

PLATAFORMA DE ENXEÑARÍA DA MADEIRA ESTRUTURAL (PEMADE)

UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Proyecto experimental de modelos logísticos de parques de biomasa.

Estructuras de madera

ACTIVIDAD 3 – LOGÍSTICA DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA PARA
FINES ENERGÉTICOS

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETO DEL ESTUDIO Y EQUIPO RESPONSABLE	7
3. ESTUDIO DE DIFERENTES ALTERNATIVAS	9
3.1. Proceso productivo	9
3.2. Alternativas estudiadas	10
3.2.1. Alternativa A.....	11
3.2.2. Alternativa B.....	14
3.2.3. Alternativa C.....	17
3.3. Análisis de decisión	19
3.4. Ventajas de la alternativa final.....	22
4. MEMORIA ESTRUCTURAL.....	23
4.1. Descripción.....	23
4.1.1. Consideraciones generales.....	23
4.1.2. Periodo de servicio	23
4.1.3. Sistema de cimentación.....	23
4.1.4. Sistema estructural	23
4.1.5. Especificaciones técnicas de los materiales utilizados.....	24
4.2. Normativa de aplicación	28
4.3. Control de ejecución.....	28
4.4. Bases de cálculo.....	28
4.4.1. Clasificación de acciones	30
4.4.2. Valores característicos.....	30
4.4.3. Otros valores representativos	31
4.4.4. Valores de cálculo	31
4.4.5. Combinación de acciones.....	32
4.4.6. Deformaciones	33
4.4.7. Acciones consideradas en el cálculo.....	34
5. PRESUPUESTO , RESUMEN GENERAL	35

1. INTRODUCCIÓN

Con fecha de 10 de Enero de 2012 se firmó un contrato de colaboración entre el Concello de Pontearreas y la Universidad de Santiago de Compostela, con el objetivo de realizar un estudio de diferentes alternativas para la construcción de una nave con estructura de madera donde se llevará a cabo la transformación de biomasa forestal.

Los montes de carácter productivo del norte de Portugal y del sur de Galicia presentan condiciones ecológicas y socioeconómicas muy similares. Su ubicación estratégica situada en el centro geográfico de una región transfronteriza altamente poblada y con una significativa presencia de enclaves empresariales junto con las expectativas de instalación en la región de plantas de transformación de biomasa forestal para la producción de energía hacen previsible el nacimiento de una nueva cadena de valor de la producción forestal asentada en la bioenergía.

En el proceso de desarrollo de la cadena de valor de la biomasa forestal que se pretende impulsar en la región transfronteriza uno de los aspectos estratégicos es contar con medios logísticos que faciliten la movilización de biomasa. Estudios anteriores realizados en la zona y experiencias en otros países indican que la presencia de una red de parques de acopio y suministro de biomasa resulta fundamental para que la biomasa pueda llegar en las mejores condiciones a los centros de consumo.

Los parques de biomasa, generalmente situados en áreas forestales y también en centros de consumo, deben ser concebidos para regular el abastecimiento y para permitir el oreado natural de la biomasa que haga posible ofrecer al mercado biocombustibles con humedades ajustadas a las características de los centros consumidores.

Los parques deben contar con estructuras livianas, de bajo coste, y que produzcan el menor impacto posible en los enclaves forestales donde van a ser ubicados. Por ello el proyecto de cooperación Silvaplus quiere promover la construcción de estas infraestructuras con madera como principal material en las estructuras.

2. OBJETO DEL ESTUDIO Y EQUIPO RESPONSABLE

A partir de una revisión bibliográfica y de la visita a instalaciones de almacenamiento de biomasa en el sur de Galicia y en el norte de Portugal, el equipo responsable del trabajo ha elaborado alternativas de estructuras de madera capaces de servir de almacén de biomasa, facilitando el secado natural del material. Después de intercambios con agentes del sector se han diseñado prototipos de estructuras adaptadas a parques de tamaño mediano y se han estimado los costes de las alternativas.

Se propone un estudio para la construcción de un prototipo de nave en madera para la transformación de biomasa. En esta planta se producirá astilla, que se puede aprovechar directamente para la obtención de energía o para una segunda transformación de la biomasa.

El equipo responsable de la elaboración del proyecto ha sido el siguiente:

- | | |
|------------------------------------|---------------------|
| - Manuel Guaita Fernández | Dr.- Ing. Agrónomo |
| - Jorge Crespo Outes | Ing. de Montes |
| - José Ramón Aira Zunzunegui | Dr.- Ing. de Montes |
| - Alicia Caeiro Vigo | Arquitecta |
| - Carlos Sáenz González | Ing. de Montes |
| - José Antonio Lorenzana Fernández | Arquitecto |
| - Rubén Regueira Gay | Dr.- Ing. de Montes |

3. ESTUDIO DE DIFERENTES ALTERNATIVAS

3.1. Proceso productivo

La materia prima que abastece a la planta (fustes y restos de madera) llega directamente desde las explotaciones forestales o desde almacenes intermedios de mayoristas madereros. La descarga se efectúa en el parque de madera con el objeto de un secado natural o bien se incorpora directamente al proceso industrial. El procesado de troncos se inicia mediante el descortezado de los mismos en la máquina descortezadora, posteriormente se introducen en la astilladora que a su vez descarga la astilla en una cribadora vibrante obteniendo finalmente la astilla limpia, que permanece en la criba, y los elementos finos que se han cribado. En la figura 1 se muestra un esquema general del proceso productivo.

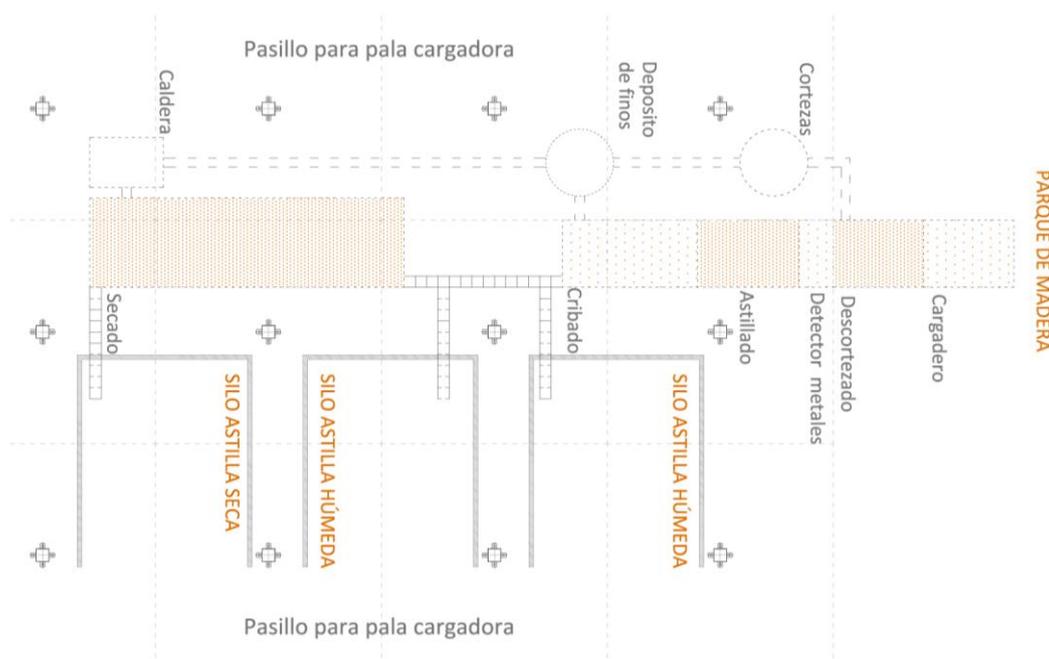


Figura 1. Proceso productivo

La aparición de elementos metálicos en los troncos podría suponer un gran problema para la integridad de las cuchillas de la astilladora por lo que la instalación va dotada de sistemas detectores de metales previamente al astillado.

Una vez diferenciadas las astillas de los elementos finos, se podrá elegir el grado de humedad de la astilla por lo que ésta se derivará al secadero o se venderá en "verde". Para el secado, la astilla se transporta a través de un tornillo sinfín desde el silo de almacenaje hasta el secadero. La astilla seca pierde un 50% de humedad situándose en valores finales de 12-14 %MS.

Una vez concluido el proceso de producción en planta se obtienen dos productos con salida al mercado, astilla verde y astilla seca. A su vez, las cortezas obtenidas en el proceso de descortezado y los elementos finos resultantes del proceso de cribado se reutilizan como combustible para la caldera de secado. Por otra parte, en función de qué tamaño tenga la astilla final, ésta se deriva hacia diferentes usos y por lo tanto se almacena en diferentes silos.

El proceso productivo completo de producción de astilla incluye varias máquinas que están conectadas entre sí mediante cintas transportadoras que aseguran la continuidad del mismo en el espacio.

Por tanto, la nave proyectada deberá contemplar la posibilidad de diferenciar distintas zonas destinadas al almacenaje de todos los productos obtenidos en las distintas etapas del proceso productivo (astilla seca, astilla verde, cortezas y elementos finos) y la capacidad de albergar bajo cubierta parte o la totalidad de la maquinaria empleada en el mismo. Además, normalmente el parque de madera y parte del proceso de generación de la astilla se hace al exterior siendo importante la ausencia de cerramientos para facilitar el trabajo de las grúas que cargan la astilla.

Entendiendo que un prototipo debe de responder a una producción media de astilla, se plantea un espacio inicial bajo cubierta de 120 m².

Al no indicarse las características específicas de la ubicación definitiva de la nave de producción de biomasa, el prototipo proyectado debe tener la capacidad de adaptarse a las diferentes parcelas disponibles independientemente de la forma geométrica que tengan.

3.2. Alternativas estudiadas

Tras un análisis inicial de las características necesarias que debe tener el prototipo proyectado se plantean tres alternativas distintas como posibles soluciones.

Cada una de las alternativas se analizó detalladamente siguiendo el proceso habitual cuando se redacta un proyecto definitivo. Inicialmente se realizó un pre-diseño de la nave con el software de diseño estructural Cadwork para averiguar el aspecto 3D que tenía la idea original. Posteriormente se procedió a determinar los materiales utilizados en las distintas partes de la nave y a la comprobación de las secciones y de los sistemas de unión de acuerdo a las bases de cálculo vigentes. Finalmente, una vez halladas las secciones resistentes de cada pieza y definidos los detalles constructivos de cada unión, se trazó el diseño definitivo de cada alternativa.

También se realizó un presupuesto estimativo de cada una de las alternativas teniendo en cuenta el coste de ejecución de la estructura portante de la nave, incluyendo los elementos estructurales, los herrajes y la mano de obra. El precio unitario de las partidas consideradas fue el mismo en todas las alternativas. Se obtuvo de este modo un precio unitario del coste de la estructura por metro cuadrado de superficie cubierta.

La madera de *Pinus pinaster* Ait. ssp atlántica constituye el material base de todas las alternativas por tratarse de una especie autóctona de la región de Galicia con buenas propiedades estructurales.

En los apartados siguientes se explican los sistemas constructivos de cada una de las alternativas acompañando la exposición por planos de diseño general, plantas, alzados, pórticos tipo y detalles de los herrajes utilizados en las uniones madera-acero.

3.2.1. Alternativa A

La primera alternativa se corresponde con el proyecto fin de máster del "Máster en Ingeniería de la Madera Estructural" de la edición 2011-2012 en la categoría "Nave de biomasa".

El sistema constructivo consiste en una nave a dos aguas formada por pórticos triarticulados. Cada pórtico se conforma por dos piezas curvas de madera laminada encolada unidas en la clave mediante rótula y fijadas al suelo con apoyos articulados. En los laterales de la nave se sitúan montantes verticales sobre los que apoya el sistema de cubierta para mantener constante la pendiente de los faldones, figura 2.

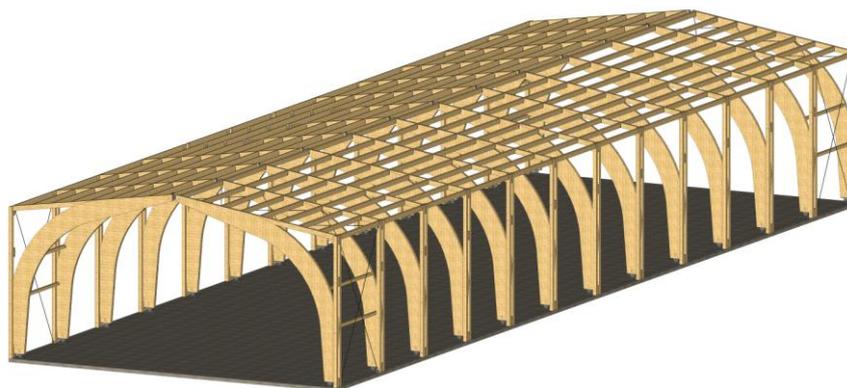


Figura 2. Alternativa A. Diseño general

El prototipo consta de 13 pórticos separados entre sí 5,20 m. Cada pórtico tiene una luz de 20 m y una altura máxima en la parte central de 9,63 m. La anchura de los pórticos es de 19 cm y la altura varía desde 60 cm en la parte inferior, 108 cm en la parte central de la transición curva, hasta 35 cm en la clave. La superficie cubierta total es de 1.248 m².

Los montantes verticales del entramado lateral son pilares compuestos de dos cordones de sección 190x200 mm rigidizados mediante separadores de madera empernados y dispuestos cada 280 cm. En el tramo intermedio de cada montante, el separador correspondiente se sustituye por el propio pórtico contribuyendo a la fijación de los dos sistemas estructurales (entramado lateral y pórticos), figura 3.

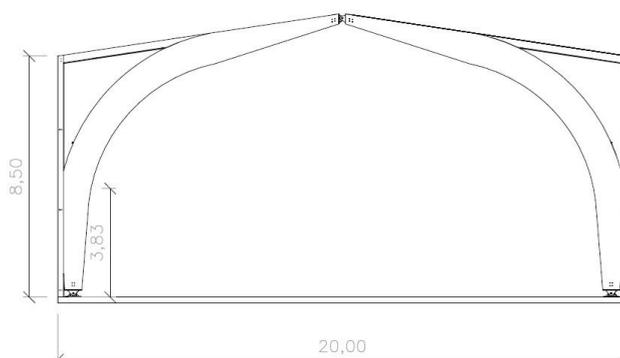
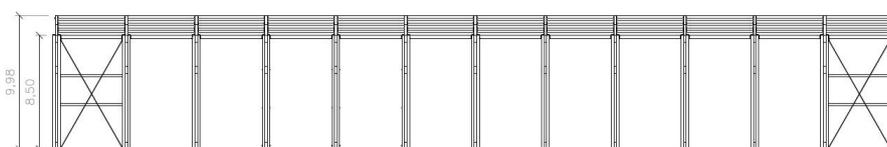


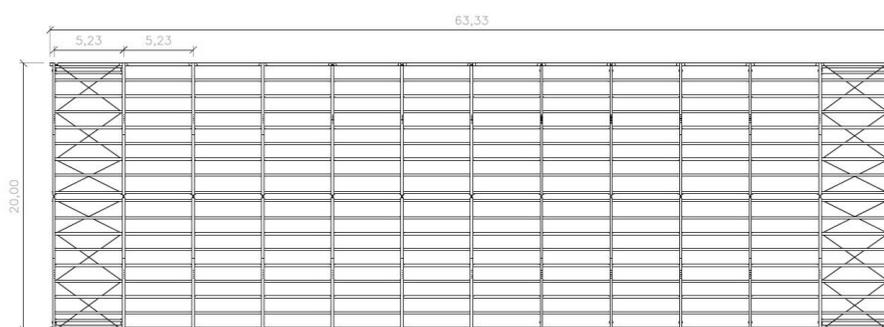
Figura 3. Alternativa A. Pórtico tipo

El conjunto de la estructura debe formar un sistema estable frente a las acciones gravitatorias y horizontales. En el plano de la estructura principal la estabilidad se garantiza con la propia concepción de la forma estructural. Sin embargo en el plano perpendicular a la estructura, dirección longitudinal de la nave, la estabilidad se consigue mediante un sistema de arriostramiento añadido. Para ello, habitualmente se forman vigas de gran canto cuyos cordones son dos pórticos consecutivos y cuya celosía se forma con las correas de cubierta, las correas laterales y unas piezas añadidas que triangulan estos vanos.

De este modo, para arriostrar el conjunto de la nave se colocan Cruces de San Andrés entre los dos pórticos iniciales y entre los dos pórticos finales. Las cruces se ejecutan con tirantes metálicos y en el cálculo se considera que las diagonales comprimidas no trabajan por el efecto de pandeo. En la figura 4 se muestran la planta y el alzado de la nave con la disposición de los arriostramientos.



Alzado



Planta

Figura 4. Alternativa A. Planta y alzado

Los dos faldones de cubierta tienen una pendiente de 9° . Sobre los pórticos apoyan directamente cabios de sección 190×260 mm para dar continuidad al faldón permitiendo una pendiente constante. En un segundo orden estructural se encuentran las correas de cubierta de sección 140×264 mm sobre las que se coloca directamente mediante tirafondos un tablero estructural OSB 3 de 19 mm de espesor.

Finalmente sobre el propio tablero OSB se extiende una lámina impermeabilizante y transpirable seguida de una chapa de zinc de cerramiento de espesor 0,70 mm.

Los apoyos articulados de los extremos y de la clave de cada pórtico se forman mediante chapas de acero S-275 JR galvanizadas de espesor 10 mm, articulados mediante un bulón que atraviesa todas las chapas. En la figura 5 se muestran los detalles de estas uniones.

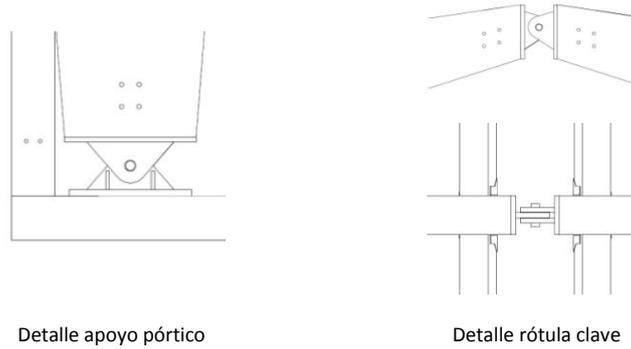


Figura 5. Alternativa A. Detalle de uniones

Los pórticos están formados por madera laminada encolada de clase resistente GL24h. La laminación se realiza utilizando piezas de pequeña escuadría de *Pinus pinaster* Ait. ssp atlántica clasificadas como C24. Los montantes verticales, cabios y correas están formados por madera aserrada estructural de la misma especie de clase resistente C24.

Si fuese necesario ampliar la superficie cubierta por requerimientos de producción, esta disposición constructiva permite una ampliación unidireccional mediante la incorporación de nuevos pórticos en la dirección longitudinal de la nave.

El coste unitario por metro cuadrado de superficie cubierta teniendo en cuenta la estructura, los herrajes metálicos y la mano de obra es aproximadamente de 175 €/m².

3.2.2. Alternativa B

La segunda alternativa consiste en una nave formada por un sistema en celosía. La estructura describe un espacio asimétrico donde una de las mitades está formada por medio pórtico en celosía que arranca desde el suelo mediante un apoyo articulado. La otra mitad se resuelve con una viga en celosía que apoya en dos pilares de madera cruzados que a su vez descansan en un murete de hormigón también con apoyos articulados, figura 6.

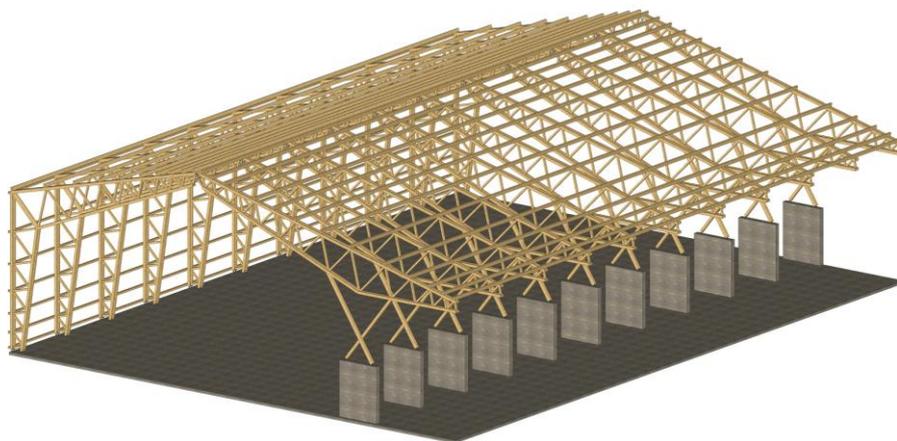


Figura 6. Alternativa B. Diseño general

El prototipo consta de 11 pórticos separados entre sí 4 m. Las cargas consideradas en el cálculo de acuerdo al Código Técnico de la Edificación DB SE-AE permiten esta separación máxima entre pórticos.

Cada pórtico tiene una luz de 23,40 m y una continuación en voladizo de 6,60 m dando lugar a una superficie cubierta total de 1.200 m². La altura libre máxima es de 11,20 m y la pendiente de los faldones es de 14°. En la figura 7 se muestra un pórtico tipo.

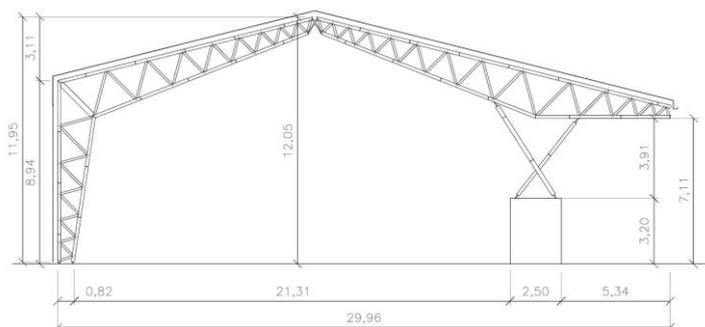


Figura 7. Alternativa B. Pórtico tipo

El modelo se diseña como elementos en celosía con una configuración de tipo Warren para reducir la cantidad de material y conseguir a su vez una mayor inercia en el elemento. El apoyo sobre el murete de hormigón se realiza mediante dos pilares cruzados de secciones 150x200 mm (el más largo) y 150x150 mm (el más corto) que contribuyen a mejorar la estabilidad en el plano de la estructura.

Para la construcción del sistema reticulado se parte de piezas de pequeña escuadría (anchura ≤ 70 mm). Los cordones superiores e inferiores son dobles y constituyen piezas continuas de sección 100x150 mm. Las bielas que unen los cordones superior e inferior se forman mediante piezas de sección 100x100 mm.

Los muretes tienen una altura de 3,20 m, una anchura de 2,50 m y un espesor de 30 cm. Además de estabilizar el conjunto estructural favorecen la protección de la estructura de madera frente golpes o roces provocados por el tránsito de maquinaria pesada.

La nave presenta un cerramiento asimétrico ya que se cubre solamente uno de los laterales dejando el otro libre para el acceso de maquinaria de carga y descarga sobre los silos de almacenamiento. El sistema de cerramiento lateral y de cubierta está formado por correas de sección 100x200 mm que apoyan directamente en dos celosías contiguas. En la figura 8 se muestra el alzado de los laterales de la nave. Se aprecia como uno de los laterales permanece abierto y el otro presenta un cerramiento lateral.

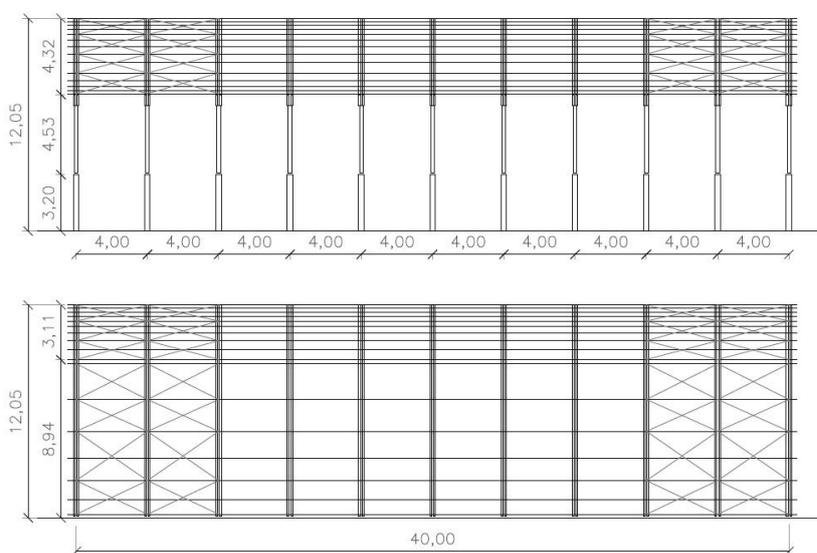


Figura 8. Alternativa B. Alzados

Para arriostrar el conjunto de la nave se colocan Cruces de San Andrés entre los tres pórticos iniciales y entre los tres pórticos finales. Las cruces se ejecutan con tirantes metálicos y en el cálculo se considera que las diagonales comprimidas no trabajan. En la figura 9 se muestra la planta de la nave y se puede apreciar la disposición de los arriostramientos entre pórticos.

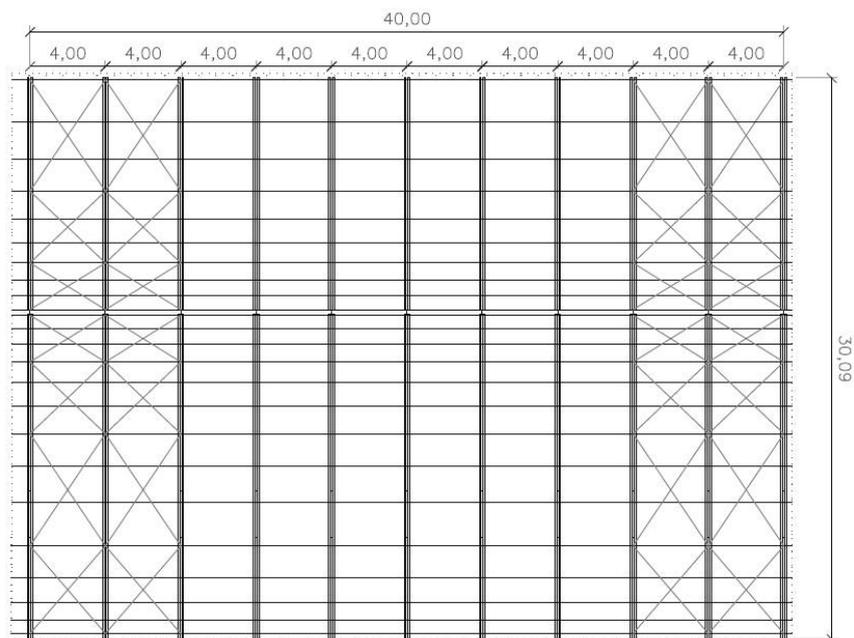


Figura 9. Alternativa B. Planta

Sobre las correas se dispone un tablero estructural tipo OSB 3 de 19 mm de espesor. Finalmente sobre el propio tablero se extiende una lámina impermeabilizante y transpirable seguida de una chapa de zinc de cerramiento de espesor 0,70 mm.

La unión de las bielas con los cordones superior e inferior se ejecuta mediante chapas de acero S-275 JR galvanizado de espesor 10 mm, articuladas mediante un perno que atraviesa las 4 piezas según se indica en el detalle de la figura 10.

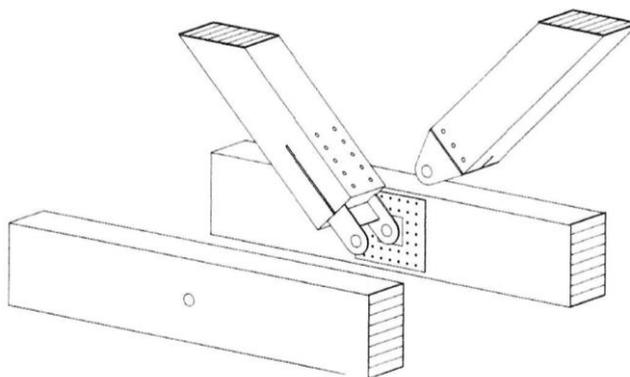


Figura 10. Alternativa B. Detalle de la unión entre bielas con cordones de celosía

Los muretes están formados por hormigón armado HA-25 y todos los elementos de madera estructural de la nave están formados por madera de *Pinus pinaster* Ait. ssp atlántica de clase resistente C24.

Al igual que sucede en la alternativa A, esta disposición constructiva permite una ampliación unidireccional en la dirección longitudinal de la nave.

El coste unitario por metro cuadrado de superficie cubierta teniendo en cuenta la estructura, los herrajes metálicos y la mano de obra es aproximadamente de 202 €/m².

3.2.3. Alternativa C

La tercera alternativa consiste en una estructura de carácter modular. Parte de un módulo inicial compuesto por un pilar central del que surgen 8 semiarcos dando lugar a un porte aparasolado con cubierta invertida. Los semiarcos trabajan comprimidos y están atirantados mediante piezas que arrancan del pilar central. La colocación sucesiva de varios módulos permite obtener la superficie cubierta requerida, figura 11.

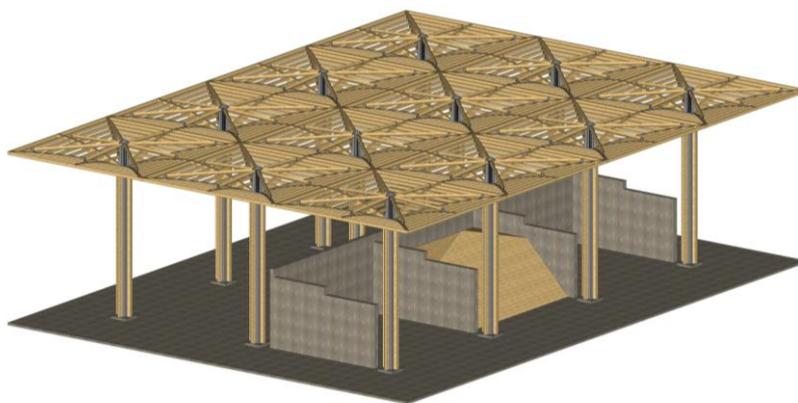


Figura 11. Alternativa C. Diseño general

Cada módulo sostiene una cubierta de 10x10 m dando lugar a una superficie cubierta de 100 m². El prototipo consta de 12 módulos por lo que la superficie cubierta total es de 1.200 m². En la figura 12 se muestra la planta de la nave donde se puede apreciar la disposición de los módulos analizada.

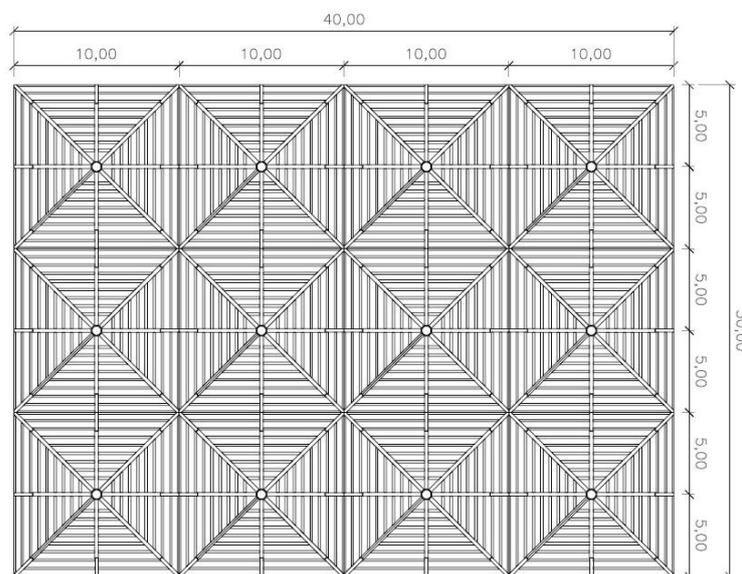


Figura 12. Alternativa C. Planta

El apoyo del módulo se resuelve con un pilar mixto formado por un perfil de sección cuadrada de acero de 580 mm de lado y espesor 10 mm, y 4 barras de madera de sección 200x240 mm unidas al perfil de acero mediante chapas soldadas ortogonalmente a cada una de las caras del pilar. El pilar está empotrado en la base mediante placa de anclaje de dimensiones 1060x1060x30 mm. La altura libre máxima es de 9,00 m y la pendiente media de los faldones es de 16,5°.

En la parte superior del pilar se anclan un total de 8 arcos de madera de sección variable en el canto, partiendo desde los 640 milímetros en la base hasta los 200 milímetros en el extremo con un ancho constante de 200 milímetros. Debido al gran vuelo que adquieren estos arcos, surge la necesidad de atirantarlos mediante elementos de madera que arrancan del propio pilar central y se unen a los arcos cerca de sus extremos. Estos tirantes presentan una sección constante de 160 x 160 milímetros. En la figura 13 se muestra el alzado de la nave donde se aprecia la disposición del pilar, los arcos y los tirantes en la parte superior.

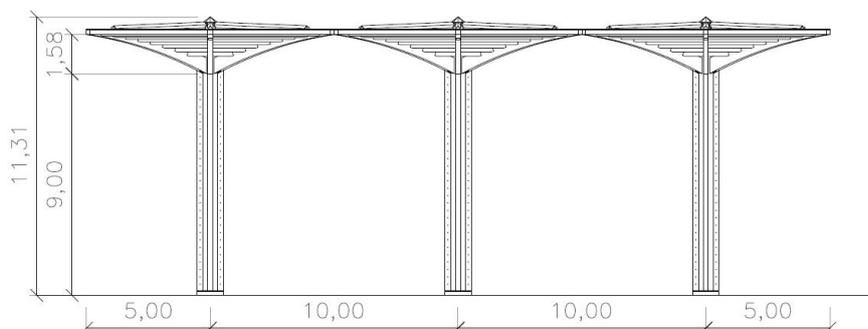


Figura 13. Alternativa C. Alzado

El sistema de cubierta apoya directamente sobre unas correas 100x200 mm con un intereje de 525 mm las cuales van atornilladas con dos tirafondos dispuestos en forma de cruz a 45° en cada extremo de las mismas.

La cubrición se realiza mediante tableros OSB 3 de 19 mm de espesor sobre los que se coloca una chapa de zinc de 0,7 mm de espesor. Para garantizar la durabilidad del tablero, se intercala entre este y la chapa de zinc una lámina impermeabilizante transpirable.

Todas las uniones se ejecutan con acero S-275 JR galvanizado de espesor 10 mm según se indica en los detalles de la figura 14. Los tirantes son de madera aserrada de *Pinus pinaster* Ait. ssp atlántica de clase resistente C24. Los pilares de madera que forman parte del pilar mixto acero-madera, los arcos y las correas son de madera laminada encolada de clase resistente GL24h, utilizando para su laminación piezas de pequeña escuadría de *Pinus pinaster* Ait. ssp atlántica clasificadas como C24. La articulación entre elementos metálicos se ejecuta mediante un bulón, y la unión entre los elementos metálicos y los elementos de madera se ejecuta mediante pasadores incrustados en el interior de las piezas.

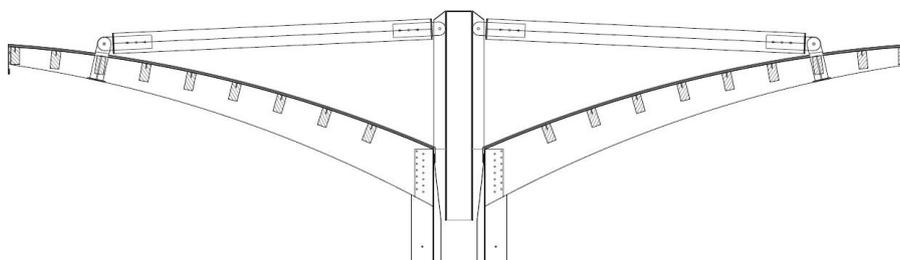


Figura 14. Alternativa C. Detalle uniones arco-tirante, tirante-pilar y arco-pilar

Esta disposición constructiva permite la ampliación de la superficie cubierta en la dirección longitudinal de la nave y en la dirección transversal, ampliación bidireccional, simplemente incorporando nuevos módulos. Las posibilidades de adaptación a la forma de la parcela y de ampliación de la superficie cubierta son mayores que en las alternativas A y B.

El coste unitario por metro cuadrado de superficie cubierta teniendo en cuenta la estructura, los herrajes metálicos y la mano de obra es aproximadamente de 193 €/m².

3.3. Análisis de decisión

Una vez analizadas todas las alternativas con el mismo nivel de detalle y habiendo realizado un presupuesto estimativo del montaje de su estructura es posible compararlas de modo objetivo para determinar cuál de ellas es la que mejor se adapta a los requerimientos del proyecto.

Con el objeto de sopesar las distintas alternativas se construye una matriz de decisión que consiste en una metodología utilizada habitualmente para determinar la mejor solución en el campo de la planificación y gestión de proyectos.

Para ello, en primer lugar se establece cuál es la decisión a tomar, es decir, de las alternativas propuestas cuál es la que mejor se adapta a las necesidades del proyecto.

Posteriormente se indican los criterios de decisión. Éstos deberán contemplar de un modo sencillo pero eficaz todas las variables que se consideran importantes a la hora de decidir entre las distintas alternativas. De este modo, se establecen los criterios de decisión siguientes:

a) Adaptabilidad: La geometría de la nave deberá adaptarse a la forma de la parcela donde estará ubicada y además deberá cubrir la maquinaria y zonas de almacenaje de la línea de producción que no necesariamente tendrá una configuración netamente lineal.

b) Crecimiento: Un incremento en la producción de biomasa implicaría aumentar la superficie cubierta de la nave por lo que es importante que el prototipo contemple esta circunstancia. El crecimiento podrá ser unidireccional cuando se pueda realizar en una sola dirección y bidireccional cuando se pueda realizar en las dos direcciones.

c) Coste: La inversión económica que es necesario realizar para ejecutar el proyecto es una variable imprescindible a tener en cuenta a la hora de evaluar la viabilidad de las diferentes alternativas.

d) Singularidad: Una construcción singular representa por sí misma un reclamo visual permitiendo ahorrar costes en las partidas publicitarias. Por ello, un sistema constructivo que resulte atractivo por su eficacia y además sea innovador aportando al prototipo ciertas notaciones de evolución se considera una cualidad positiva.

e) Impacto: La apariencia global de una construcción ubicada en el interior de un entorno rural o forestal puede provocar un impacto visual negativo cuando ésta no se encuentra en armonía con los materiales y geometrías de los elementos que la rodean. Por ello, una disposición naturalizada de la construcción definitiva se considera como un efecto positivo.

A cada uno de los criterios de decisión se le asigna un peso o proporción respecto a la unidad que determina el grado de importancia que tiene una variable con respecto a las demás. Por tanto, la suma de los pesos de las distintas variables deberá ser igual a la unidad.

Finalmente, cada una de las alternativas se evalúa respecto a cada criterio de decisión de modo que para un criterio en particular se indica el grado porcentual de cumplimiento de cada alternativa que verifica en mayor o menor medida ese criterio. Lógicamente, la suma de los porcentajes de cada alternativa referidos a un mismo criterio deberá ser del 100%.

A continuación se muestra la matriz de decisión resultante del proceso con indicación de los pesos correspondientes a cada criterio y del porcentaje de cumplimiento de cada alternativa, tabla 1.

Criterios de decisión	Pesos	Alternativas		
		A	B	C
Adaptabilidad	0,2	25%	25%	50%
Crecimiento	0,2	25%	25%	50%
Coste	0,4	35%	32%	33%
Singularidad	0,1	20%	30%	50%
Impacto	0,1	30%	20%	50%

Tabla 1. Matriz de decisión

El criterio más determinante es el "Coste" por lo que se le asigna un peso de 0,4. Los criterios de "Adaptabilidad" y "Crecimiento" se consideran también importantes aunque en menor medida que el anterior y se les asigna a ambos un peso de 0,2. Los criterios de "Singularidad" e "Impacto" se consideran de menor importancia que el resto por lo que se les asigna a ambos un valor de 0,1.

La alternativa C permite que la nave resultante no tenga necesariamente una planta rectangular por lo que el grado de cumplimiento del criterio de "Adaptabilidad" es mayor en la alternativa C que en las alternativas A y B. Considerando un orden de cumplimiento del doble para la alternativa C, se aplican los porcentajes de 50% para esta alternativa y 25% para el resto.

La alternativa C permite una ampliación de la nave de carácter bidireccional, sin embargo en las alternativas A y B la ampliación posible es de carácter unidireccional por lo que el grado de cumplimiento respecto al criterio de "Crecimiento" es del 50% para la alternativa C y del 25% para las alternativas A y B.

La alternativa más económica es la A, seguida de la C y finalmente la B. En función de los costes unitarios por metro cuadrado de superficie cubierta y la proporción que existe entre ellos se establece un grado de cumplimiento del criterio "Coste" del 35% para la alternativa A, del 33% para la alternativa C y del 32% para la alternativa B.

La alternativa C presenta un diseño constructivo único e innovador siendo la alternativa A la que presenta un diseño más clásico y habitual en este tipo de construcciones. Por ello, se asigna un grado de cumplimiento del criterio "Singularidad" del 50% para la alternativa C, del 20% para la alternativa A y del 30% para la alternativa B.

Respecto al criterio "Impacto", la alternativa C ofrece una imagen visual más naturalizada debido a que cada módulo simboliza la silueta de un pie integrado en una masa forestal que quedaría representada por la totalidad de la nave. Por el contrario, la alternativa B ofrece un impacto visual mayor debido a que emplea un sistema constructivo en celosía comúnmente utilizado en construcciones industriales con estructura metálica. Por ello, se asigna un grado de cumplimiento del 50% para la alternativa C, del 20% para la alternativa B y del 30% para la alternativa A.

Una vez construida la matriz de decisión, para averiguar cuál de las alternativas es la correcta se obtiene para cada una de ellas el denominado Grado de Adaptación al Proyecto (GAP). Se trata de un valor porcentual que se calcula multiplicando el peso de cada criterio por el grado de

cumplimiento de la alternativa en estudio sumando finalmente los valores obtenidos. La alternativa más adecuada será aquella que presente un GAP más elevado. De este modo se tiene:

- Alternativa A: $GAP(\%) = 0,2 \cdot 25 + 0,2 \cdot 25 + 0,4 \cdot 35 + 0,1 \cdot 20 + 0,1 \cdot 30 = 29\%$

- Alternativa B: $GAP(\%) = 0,2 \cdot 25 + 0,2 \cdot 25 + 0,4 \cdot 32 + 0,1 \cdot 30 + 0,1 \cdot 20 = 28\%$

- Alternativa C: $GAP(\%) = 0,2 \cdot 50 + 0,2 \cdot 50 + 0,4 \cdot 33 + 0,1 \cdot 50 + 0,1 \cdot 50 = \mathbf{43\%}$

De entre las distintas propuestas estudiadas, la alternativa C presenta un GAP más elevado (43%). Por tanto se concluye que tras la realización de un análisis de decisión basado en el método de la matriz de decisión, la alternativa C es la más adecuada y será la que se desarrolle a partir de este momento en los documentos del proyecto.

En la figura 15 se muestra una maqueta realizada a escala del módulo tipo de la alternativa C para obtener una imagen real de su composición estructural.

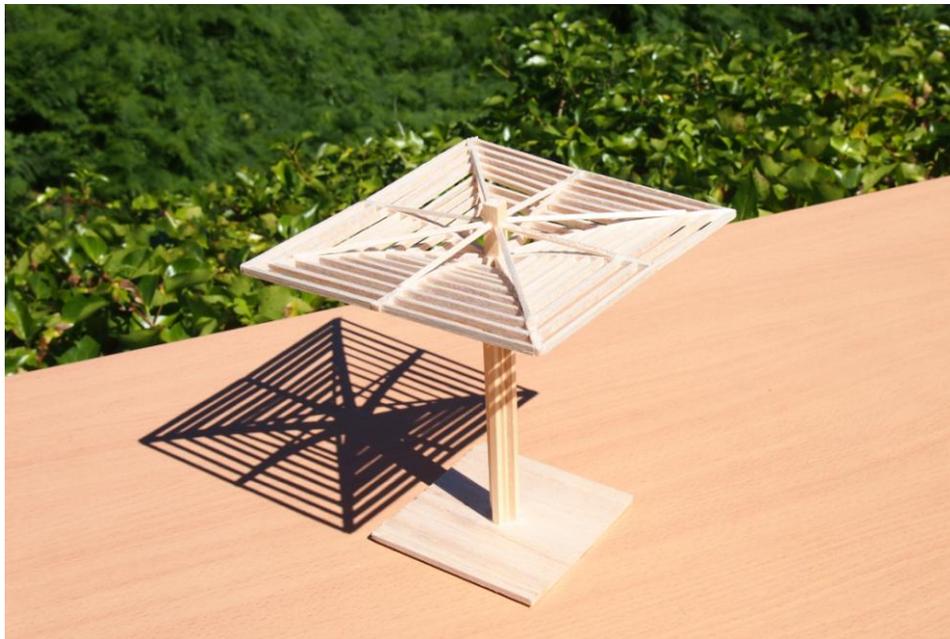


Figura 15. Alternativa C. Maqueta del módulo tipo

3.4. Ventajas de la alternativa final

- a) Originalidad: Se trata de un diseño especial modular y universal para cualquier necesidad que se sale de la clásica solución porticada.
- b) Versatilidad: Su capacidad de crecimiento en planta en dos direcciones permiten diseños específicos incluso fuera del alcance de una geometría rectangular clásica pudiendo hacer configuraciones con otras geometrías en planta.
- c) Integración paisajística: Su diseño en forma bosque de árboles genera una integración en el paisaje adaptada a cualquier punto de implantación.
- d) Sostenibilidad: El empleo de madera de *Pinus pinaster* Ait. ssp atlántica en casi la totalidad de la estructura lo convierte en un sumidero de CO₂ y además con uso requerido de madera certificada con lo que cumple con los criterios medioambientales propios de las exigencias actuales.
- e) Imagen corporativa: Una planta de estas características se convertirá en un referente por el calado que tenga como imagen corporativa asociando claramente sus instalaciones a la actividad forestal que desarrolla.
- f) Prefabricación: Los elementos principales vienen realizados en empresas de madera laminada encolada con el cumplimiento de toda la normativa europea vigente y por tanto con mínimo tiempo de montaje y máximo nivel de prefabricación.
- g) Seguridad: Estructura calculada con los preceptos de Seguridad Estructural que exige el Código Técnico de la Edificación Español y los Eurocódigos Estructurales para su implantación también en otros países de Europa que se acogen a esta normativa.
- h) Diseño: Todos los elementos se han concebido con una protección por diseño en aras a su durabilidad como solución estructural con madera.
- i) Coste: El gasto es similar a otras edificaciones que resuelvan el mismo problema con madera estructural.

4. MEMORIA ESTRUCTURAL

4.1. Descripción

4.1.1. Consideraciones generales

El presente proyecto consiste en la construcción de una nave para la producción de astilla para biomasa. El proyecto consta de un espacio bajo cubierta abierto al exterior para el alojamiento de la maquinaria involucrada en el proceso productivo y para el almacenamiento de la astilla y productos secundarios.

El material base utilizado para la ejecución de la nave es madera de pino gallego (*Pinus Pinaster* Ait. ssp atlántica) como condicionante de partida por parte del cliente. La clase resistente es C24 para los elementos de madera aserrada y para las tablillas que conforman la madera laminada encolada, permitiendo así obtener una clase resistente GL24h.

4.1.2. Periodo de servicio

El periodo de servicio previsto es de 50 años.

4.1.3. Sistema de cimentación

En principio y considerando que la nave se proyecta sobre un terreno de características normales con una capacidad portante de 2 Kp/cm², se recurrirá a una cimentación consistente en la colocación de una zapata aislada debajo de cada pilar empotrado con vigas de atado entre ellas. Las zapatas irán sobre una base de hormigón pobre HM-20 con una profundidad de 10 cm.

Para la determinación de los cimientos definitivos se utilizarán las características del terreno indicadas en las especificaciones del estudio geotécnico que deberá hacerse previamente a la ejecución de la obra.

4.1.4. Sistema estructural

El apoyo de cada módulo (correspondiente a la alternativa C) se resuelve con un pilar mixto formado mediante un perfil de sección cuadrada de acero de 580 mm de lado. Sobre las caras del pilar se sueldan 4 chapas también de acero sobre las que se realizan orificios para unirlos, mediante pasadores de 16 mm de diámetro, con 4 pilares de madera colocados en la parte externa de sección 200x240 mm que contribuyen a aumentar la inercia del pilar.

En la parte superior del pilar se anclan un total de 8 arcos de madera mediante una chapa en alma de acero de 10 mm de espesor y 14 pasadores de diámetro 16 mm dando lugar a la estructura de cubierta.

Los arcos presentan una sección variable en el canto arrancando desde los 640 mm en la base hasta los 200 mm en el extremo, con un ancho constante de 200 mm. Los arcos tienen un gran vuelo por lo que se atirantan mediante piezas de madera que parten del propio pilar hasta llegar casi el extremo de cada arco. Para unir los tirantes con el pilar se introduce sobre el mismo un

tubo de acero que deja al exterior 8 alas sobre las que se fijan los tirantes mediante enlace articulado.

Los tirantes presentan una sección constante de 160x160 mm. Se fijan tanto a los arcos como al pilar central mediante 2 chapas de acero embebidas en cada una de las testas. Las chapas se fijan al tirante mediante 3 pasadores de diámetro 20 mm. A su vez se coloca otra chapa y 2 pasadores de diámetro 12 mm en el propio arco.

El sistema de cubierta apoya directamente sobre unas correas 100x200 mm con un intereje de 525 mm. Las correas se fijan a los arcos mediante dos tirafondos "todorosca" de 9x240 mm tipo VGS (empresa Rothoblaas). Se colocan 2 tirafondos de este tipo dispuestos en cruz a 45° en cada extremo de la correa.

El cerramiento de la cubierta se realiza mediante tableros OSB de clase técnica 3 y de 19 mm de espesor. Sobre los tableros se coloca una chapa de zinc de 0,7 mm de espesor. Para garantizar la durabilidad del tablero, se intercala entre este y la chapa de zinc una lámina impermeabilizante transpirable.

Todos los elementos metálicos de la estructura son de acero tipo S-275 JR galvanizado y de 10 mm de espesor.

Los tirantes son de madera aserrada de *Pinus pinaster* Ait. ssp atlántica de clase resistente C24. Los pilares de madera que forman parte del pilar mixto acero-madera, los arcos y las correas son de madera laminada encolada de *Pinus pinaster* Ait. ssp atlántica de clase resistente GL24h.

La pendiente de la cubierta se ejecuta de modo que la recogida de aguas se realice por el interior del pilar central. Esta solución constructiva facilita la adhesión de los módulos ya que no es necesario depender de un elemento que recoja el agua en el contorno de cada uno de ellos. El agua que cae por el pilar central es evacuada hacia el exterior de la estructura mediante un conducto ubicado en un enano de hormigón que presenta la zapata en su parte superior. Dicho conducto comunica directamente con la red de aguas pluviales.

Por encima de la salida del tubo de agua se instala una solera de hormigón armado HA-25 de 15 cm de espesor la cual permite que sobresalgan los enanos de las zapatas sobre la rasante otros 15 cm. Esta pequeña separación del suelo protege a la estructura de posibles golpes causados por el tránsito de maquinaria y a su vez aísla la madera del suelo prolongando su durabilidad.

4.1.5. Especificaciones técnicas de los materiales utilizados

Los materiales que se emplean en la cimentación y en la estructura así como sus características más importantes, los niveles de control previstos y los coeficientes de seguridad correspondientes se indican en el siguiente listado:

Madera aserrada para tirantes

Nombre científico	<i>Pinus pinaster</i> Ait. ssp atlántica
Nombre común	Pino gallego
Clase resistente	C24
Resistencia característica a flexión ($f_{m,k}$)	24 N/mm ²

Resistencia característica a tracción paralela ($f_{t,0,k}$)	14 N/mm ²
Resistencia característica a tracción perpendicular ($f_{t,90,k}$)	0,4 N/mm ²
Resistencia característica a compresión paralela ($f_{c,0,k}$)	22 N/mm ²
Resistencia característica a compresión perpendicular ($f_{c,0,k}$)	2,5 N/mm ²
Resistencia característica a cortante ($f_{v,k}$)	4 N/mm ²
Módulo elasticidad paralelo medio ($E_{0,medio}$)	11.000 N/mm ²
Módulo transversal medio ($G_{,medio}$)	690 N/mm ²
Clase de servicio	3
Densidad característica (ρ_k)	350 Kg/m ³
Exposición (Clase de Uso)	CU 3.2
Tipo de protección	Profunda
Nivel de Penetración	NP3
Tratamiento protector	Autoclave
Producto protector	Sales hidrosolubles

Madera laminada encolada para pilares, arcos y correas

Nombre científico	<i>Pinus pinaster</i> Ait. ssp atlántica
Nombre común	Pino gallego
Clase resistente	GL24h
Resistencia característica a flexión ($f_{m,k}$)	24 N/mm ²
Resistencia característica a tracción paralela ($f_{t,0,k}$)	16,5 N/mm ²
Resistencia característica a tracción perpendicular ($f_{t,90,k}$)	0,4 N/mm ²
Resistencia característica a compresión paralela ($f_{c,0,k}$)	24 N/mm ²
Resistencia característica a compresión perpendicular ($f_{c,0,k}$)	2,7 N/mm ²
Resistencia característica a cortante ($f_{v,k}$)	2,7 N/mm ²
Módulo elasticidad paralelo medio ($E_{0,medio}$)	11.600 N/mm ²
Módulo transversal medio ($G_{,medio}$)	720 N/mm ²
Densidad característica (ρ_k)	380 Kg/m ³
Clase de servicio	2
Exposición (Clase de Uso)	CU2
Tipo de protección	Superficial
Nivel de Penetración	NP1
Tratamiento protector	Pincelado/Pulverizado
Producto protector	Lasur al agua

Hormigón armado para cimentación

HA-25/B/20/Ila

Resistencia característica especificada	25 N/mm ²
Consistencia	Plástica
Asiento en cono de Abrams	3-5 cm
Exposición ambiental	Ila
Tamaño máximo del árido	20mm
Nivel de control	Estadístico
Recubrimientos mínimo / nominal	50/70 mm
Máxima relación agua / cemento	0,60
Tipo de cemento	CEM I 32,5
Contenido mínimo de cemento	300 Kg/m ³
Compactación	Vibrado

Dependiendo de la ubicación final de la nave y de las características del suelo, la clase de exposición considerada inicialmente como Ila podría cambiar modificando las propiedades del hormigón que se deberán adecuar a la exposición real.

El hormigón empleado debe venir acompañado de documentación que acredite su procedencia.

Acero para armaduras

Designación	B 500 S
Clase de acero	Soldable
Límite elástico mínimo	500 N/ mm ²
Carga unitaria de rotura mínima	550 N/mm ²
Alargamiento de rotura mínimo en % sobre base de 5 \emptyset	12
Relación mínima en ensayo entre carga unitaria de rotura e límite elástico	1,05
Nivel de control	Normal

Acero para pilares y uniones mecánicas

Designación	S-275 JR
Límite elástico mínimo	
espesor \leq 16 mm	275 N/mm ²
espesor $>$ 16 mm y \leq 40 mm	265 N/mm ²

espesor > 40 mm y ≤ 63 mm	255 N/mm ²
espesor > 63 mm y ≤ 80 mm	245 N/mm ²
espesor > 80 mm y ≤ 100 mm	235 N/mm ²
Porcentaje mínimo alargamiento tras fractura	
espesor > 3 mm y ≤ 40 mm	23%
espesor > 40 mm y ≤ 63 mm	22%
espesor > 63 mm y ≤ 100 mm	21%
Resistencia a tracción	
espesor ≤ 3 mm	430 N/mm ² -580 N/mm ²
espesor > 3 mm y ≤ 100 mm	410 N/mm ² -560 N/mm ²
Relación mínima en ensayo entre carga unitaria de rotura y límite elástico	1,05
Nivel de control	Normal
Protección	Galvanizado

Las piezas se suministrarán a obra con una declaración del suministrador sobre su resistencia y la categoría de fabricación.

Tableros estructurales para cubierta

Tipo de tablero	OSB
Clase técnica	3
Clase de servicio	2
Clase de uso	2
Contenido de humedad	2-12%
Resistencia flexión en dirección longitudinal	18 N/mm ²
Resistencia flexión en dirección transversal	9 N/mm ²
Módulo de elasticidad flexión en dirección longitudinal	3.500 N/mm ²
Módulo de elasticidad flexión en dirección transversal	1.400 N/mm ²
Cohesión interna	0,3 N/mm ²
Espesor	19 mm

4.2. Normativa de aplicación

La estructura se ha comprobado siguiendo los criterios establecidos en los Documentos Básicos:

- CTE DB SE: Bases de cálculo.
- CTE DB SE-AE: Acciones en la edificación.
- CTE DB SE-M: Madera.
- EC 5: Madera
- CTE DB SE-A: Acero
- CTE DE SE-C: Cimientos
- EHE 08: Hormigón

Se han tenido en cuenta, además, las especificaciones y criterios de la siguiente normativa NCSR-02 "Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación" llegando a la conclusión de que no es de aplicación considerar un efecto sísmico en este proyecto.

4.3. Control de ejecución

Nivel de control	Normal
Categoría de ejecución	B

4.4. Bases de cálculo

El Código Técnico de la Edificación adopta un método de cálculo en Estados límite y utiliza coeficientes parciales de seguridad (afectando a la resistencia y a las acciones). En 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. Los valores de cálculo no tienen en cuenta la influencia de errores humanos groseros.

Los métodos de cálculo de las tensiones admisibles, tradicionales en la madera, son así, sustituidos por los de coeficientes parciales que ya son habituales en otros materiales como el hormigón o el acero.

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 los que ha sido concebido.

- Estados límite últimos:

Los estados límite últimos son los que, de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio del edificio o el colapso total o parcial del mismo. Como estados límite últimos deben considerarse los debidos a:

a) pérdida del equilibrio del edificio, o de una parte estructuralmente independiente, considerado como un cuerpo rígido.

b) fallo por deformación excesiva, transformación de la estructura o de parte de ella en un mecanismo, rotura de sus elementos estructurales (incluidos apoyos y cimentación) o de sus uniones, o inestabilidad de elementos estructurales incluyendo los originados por efectos dependientes del tiempo (corrosión, fatiga).

- Estados límite de servicio:

Los estados límite de servicio son los que, de ser superados, afectan al confort y bienestar de los usuarios o de terceras personas, al correcto funcionamiento del edificio o a la apariencia de la construcción.

Los estados límite de servicio pueden ser reversibles e irreversibles. La reversibilidad se refiere a las consecuencias que excedan los límites especificados como admisibles, una vez desaparecidas las acciones que las han producido. Como estados límite de servicio deben considerarse los relativos a:

a) las deformaciones (flechas, asientos o desplomes) que afecten a la apariencia de la obra, al confort de los usuarios, o al funcionamiento de equipos e instalaciones.

b) las vibraciones que causen una falta de confort de las personas, o que afecten a la funcionalidad de la obra.

c) los daños o el deterioro que pueden afectar desfavorablemente a la apariencia, a la durabilidad o a la funcionalidad de la obra.

Respecto a los materiales estructurales se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

Madera aserrada y madera laminada encolada

Los elementos de madera se dimensionan según las directrices indicadas por la norma CTE DB SE-M (Seguridad Estructural-Madera) y la norma europea Eurocódigo 5 UNE-EN 1995-1-1:2006/A1:2010 (Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación), determinándose coeficientes de aprovechamiento y deformaciones así como la estabilidad de acuerdo a los principios de la Mecánica Racional y de la Resistencia de Materiales.

La estructura se supone sometida a las acciones exteriores ponderándose para la obtención de los coeficientes de aprovechamiento y comprobación de secciones, y sin mayorar para las comprobaciones de deformaciones de acuerdo con los límites de agotamiento de tensiones y límites de flecha establecidos.

Para el cálculo de los elementos comprimidos se tiene en cuenta el pandeo por compresión, y para los flectados el pandeo lateral de acuerdo a las indicaciones de la norma.

El programa de cálculo para el análisis de la estructura y dimensionamiento de las piezas de madera fue el *Robot Structural Analysis*, distribuido por la empresa Autodesk.

Acero laminado

Los elementos metálicos se dimensionan según las directrices indicadas por la norma CTE DB SE-A (Seguridad Estructural-Acero), determinándose coeficientes de aprovechamiento y deformaciones

así como la estabilidad de acuerdo a los principios de la Mecánica Racional y de la Resistencia de Materiales.

La estructura se supone sometida a las acciones exteriores ponderándose para la obtención de los coeficientes de aprovechamiento y comprobación de secciones, y sin mayorar para las comprobaciones de deformaciones de acuerdo con los límites de agotamiento de tensiones y límites de flecha establecidos.

Para el cálculo de los elementos comprimidos se tiene en cuenta el pandeo por compresión, y para los flectados el pandeo lateral de acuerdo a las indicaciones de la norma.

Cimentación y solera

Los elementos de hormigón correspondientes a la cimentación y solera se dimensionan de acuerdo a la norma CTE DB SE-C (Seguridad Estructural-Cimientos) y a la norma EHE-08 (Instrucción de Hormigón Estructural), determinándose coeficientes de aprovechamiento y deformaciones así como la estabilidad de acuerdo a los principios de la Mecánica Racional y de la Resistencia de Materiales.

El comportamiento de la cimentación se comprueba frente a la capacidad portante (resistencia y estabilidad) y la aptitud al servicio para las situaciones de dimensionado que sean pertinentes.

Las condiciones que aseguren el buen comportamiento de los cimientos se deben mantener durante la vida útil de la construcción, teniendo en cuenta la evolución de las condiciones iniciales y su interacción con la estructura.

4.4.1. Clasificación de acciones

Las acciones a considerar en el cálculo se clasifican por su variación en el tiempo en:

a) Acciones permanentes (G): Son aquellas que actúan en todo instante sobre el edificio con posición constante. Su magnitud puede ser constante (como el peso propio de los elementos constructivos o las acciones y empujes del terreno) o no (como las acciones reológicas o el pretensado), pero con la variación despreciable o tendiendo monótonamente hasta un valor límite.

b) Acciones variables (Q): Son aquellas que pueden actuar o no sobre el edificio, como las debidas al uso o a las acciones climáticas.

c) Acciones accidentales (A): Son aquellas cuya probabilidad de ocurrencia es pequeña pero de gran importancia, como sismo, incendio, impacto o explosión.

Las deformaciones impuestas (asientos, retracción, etc.) se considerarán como acciones permanentes o variables, atendiendo a su variabilidad.

La magnitud de la acción se describe por diversos valores representativos, dependiendo de las demás acciones que se deban considerar simultáneas con ella, tales como el valor característico, de combinación, frecuente y casi permanente.

4.4.2. Valores característicos

Como valor característico de las acciones permanentes, G_k , se adopta, normalmente, su valor medio. En los casos en los que la variabilidad de una acción permanente pueda ser importante, o cuando la respuesta estructural sea muy sensible a la variación de la misma, se considerarán dos valores característicos: un valor característico superior, correspondiente al fractil del 95 % y un

valor característico inferior, correspondiente al fractil 5 %, suponiendo una distribución estadística normal.

Como valor característico de las acciones variables, Q_k , se adopta, normalmente, alguno de los siguientes valores:

a) un valor superior o inferior con una determinada probabilidad de no ser superado en un periodo de referencia específico.

b) un valor nominal, en los casos en los que se desconozca la correspondiente distribución estadística.

En el caso de las acciones climáticas, los valores característicos están basados en una probabilidad anual de ser superado de 0,02, lo que corresponde a un periodo de retorno de 50 años.

Las acciones accidentales, A_k , se representan por un valor nominal. Este valor nominal se asimila, normalmente, al valor de cálculo.

4.4.3. Otros valores representativos

a) Valor de combinación de una acción variable: representa su intensidad en caso de que, en un determinado periodo de referencia, actúe simultáneamente con otra acción variable, estadísticamente independiente, cuya intensidad sea extrema. Se representa como el valor característico multiplicado por un coeficiente de combinación ψ_0 .

b) Valor frecuente de una acción variable: se determina de manera que sea superado durante el 1 % del tiempo de referencia. Se representa como el valor característico multiplicado por un coeficiente ψ_1 .

c) Valor casi permanente de una acción variable: se determina de manera que sea superado durante el 50 % del tiempo de referencia. Se representa como el valor característico multiplicado por un coeficiente ψ_2 .

4.4.4. Valores de cálculo

Se considera que hay suficiente estabilidad del conjunto de la edificación, o de una parte independiente del mismo, si para todas las situaciones de dimensionado pertinentes, se cumple la siguiente condición:

$$E_{d,dst} < E_{d,stab}$$

Siendo,

$E_{d,dst}$ valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras;
 $E_{d,stab}$ valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras.

Se considera que hay suficiente resistencia de la estructura portante, de un elemento estructural, sección, punto o de una unión entre elementos, si para todas las situaciones de dimensionado pertinentes, se cumple la siguiente condición:

$$E_d < R_d$$

Siendo,

E_d	valor de cálculo del efecto de las acciones;
R_d	valor de cálculo de la resistencia correspondiente del elemento.

4.4.5. Combinación de acciones

El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondientes a una situación persistente o transitoria, se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Es decir, considerando la acción simultánea de:

a) todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_k$), incluido el pretensado ($\gamma_P \cdot P$).

b) una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ($\gamma_Q \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis.

c) el resto de acciones variables, en valor de cálculo de combinación ($\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$).

Los valores de los coeficientes de seguridad, γ , se establecen en la tabla 2 para cada tipo de acción, atendiendo para comprobaciones de resistencia a si su efecto es favorable o desfavorable, considerada globalmente.

Para comprobaciones de estabilidad, se diferenciará, aun dentro de la misma acción, la parte favorable (la estabilizadora), de la parte desfavorable (la desestabilizadora).

Los valores de los coeficientes de simultaneidad, ψ , se establecen en la tabla 3.

El valor de cálculo de las acciones correspondiente a una situación extraordinaria, se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + A_d + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Es decir, considerando la acción simultánea de:

a) todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_k$), incluido el pretensado ($\gamma_P \cdot P$).

b) una acción accidental cualquiera, en valor de cálculo (A_d), debiendo analizarse sucesivamente con cada una de ellas.

c) una acción variable cualquiera, en valor de cálculo frecuente ($\gamma_Q \cdot \psi_1 \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal, una tras otra en distintos análisis con cada acción accidental considerada.

d) el resto de acciones variables, en valor de cálculo casi permanente ($\gamma_Q \cdot \psi_2 \cdot Q_k$).

En situación extraordinaria, todos los coeficientes de seguridad ($\gamma_G, \gamma_P, \gamma_Q$), son iguales a cero si su efecto es favorable, o a la unidad si es desfavorable, en los términos anteriores.

En los casos en que la acción accidental sea la acción sísmica, todas las acciones variables concomitantes se tendrán en cuenta con su valor casi permanente, según la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Tipo de verificación	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad	Permanente	desestabilizadora	estabilizadora
	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 2. Coeficientes parciales de seguridad para las acciones (γ)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso			
- 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)	La propia del uso desde el que se accede		
- 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

Tabla 3. Coeficientes de simultaneidad (ψ)

4.4.6. Deformaciones

Flechas

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 solo 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, ramillones, 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.

Cuando se considere el confort de los usuarios, 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 solamente las acciones de corta duración, la flecha relativa, es menor que 1/350.

Cuando se considere la apariencia de la obra, 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 casi permanente, la flecha relativa es menor que 1/300.

Desplazamientos horizontales

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 que:

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

Cuando se considere la apariencia de la obra, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral, si ante cualquier combinación de acciones casi permanente, el desplome relativo es menor que 1/250.

En general es suficiente que dichas comprobaciones se satisfagan en dos direcciones sensiblemente ortogonales en planta.

4.4.7. Acciones consideradas en el cálculo

Las acciones consideradas en el cálculo se indican en la tabla 4. El peso propio lo considera el software de cálculo directamente teniendo en cuenta una densidad de la madera de 500 kg/m³.

Caso	Tipo de carga	Valor de la carga
1	Permanente	0,400 kN/m ²
2	Sobrecarga de uso uniforme	0,400 kN/m ²
3	Nieve	1,700 kN/m ²
	Nieve por acumulación en franja de 2m desde eje del pilar	2,645 kN/m ²
4	Viento de presión	1,450 kN/m ²
5	Viento de succión	2,540 kN/m ²
6	Nieve asimétrica	0,850 kN/m ² –1,700 kN/m ²
	Nieve asimétrica por acumulación en franja de 2m desde eje del pilar	1,323 kN/m ² –2,645 kN/m ²
7	Viento de presión asimétrico	0,725 kN/m ² –1,450 kN/m ²
8	Sobrecarga de uso puntual	2,000 kN

Tabla 4. Acciones consideradas en el cálculo

5. PRESUPUESTO , RESUMEN GENERAL

CAPÍTULO	RESUMEN	EUROS	%
1	MOVIMIENTO DE TIERRAS.....	1.238,40	0,42
2	CIMENTACIÓN Y SOLERA	53.325,61	18,11
3	SANEAMIENTO	1.240,42	0,42
4	ESTRUCTURA	221.685,32	75,28
5	HERRAJES.....	10.383,52	3,53
6	CUBIERTA.....	5.397,11	1,83
7	SEGURIDAD Y SALUD	1.192,60	0,41
TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL		294.462,98	
3,00% Control de calidad		8.833,89	
		Subtotal	303.296,87
13,00% Gastos generales		39.428,59	
6,00% Beneficio industrial		18.197,12	
SUMA DE G.G. y B.I		57.625,71	
		Subtotal	360.922,58
21,00% I.V.A.		75.793,74	
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL		436.716,32	

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de CUATROCIENTOS TREINTA Y SEIS MIL SETECIENTOS DIECISÉIS EUROS con TREINTA Y DOS CÉNTIMOS.

30 de septiembre de 2013