conseguir una nave más estética, además de servir de un buen marketing para esta empresa, dado que se dedican a la fabricación de las mismas.

Las vigas de alma aligerada o vigas boyd, son elementos de acero estructural como las vigas laminadas estándar. Fueron inventadas por Geoffrey Murray Boyd en la década de los años 30 del siglo pasado, cuando trabajaba en la construcción de una grúa monorraíl, como se ha comentado en el capítulo de antecedentes.

Existen tres tipos de configuraciones de vigas boyd: (Figura 5.28)

- Vigas de huecos sinusoidales.
- Vigas de huecos circulares.
- Vigas de huecos hexagonales.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

- Vigas de huecos rectangulares.

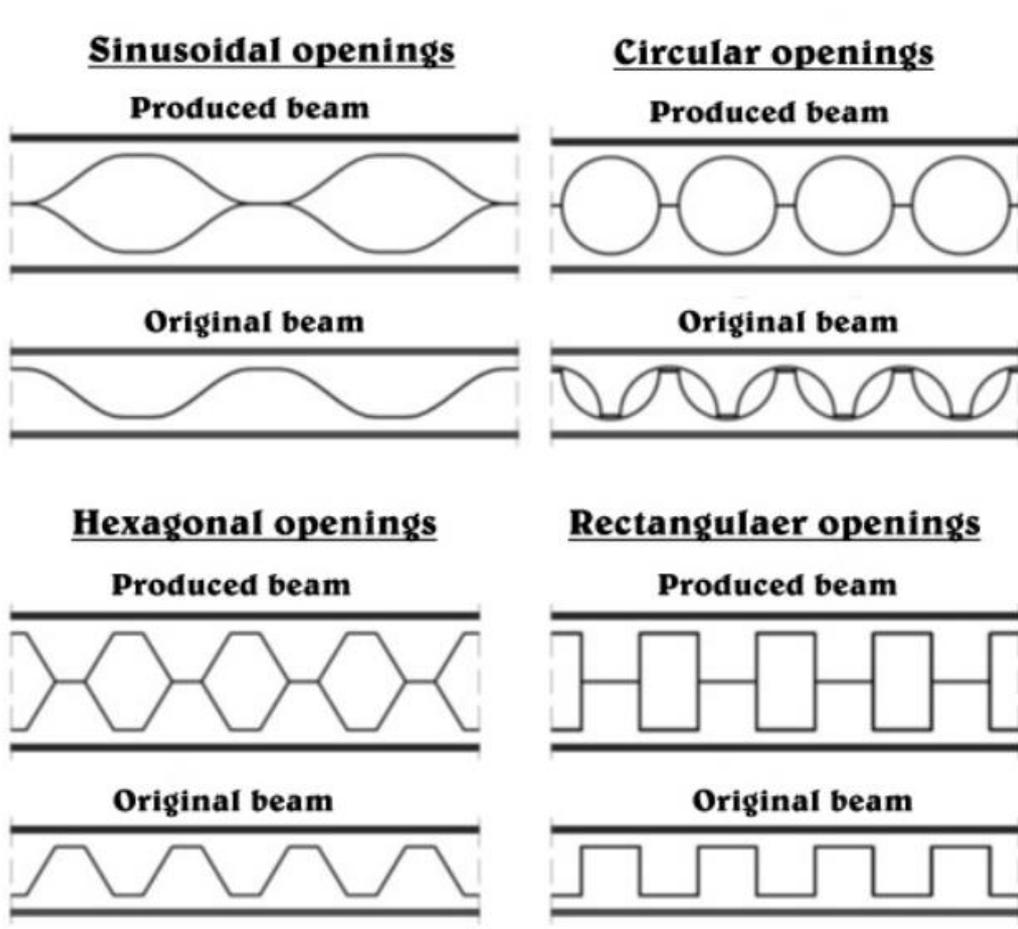


Figura 5. 28 Proceso fabricación viga aligerada con distintas formas alveolares. [17]

En cuanto a la resistencia de las vigas aligeradas, se consigue que estas tengan el mismo peso para que la viga tenga mayor momento de inercia y mayor momento resistente.

$$I = \int x^2 dm \quad W = I/y$$

*Ecuaciones del momento de inercia y del momento resistente.*

Se conoce que el alma de los perfiles suele soportar una parte de los esfuerzos de flexión y como las tensiones tangenciales se reducen, esas perforaciones que se le practica no implicarán una gran pérdida de resistencia.

Como ventajas de este tipo de elemento estructural se tiene:

- Son utilizadas para cubrir grandes luces en construcciones ligeras.
- Dan un aspecto mucho más ligero y de amplitud a la construcción.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

- El peso que se reduce incide o afecta en el resto del conjunto estructural formado por: pilares, cimentación, etc.
- Además, permite que exista economía en el transporte y en el montaje de las estructuras. (Figura 5.29)



Figura 5. 29 Transporte de vigas boyd [21]

- Las perforaciones que se le realizan en el alma de las estructuras permiten un paso libre a todo tipo de instalaciones, haciendo más efectiva la situación de las mismas.
- Es menor la superficie que se debe pintar para la protección frente al fuego y la corrosión. [13]

Para este reformado se ha valorado cambiar la totalidad de la estructura de la nave industrial, pasando los pórticos estándar a aligerados. Teniendo ya la estructura calculada para pórticos estándar, como se ha visto en el apartado anterior, es fácil calcularla cambiando estos elementos.

Para ello, lo único que se debe hacer es describir de nuevo las barras que se quieren cambiar con el perfil aligerado (Figura 5.30). Al escoger esta opción, se deben introducir unas relaciones dimensionales las cuales indican lo que se aumenta el canto del perfil IPE al crear la viga del alma aligerada y la separación entre alveolos. En este caso se han mantenido los parámetros por defecto. Quedando la estructura como se muestra en la Figura 5.31.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

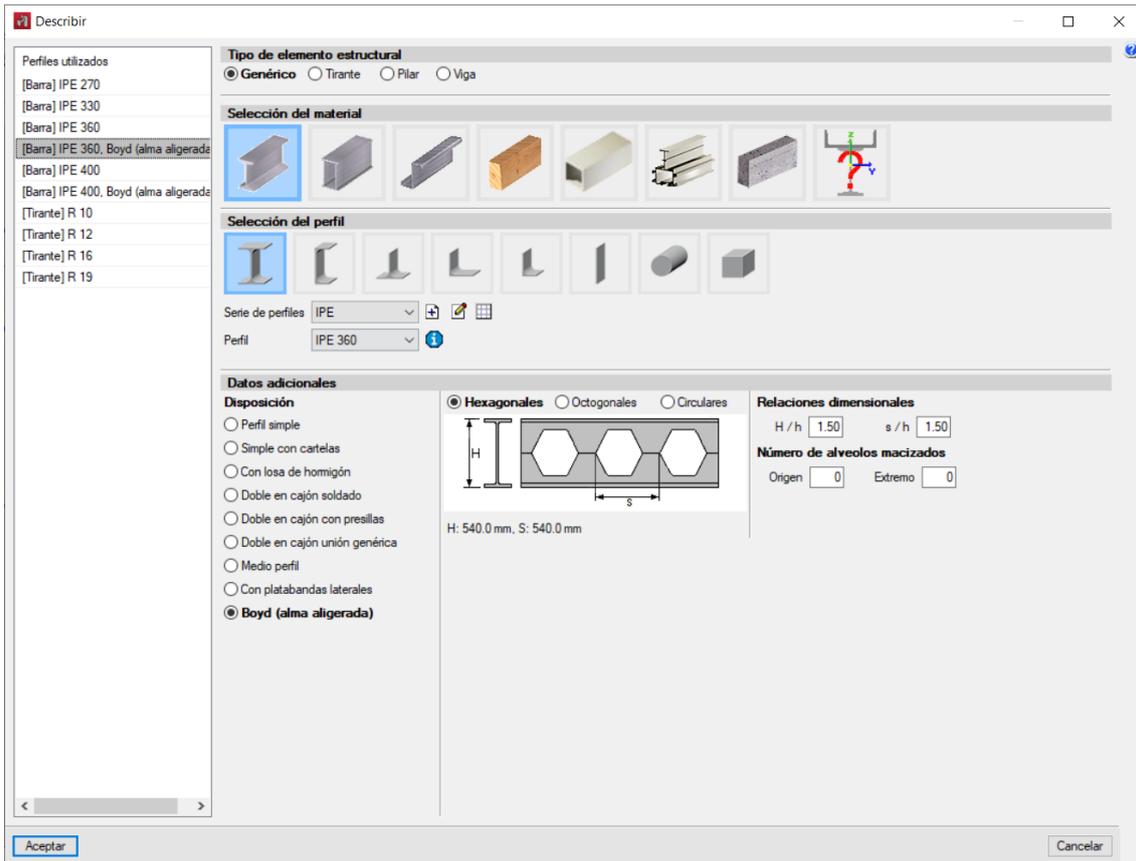


Figura 5. 30 - Describir perfil tipo boyd

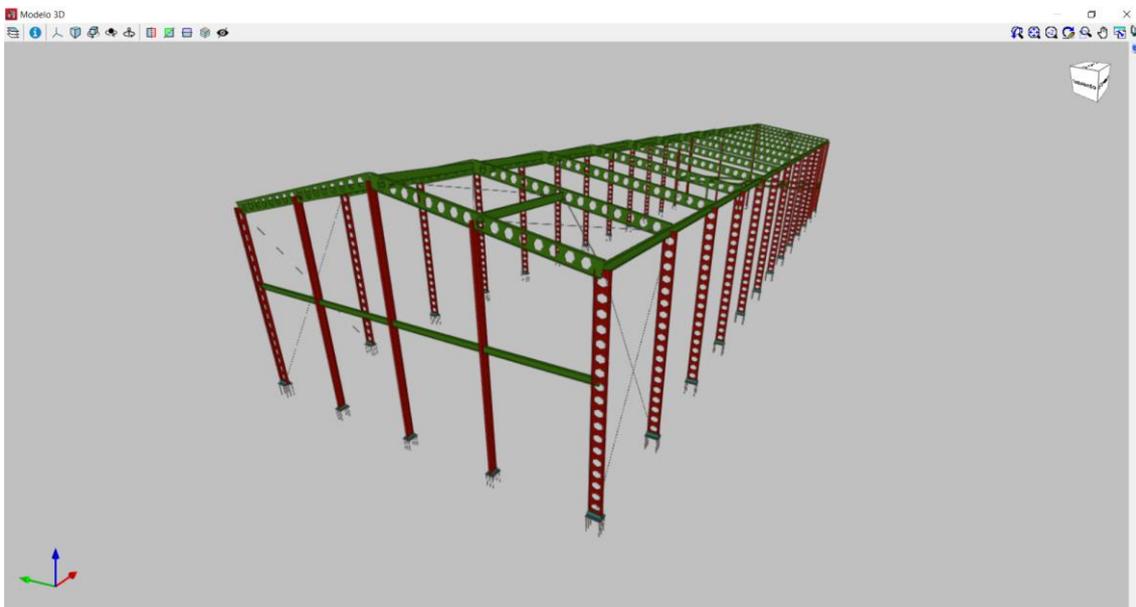


Figura 5. 31 - Estructura de la nave con pórticos aligerados

Los perfiles que cumplen con las especificaciones serían:

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

Tabla 5. 2 Perfiles IPE Boyd seleccionados

<b>Grupo 1</b>	IPE360 (Boyd)
<b>Grupo 2</b>	IPE400 (Boyd)

Por lo tanto, en pilares disminuye el perfil dado que los dinteles pesan menos y en el caso de estos últimos, aumenta para ser igual de resistente que con los perfiles estándar teniendo que soportar el peso de la cubierta y de las correas que los une.

Con respecto a la cimentación, prácticamente no varía nada. Teniendo en cuenta que los perfiles que sostienen siguen siendo de la misma magnitud y que, aunque tengan huecos en el alma, se consigue que pesen lo mismo para tener la misma resistencia en la estructura como se ha comentado anteriormente.

Para hacer la valoración económica con el objetivo de comparar con la estructura estándar, se han tenido en cuenta los mismos elementos que en el apartado anterior: Los pilares, los dinteles, la cimentación la pintura intumescente.

Tabla 5. 3 Coste estructura con pórticos Boyd

Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
m³	Zapata de cimentación de hormigón armado. Zapata de cimentación de hormigón armado, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 44 kg/m³. Incluso armaduras de espera del pilar, alambre de atar, y separadores	212,53	160,42 €	34.094,06 €
m³	Viga entre zapatas. Viga de atado de hormigón armado, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 59 kg/m³. Incluso alambre de atar, y separadores.	21	186,49 €	3.916,29 €
m²	Capa de hormigón de limpieza. Capa de hormigón de limpieza y nivelado de fondos de cimentación, de 10 cm de espesor, de hormigón HL-150/B/20, fabricado en central y vertido desde camión, en el fondo de la excavación previamente realizada.	31	6,60 €	204,60 €
Kg	Acero en pilares. Acero UNE-EN 10025 S275JR, en pilares formados por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, colocado con uniones soldadas en obra, a una altura de hasta 3 m.	12.555,29	2,09 €	26.240,56 €
Kg	Acero en vigas. Acero UNE-EN 10025 S275JR, en vigas formadas por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m.	17.588,00	2,11 €	37.110,68 €
m²	Imprimación antioxidante sobre superficie de acero. Aplicación manual de dos manos de imprimación anticorrosiva, bicomponente, Maxepox AC, "DRIZORO", hasta alcanzar un espesor total de 100 µm, para la protección de elementos de acero frente a la corrosión.	711,384	17,86 €	12.705,32 €
				<b>114.271,51 €</b>

## 6. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS Y PROPUESTA DE REFORMADO TÉCNICO

### 6.1 Valoración de los resultados

En este apartado se van a comparar las dos estructuras anteriormente mencionadas en el apartado 5. Se comentarán los aspectos ventajosos de cada estructura, ya sean técnicos o económicos, teniendo en cuenta la ocupación de la nave y se llegará a una conclusión de cuál será la más indicada para este caso.

Como se exponía al principio del documento, la finalidad del reformado técnico abarca varios puntos. Se pretende conseguir un lugar de trabajo moderno, limpio y que aparente amplitud para que los trabajadores se sientan cómodos y se mejore el ambiente de trabajo, optimizando la producción y su estado de ánimo. Además, sería de interés para la propia empresa, a nivel publicitario, utilizar su producto para la construcción de sus instalaciones, dando un ejemplo visual a los posibles clientes, del uso y la estética que con estos perfiles aligerados se consigue.

El motivo del que más suele depender este tipo de decisiones es la diferencia de precios entre una estructura u otra. En la siguiente tabla se van a comparar los elementos valorados en los apartados anteriores.

Tabla 6. 1 Comparativo económico entre estructuras

Ud	Descripción	Medición	Importe	Ud	Descripción	Medición	Importe
<i>Perfiles estándar</i>				<i>Perfiles Boyd</i>			
m <sup>3</sup>	<b>Zapata de cimentación de hormigón armado.</b>	214,07	34.341,11 €	m <sup>3</sup>	<b>Zapata de cimentación de hormigón armado.</b>	212,53	34.094,06 €
m <sup>3</sup>	<b>Viga entre zapatas.</b>	20,81	3.880,86 €	m <sup>3</sup>	<b>Viga entre zapatas.</b>	21	3.916,29 €
m <sup>2</sup>	<b>Capa de hormigón de limpieza.</b>	31,22	206,05 €	m <sup>2</sup>	<b>Capa de hormigón de limpieza.</b>	31	204,60 €
Kg	<b>Acero en pilares.</b>	15.919,80	33.272,38 €	Kg	<b>Acero en pilares.</b>	12.555,29	26.240,56 €
Kg	<b>Acero en vigas.</b>	16.844,01	35.540,86 €	Kg	<b>Acero en vigas.</b>	17.588,00	37.110,68 €
m <sup>2</sup>	<b>Imprimación antioxidante sobre superficie de acero.</b>	769,158	13.737,16 €	m <sup>2</sup>	<b>Imprimación antioxidante sobre superficie de acero.</b>	711,384	12.705,32 €
			<b>120.978,42 €</b>				<b>114.271,51 €</b>

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

Se puede apreciar rápidamente en el coste total que la estructura con vigas boyd es más barata, aunque no en gran cantidad. En la cimentación no se puede decir que haya alguna diferencia significativa, igual que en la capa de hormigón de limpieza, prácticamente los importes son iguales. Donde se puede ver más diferencia es en la cantidad de acero de los pilares, ya que se pasa de perfiles de 400 a otros de 360 y además aligerados. La cantidad de acero en los dinteles aumenta ligeramente en la estructura de vigas boyd debido a que en este caso aumenta el perfil en lugar de disminuir como ocurre en los pilares. Con respecto a la superficie que hay que proteger en cada caso de la corrosión, como era de esperar, es menor en el segundo caso por los alveolos que este tipo de vigas presentan, por lo que el importe que supone la imprimación es menor.

Además de ser más ventajosa la estructura aligerada de la estándar económicamente, también presenta otras cualidades, como hemos visto en el apartado anterior. Los perfiles estándar son más pesados que los aligerados, esto hace que el transporte sea más complicado y caro. Aún así, que los perfiles boyd sean más ligeros no supone una pérdida de resistencia de la estructura, dado que las tensiones tangenciales suelen ser reducidas y las perforaciones en el alma no suponen una disminución de resistencia.



Figura 6. 1 Nave con estructura estándar [14]

Para el caso de esta nave, teniendo en cuenta la finalidad del reformado, hay que destacar que en el caso de los perfiles aligerados se tiene la posibilidad de aprovechar los huecos del alma para el paso de cualquier tipo de instalación, conductos de ventilación, de saneamiento, electricidad o protección contra incendios.

El aspecto de amplitud y de ligereza que aporta este tipo de estructuras no se consigue con unos perfiles estándar, estos últimos dan una impresión más basta y simple (figura 6.1). Lo que se quiere conseguir con el reformado es una apariencia

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

que proporcione una sensación más agradable al trabajador y una imagen modernizada de la empresa gracias a la estética de este tipo de perfiles (figura 6.2).



Figura 6. 2 Instalaciones con estructura boyd [2]

## 6.2 Propuesta de reformado técnico

Para concluir, se va a presentar la propuesta de actuación para llevar a cabo el reformado técnico de la estructura. En la nave original se cuenta con 26 pilares de perfil IPE400, los cuales suponen un peso total de 15.919,8 Kg de acero. El acero para los pilares teniendo en cuenta la mano de obra y costes indirectos tiene un coste, según el banco de precios de Cype, de 2.09€/kg por lo que la estructura existente tendría un coste de 33.272,38€. Manteniendo los mismos esfuerzos y cumpliendo la normativa existente, se ha recalculado dicha estructura con perfiles de alma aligerada de alveolos hexagonales con una relación de 1.5 entre el canto del perfil Boyd y el del perfil estándar, consiguiendo reducir el perfil inicial a uno menor, IPE360 (Boyd). Por lo tanto, para el reformado se contarán con 26 pilares de perfil IPE360 (Boyd) con un peso total de 12.555,29 Kg y un coste de 26.240,56€.

Para el caso de los dinteles, en el proyecto original se cuenta con perfiles IPE360 con un peso de 16.844,01 Kg. El coste de la mano de obra para la colocación de estos perfiles es mayor puesto que se realiza en altura y el precio unitario asciende a 2.11€/kg, por lo que sumaría un coste de 35.540,86€. Al recalcular los dinteles con perfiles aligerados, para que estos resistan, se debe aumentar el perfil a IPE400 (Boyd). Estos suman un total de 17.588 Kg que supone un coste de 37.110,68€.

Reformado técnico de estructura de nave industrial metálica estándar a aligerada

Para la cimentación, al tener que cambiar los pilares de los pórticos se procederá con la demolición de la existente y se reemplazará por zapatas y vigas de atado nuevas para garantizar la estabilidad de la estructura de la nave. Esto supone un precio de demolición que asciende a 20.845,74€ y la construcción de la nueva cimentación tiene un coste de 38.010,35€.

Como esta empresa se dedica a la fabricación de vigas aligeradas, se puede descontar el coste del material de los pórticos del reformado. Se ha estimado un ahorro para los 30.143,29 Kg de acero de 21.150,64€. Se adjunta un presupuesto con la propuesta de reforma desarrollada en este documento.

	REFORMADO DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE UNA NAVE INDUSTRIAL							Pág.:1	
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO							Ref.: promyp2	
	Oferta Reformado							Fec.:17 / 08 / 22	

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Subtotal	Medición	Precio	Importe
----------	-------------------------------------	------	----------	---------	--------	----------	----------	--------	---------

**REFORMADO DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE UNA NAVE INDUSTRIAL**

01 Oferta Reformado

01.01 m3 Zapata de cimentación de hormigón armado  
10000 Zapata de cimentación de hormigón armado, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 44 kg/m<sup>3</sup>. Incluso armaduras de espera del pilar, alambre de atar, y separadores

Total partida 01.01 ..... 212,53 .... 160,42 ..... 34.094,06

01.02 m3 Viga entre zapatas  
20000 Viga de atado de hormigón armado, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 59 kg/m<sup>3</sup>. Incluso alambre de atar, y separadores.

Total partida 01.02 ..... 21,00 .... 186,49 ..... 3.916,29

01.03 m2 Capa de hormigón de limpieza  
30000 Capa de hormigón de limpieza y nivelado de fondos de cimentación, de 10 cm de espesor, de hormigón HL-150/B/20, fabricado en central y vertido desde camión, en el fondo de la excavación previamente realizada.

Total partida 01.03 ..... 31,00 ..... 6,60 ..... 204,60

01.04 kg Acero en pilares  
40000 Acero UNE-EN 10025 S275JR, en pilares formados por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, colocado con uniones soldadas en obra, a una altura de hasta 3 m.

Total partida 01.04 ..... 12.555,29 ..... 2,09 ..... 26.240,56

01.05 kg Acero en vigas  
50000 Acero UNE-EN 10025 S275JR, en vigas formadas por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m.

Total partida 01.05 ..... 17.588,00 ..... 2,11 ..... 37.110,68

01.06 m2 Imprimación antioxidante sobre superficie de acero  
60000 Aplicación manual de dos manos de imprimación anticorrosiva, bicomponente, Maxepox AC, "DRIZORO", hasta alcanzar un espesor total de 100 µm, para la protección de elementos de acero frente a la corrosión.

Total partida 01.06 ..... 711,38 ..... 17,86 ..... 12.705,25

01.07 m3 Demolición de cimentación de hormigón.  
70000 Demolición de zapata de hormigón armado, de hasta 1,5 m de profundidad máxima, con martillo neumático y equipo de oxicorte, y carga mecánica sobre camión o contenedor.

Total partida 01.07 ..... 214,00 ..... 97,41 ..... 20.845,74

01.08 u Ahorro por materia prima  
80000 Ahorro en el coste de acero para estructura de pórticos aligerados. Lo proporciona el propio cliente.

Total partida 01.08 ..... 1,00 -21.150,64 .... -21.150,64

**Total capítulo 01 ..... 113.966,54**

**Total presupuesto ..... 113.966,54**

Nº Orden	Descripción de los capítulos	Importe	%
01	Oferta Reformado	113.966,54	100,00 %

**PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL ..... 113.966,54**

13% Gastos Generales ..... 14.815,65

6% Beneficio Industrial ..... 6.837,99

**PRESUPUESTO BRUTO ..... 135.620,18**

18% I.V.A. .... 24.411,63

**PRESUPUESTO LIQUIDO ..... 160.031,81**

Suma el presente presupuesto la cantidad de:

CIENTO SESENTA MIL TREINTA Y UN EUROS CON OCHENTA Y UN CÉNTIMOS

11 de Agosto de 2022

LA PROPIEDAD

LA DIRECCIÓN TÉCNICA

LA CONSTRUCTORA

Fdo.: .....

Fdo.: .....

Fdo.: .....

## 7. CONCLUSIONES

La finalidad de este trabajo era justificar un reformado técnico de una estructura metálica, partiendo de una estructura con perfiles IPE a otra con perfiles boyd. La nave sobre la que se estudia el reformado se dedica a la fabricación de perfiles de acero aligerados, de ahí nace el interés de este cambio en la estructura. Teniendo una empresa cuya dedicación es la fabricación de perfiles boyd, que mejor marketing para esta que sus propias instalaciones precisen de este tipo de estructura.

Lo primero que se hizo fue calcular la estructura de la que se partía, de perfiles IPE, gracias a la herramienta de trabajo escogida Cype 3D, y partiendo de esta se hizo lo mismo con los perfiles aligerados. Conociendo estos datos y los cálculos de la cimentación, este software nos genera una serie de listados de los cuales se pudo extraer la cantidad de acero, la cantidad de hormigón armado y de pintura anticorrosiva utilizada en cada estructura facilitando así la valoración económica de cada caso para su posterior comparación.

Con la información que se ha recogido hasta este punto, valorando únicamente el aspecto económico, la estructura escogida sería la de perfiles aligerados. Aunque no haya gran diferencia en el precio de una con respecto a la otra, se suele elegir siempre la opción más barata. Aun así, se han evaluado otros motivos por los que sería mejor esta estructura en este caso. Estos van desde una visión práctica como el coste en el transporte de los perfiles y el aprovechamiento del espacio para pasar conductos de instalaciones, hasta una visión más estética teniendo en cuenta el espacio diáfano y moderno que se puede conseguir.

En conclusión, se han cumplido los objetivos que se presentaban al principio del documento, demostrando las competencias adquiridas en la titulación del máster de ingeniería industrial, aprendiendo a utilizar la herramienta de Cype para el cálculo de estructuras y, como comenzábamos diciendo, justificar el reformado de la estructura de la nave industrial valorando la mejor opción para ella.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aranda, V. G. (9 de Agosto de 2022). VG-AT. Obtenido de [vgatec.blogspot.com/2012/09/vigas-alveolares.html](http://vgatec.blogspot.com/2012/09/vigas-alveolares.html)
- [2] Arcelor Mital. (24 de Julio de 2022). *ArcelorMittal*. Obtenido de [constructalia.arcelormittal.com/es/casos\\_practicos/italia/rehabilitacion\\_escuela\\_de\\_vuelo\\_air\\_vergiate\\_con\\_vigas\\_acb](http://constructalia.arcelormittal.com/es/casos_practicos/italia/rehabilitacion_escuela_de_vuelo_air_vergiate_con_vigas_acb)
- [3] Arktec. (10 de Julio de 2022). *Arktec*. Obtenido de [arktec.com/es/Común/0\\_articulos/art\\_vigasboyd.aspx](http://arktec.com/es/Común/0_articulos/art_vigasboyd.aspx)
- [4] Aula seproinca. (10 de Julio de 2022). Obtenido de <https://aulaseproinca.blogspot.com/2022/04/vigas-alveolares-que-son-y-por-que-son.html>
- [5] Bardahl Industria. (3 de Abril de 2022). *Bardahl Industria*. Obtenido de Breve Historia de la Construcción: [bardahlindustria.com/breve-historia-construccion/](http://bardahlindustria.com/breve-historia-construccion/)
- [6] Bonet, J. (10 de Julio de 2022). *JB engineering*. Obtenido de [blog.jbonet.es/2017/05/18/vigas-alveolares-boyd/#:~:text=En%20los%20años%2030%2C%20la%20escasez%20de%20material,en%20honor%20a%20su%20creador%20Geoffrey%20Murray%20Boyd.](http://blog.jbonet.es/2017/05/18/vigas-alveolares-boyd/#:~:text=En%20los%20años%2030%2C%20la%20escasez%20de%20material,en%20honor%20a%20su%20creador%20Geoffrey%20Murray%20Boyd.)
- [7] Constructalia. (10 de Julio de 2022). *Constructalia*. Obtenido de [https://constructalia.arcelormittal.com/es/casos\\_practicos/luxemburgo/aparcamiento\\_enovos\\_con\\_innovadoras\\_solcuines\\_en\\_acero](https://constructalia.arcelormittal.com/es/casos_practicos/luxemburgo/aparcamiento_enovos_con_innovadoras_solcuines_en_acero)
- [8] Cype. (9 de Agosto de 2022). *Cype*. Obtenido de <https://info.cype.com/es/producto/normativa-implementada-en-los-programas-de-cype/>
- [9] Direct industry. (10 de Julio de 2022). *Direct industry*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/esab/product-18224-423131.html>
- [10] FICEP. (21 de Mayo de 2022). *FICEP GROUP*. Obtenido de <https://www.ficepgroup.com/es/maquinaria-de-construccion-de-acero/placas/tipo-a/>
- [11] Hierros Tolón. (5 de Junio de 2022). *Hierros Tolón*. Obtenido de <https://hierrostolon.com/productos/vigas-de-hierro/viga-ipe-perfil-europeo/>
- [12] Hierros Velez. (10 de Julio de 2022). *Hierros Velez*. Obtenido de [hierrosvelez.com/blog/que-son-vigas-de-acero/](http://hierrosvelez.com/blog/que-son-vigas-de-acero/)
- [13] Ing. Civil. (10 de Julio de 2022). *Cueva del ingeniero civil*. Obtenido de [cuvadecivil.com/2013/04/vigas-metalicas-de-alma-aligerada.html](http://cuvadecivil.com/2013/04/vigas-metalicas-de-alma-aligerada.html)
- [14] IRivera constructores. (24 de Julio de 2022). *IRivera constructores*. Obtenido de [constructoresrivera.com/usos-que-no-imaginabas-de-las-naves-industriales/](http://constructoresrivera.com/usos-que-no-imaginabas-de-las-naves-industriales/)

- [15] Logan. (3 de Abril de 2022). *Cranes and machinery*. Obtenido de Historia de la Construcción: <https://gruasyaparejos.com/construccion/historia-de-la-construccion/>
- [16] MACHINIO. (21 de Mayo de 2022). *MACHINIO*. Obtenido de <https://www.machinio.com/listings/57496636-dexu-q6926-in-qingdao-china>
- [17] MARMORS GROUP. (9 de Agosto de 2022). *MARMORS GROUP*. Obtenido de MARMORS GROUP: [marmorsgroup.com/steel-structures/castellated-beams](http://marmorsgroup.com/steel-structures/castellated-beams)
- [18] Naves de Rioseco. (9 de Agosto de 2022). *Naves de Rioseco*. Obtenido de <http://www.navesderioseco.com/>
- [19] OSCACER. (21 de Mayo de 2022). *OSCACER*. Obtenido de [http://www.oscacer.pt/Oscacer\\_SP/Calculadora.html](http://www.oscacer.pt/Oscacer_SP/Calculadora.html)
- [20] REINAR S.A. (3 de Abril de 2022). *Historia de la construcción*. Obtenido de <https://www.reinarsa.com/2016/12/09/historia-de-la-construccion/#:~:text=Primeramente%20se%20inici%C3%B3%20con%20materiales,%2C%20hormig%C3%B3n%2C%20metal%20y%20pl%C3%A1stico>
- [21] Renedo metal. (22 de Julio de 2022). *Renedo metal*. Obtenido de [renedometal.es/vigas-alveolares/](http://renedometal.es/vigas-alveolares/)
- [22] SOHO. (18 de Agosto de 2022). *SOHO*. Obtenido de <https://www.sohocutting.com/es/how-to-choose-a-cutting-machine/>
- [23] Solostocks. (10 de Julio de 2022). *Solostocks*. Obtenido de <https://www.solostocks.com/venta-productos/maquinaria-proceso-metales/maquinaria-corte-metal/maquina-corte-cnc-plasma-para-chapa-metal-tipo-portico-38536940>
- [24] Structuralia. (5 de Junio de 2022). *Structuralia*. Obtenido de <https://blog.structuralia.com/vigas-ipe>
- [25] Veredes. (9 de Agosto de 2022). *Veredes - Arquitectura y divulgación*. Obtenido de Veredes - Arquitectura y divulgación: [veredes.es/blog/rehabilitacion-nave-industrial-valladolid-contextos-arquitectura-urbanismo/](http://veredes.es/blog/rehabilitacion-nave-industrial-valladolid-contextos-arquitectura-urbanismo/)