



MEMORIA

DISEÑO ESTRUCTURAL Y VALORACIÓN DE UNA PASARELA EN
LAS LAGUNAS DE RUIDERA,

BAÑO DE LAS MULAS, EN EL TM DE OSSA DE MONTIEL
(ALBACETE)

Autor:

Mata Mota, Natalia

Tutor:

María José Pelufo Carbonell

DICIEMBRE 2017

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

CURSO 2016/2017

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA





PRESENTACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Este documento es el resultado del trabajo realizado a lo largo del Grado de Ingeniería Civil y que se traduce en el diseño y valoración de una pasarela de materiales compuestos, que constituye el objeto de mi Trabajo Final de Grado.

El proyecto se divide en dos partes: Bloque A, Introducción a los Materiales Compuestos y Bloque B, Diseño y valoración de la pasarela.

En la primera parte se proporciona a los lectores una visión general de los materiales compuestos, para familiarizarles con su uso en el campo de ingeniería civil, ya que, hasta ahora, no se han tenido en cuenta en la industria de la Construcción.

En la segunda parte, se concreta el proyecto eligiendo los materiales más idóneos, justificando el diseño realizado y elaborando una valoración estimativa del mismo.

Quiero comenzar expresando mi agradecimiento a mi tutora, Dra. Ing. María José Pelufo, por darme la oportunidad de realizar este trabajo, prestarme su apoyo y facilitarme mi labor con su enfoque. Igualmente, mi agradecimiento a Dr. Ing. Navrath Uwe de "RWTH Aachen", que me ha proporcionado las herramientas necesarias para llevarlo a cabo. Mi gratitud también va dirigida a la Dra. Nora Lardiés, de "Aimplas – Instituto Tecnológico del Plástico" por darme información y referencias en relación con este campo.

Quiero manifestar también mi reconocimiento a la empresa UNIFORT SL, a la que se hizo una consulta en relación a una fase del proyecto y nos facilitó una posible solución.

Por último, agradecer a mi familia por prestarme su apoyo y su comprensión durante el tiempo que ha durado la elaboración de este proyecto.



PRESENTACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Este documento es el resultado del trabajo realizado a lo largo del Grado de Ingeniería Civil y que se traduce en el diseño y valoración de una pasarela de madera, que constituye el objeto de mi Trabajo.

Primeramente, se presenta una introducción y un análisis de la situación sobre el emplazamiento de la obra que se pretende realizar. Una vez planteado el motivo del proyecto, se procederá a un análisis comparativo entre la madera como material estructural y el resto de materiales empleado en la construcción.

Una descripción pormenorizada de la madera como material estructural, al igual que sus

Quiero comenzar expresando mi agradecimiento a mi tutora, Dr. Ing. María José Pelufo, por darme la oportunidad de realizar este trabajo, prestarme su apoyo y facilitarme mi labor con su enfoque.

Por último, agradecer a mi familia, a mis amigos más personales y a mi pareja, por prestarme su apoyo y su comprensión durante el tiempo que ha durado la elaboración de este proyecto.



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
2	OBJETO.....	2
3.	ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL	3
3.1	Antecedentes	3
3.2	Situación actual	3
4.	LOCALIZACIÓN.....	4
5.	ESTUDIOS PREVIOS	6
5.1	Estudio topográfico	6
5.2	Estudio geotécnico-geológico.....	7
5.3	Estudio hidráulico.....	7
6.	ANÁLISIS COMPARATIVO	8
6.1	Análisis entre los distintos materiales de construcción	8
6.2.	Tipología de puente /Estudio de soluciones.....	11
5.4.3	Solución adoptada.....	16
6	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	17
6.1	Características de la madera estructural	17
6.2	Propiedades físicas	18
6.3	Propiedades mecánicas.....	21
6.4	Clasificación de madera estructural	23
6.5	Clases de servicio y niveles de riesgo	26
6.6	Comprobaciones a realizar	27
6.7	Modelo estructural, materiales y acciones	34
6.7	Asignación de cargas	41
6.8	Combinación de acciones.....	42
6.9	Uniones.....	43
6.10	Resultado del análisis y descripción de la pasarela.....	46
7	PROCESO CONSTRUCTIVO	58
8.	PLAN DE OBRA	60
9	REFERENCIAS.....	61



1 INTRODUCCIÓN

Desde los comienzos de la existencia del hombre, éste ha estado en un continuo contacto y directo con la naturaleza y los elementos de los cuales ésta se compone. Su mayor objetivo ha sido la supervivencia a través de una convivencia máxima, creándose un lazo humano-naturaleza terapéutico que proporcionaba carácter calmante y regenerativos.

Es una realidad que actualmente existen estudios que demuestran que el empleo de la naturaleza como elemento de ayuda terapéutica tienen gran éxito protegiendo al propio individuo sin intervenir químicamente. Especialmente en dificultades del día a día que pueden llegar a complicarse, sobre todo causadas por el estrés, agudizando la memoria y mejorando la capacidad de concentración y estado anímico del ser humano.

En otras palabras, está comprobado que el contacto por parte de los humanos con la naturaleza está total e íntimamente relacionado con la mejora de la calidad de vida, y, por lo tanto, cualquier ruta guiada por espacios naturales va a beneficiar todo este vínculo.

Por otro lado, el ser humano desde el inicio de sus existencia ha necesitado constantemente transportarse de un lugar a otro a través de ciertas rutas y caminos, éstos ubicados a su vez en mitad del espacio natural que constituye la Tierra como tal, pero que con el paso del tiempo la mano del hombre ha ido interviniendo de forma casi exponencial en muchos espacios naturales con el fin de urbanizarlos, y ya pocos espacios quedan limpios o mínimamente manipulados con una finalidad estrictamente necesaria y demandada.

Es debido a esto que cada vez se intenta llevar a cabo de forma más rigurosa una conexión entre las obras de nueva construcción y la naturaleza del espacio en el que ésta se localiza, pretende localizar, para ser más exactos se pretende reforzar cada vez más el lazo mencionado humano-naturaleza. Esta relación es más fácil de entender y respetar si se introduce al propio ser humano como parte de la naturaleza.

La solvencia a este problema es la creación y empleo de lo que se conoce como Vías Verdes, que constituyen un instrumento o medio para introducir y promover, e incluso preservar, una cultura donde el ocio, deporte y la movilidad se desarrollen al aire libre, sin peligros, y sin vehículos de movilidad motorizada, en otras palabras, movilidad sostenible.

Vía verde es la denominación española de los recorridos peatonales y ciclistas en el medio natural resultado del acondicionamiento de infraestructuras en desuso, principalmente antiguos trazados ferroviarios o carreteras sin servicio.

El Programa Vías Verdes, fue desarrollado desde 1993 por el Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente, conocido actualmente como Ministerio de Agricultura,

Alimentación y Medio Ambiente, en colaboración con ADIF y RENFE Operadora, y con la participación de Comunidades Autónomas, Diputaciones, Cabildos y Ayuntamientos, así como grupos ciclistas, ecologistas y colectivos ciudadanos.

Por otra parte, la madera es un elemento que ha existido simultáneamente al ser humano, además de tradicionalmente empleado como material en la edificación desde entonces por casi todas las culturas. Se solía emplear en la construcción de refugios, para la creación y formación de armas para la caza...

Actualmente se emplea en complejas construcciones, aunque con la falta de un suministro regular de madera, el gran avance tecnológico de la época y la aparición del hormigón y acero se ha quedado en al menos un segundo plano como material de construcción. Esto provoca una pérdida de experiencia constructiva, tanto en el diseño como en el cálculo y puesta en obra, de la madera, y perdiendo así toda la importancia que tenía antiguamente en estos mismos campos.

Las técnicas y sistemas constructivos con el empleo de madera han ido evolucionando a lo largo del tiempo en función de las condiciones de la zona, tanto sociales como climáticas, apreciándose de este modo diversidad de estructuras con diferentes dificultades en el cálculo y diseño del sistema estructural.

2 OBJETO

El proyecto desarrollado en la zona del Baño de las Mulass en las Lagunas de Ruidera, tiene como finalidad unir dos orillas de un río que nace en la zona conocida como Plaza de Toros, el cual desemboca en Laguna de la Colgada. De este modo los viandantes podrán practicar senderismo de un modo seguro evitando la carretera para trasladarse entre lagunas y cruzar al otro lado de este río producido por la cascada formada en dicha Plaza de Toros. Esto se conoce el canal de la rampa tobácea que separa las lagunas Tomilla y Tinaja.

3. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL

3.1 Antecedentes

La presencia del agua en el espacio siempre ha marcado desde los principios tanto la presencia como la evolución de la vida del hombre y por lo tanto el desarrollo de las civilizaciones que éstos implican. El entorno de las Lagunas de Ruidera, más bien el Campo de Montiel, se ha visto propiciado desde las primeras etapas de la Prehistoria.

Podemos remontarnos al Paleolítico Inferior, unos 700.000 años aproximadamente, para explicar los primeros asentamientos de las Lagunas Ruidera, donde habitaban grupos nómadas dedicados a una recolección y caza como medio de subsistencia. Es posible estimar estas edades gracias a los yacimientos arqueológicos localizados en las terrazas de los ríos que transportan y vierten sus aguas en las lagunas. Se han localizado diferentes elementos empleados como utensilios y útiles de piedra tallada. La apertura de claros en el bosque característicos del Neolítico, marcan los comienzos de la ganadería y agricultura, destinados sobre todo para el cultivo.

En los propios escritos de Ptolomeo y Plinio puede verse reflejada una importante calzada o vía de comunicación creada en la época romana, la cual atravesaba longitudinalmente las Lagunas de Ruidera comunicando el Caput Fluminis Anae y Laminium (al parecer situada en la parte Este de Ciudad Real).

Son fácilmente reconocibles las evidencias del mundo islámico, ya que eran principalmente fortificaciones defensivas como los castillos de, Rochafriada y Alhambra de claro origen musulmán, pasando a manos de las órdenes militares de San Juan y Santiago a partir del periodo de la reconquista.

Durante el siglo XVI, España sufrió una etapa donde se extremaron las temperaturas y la pluviometría por dos causas principales, tanto internas como externas al planeta Tierra que provocarían repercusiones sobre todo en el entorno europeo, medio natural, habitantes y usos del suelo.

- Acentuada disminución de la actividad de las manchas solares
- Aparición de una enorme cantidad de polvillo volcánico producido por una excepcional actividad de elementos cratéricos en todos los continentes.

Esto provocó extensos y rigurosos inviernos a la par que verano muy extremos, o muy cálidos o muy frescos, lo que puede comprobarse con la información aportada por los episodios de congelación que diversos canales de comunicación y transpaso de agua entre las diferentes lagunas y en el propio Guadiana. Esta etapa se conoce como la Pequeña Edad del

Hielo, la cual afectó en la Península más notoriamente en el sector de la Submeseta sur, incluyendo territorios manchegos.

En un documento denominado “El Catastro de ensenada” de 1750 se hace referencia por primera vez a las actividades tanto agrícolas, como pastoriles, como las tradicionales de caza, esparto y pesca. Sobre todo, es la primera vez que se menciona la presencia de diferentes aparatos para el trabajo de la lana como los molinos harineros y bataneros. También se alude al empleo y aprovechamiento de la fuerza del agua de los ríos y arroyos.

En 1753 se declaran Las Lagunas de Ruidera como un Real sitio y fábrica de pólvora, por el Rey Carlos III, apareciendo el primer arquitecto reconocido en escena, Juan de Villanueva, la realización de diversas construcciones y canales. Varios años más tarde, más concretamente en los años sesenta, se lleva a cabo el aprovechamiento hidroeléctrico. Una de las primeras centrales hidroeléctricas edificadas fue la de Miravetes, la cual dejó de estar activa en los sesenta.

Posteriormente, en la actualidad, se han realizado diversas intervenciones antrópicas tanto legales como ilegales, las mismas que ponen en continuo peligro la prosperidad de este humedal. Se explicarán y detallarán más adelante, en la situación actual.

Las Lagunas de Ruidera conforma lo que se conoce como uno de los espacios fluviales más importantes de Europa gracias a su singularidad dada por:

- Existencia grandes barreras naturales de toba que representan las aguas de sus distintas humedades. Formadas a causa de la precipitación de carbonatos provenientes de las aguas del Alto Guadiana.

3.2 Situación actual

Durante los años 70 y ochenta, este paraje natural ha sufrido durante años el uso descontrolado de sus recursos. Las Lagunas de Ruidera, fueron supuestamente vendidas por el Estado a particulares e inscritas en propiedad. Durante los años siguientes comenzó un desarrollo urbanístico desordenado. Con multitud de **construcciones ilegales**, y la construcción de playas artificiales, sin respetar el paisaje ni los márgenes de las lagunas. A mediados de los años ochenta, se pone freno a la urbanización del parque natural. En el año 1979 el Gobierno de Castilla-La Mancha, declara las lagunas de Ruidera parque natural, incorporándolo dentro de la **Red de espacios protegidos de Castilla La Mancha**, hecho que se justifica por su excepcional riqueza paisajística biológica y geológica que hacen de Ruidera un paraje único. En 1995 se desarrolla el PRUG de este espacio natural, iniciándose así un complicado proceso de regulación y uso del territorio, limitando las nuevas construcciones en el interior del parque, con el fin de conseguir la

recuperación de sus características naturales de las lagunas, para así como permitir la conservación de un adecuado estado de calidad de sus aguas. Cumpliendo con las normativas de la **Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda**. Posteriormente la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha adquiere las fincas Hazadillas y Era Vieja, que incluyen los territorios de mayor valor ambiental y mejor conservados del entorno de las Lagunas de Ruidera. Declaradas **refugio de fauna** en 1998.

Paralelamente durante los años setenta y ochenta, en el campo de Montiel, se produce una promoción de la agricultura de regadío, para mejorar la economía de estos territorios, transformándose en regadío fincas del Campo de Montiel. Esta transformación afectó negativamente a los aportes de agua de las Lagunas de Ruidera. Observándose un descenso de los niveles hídricos del Acuífero 24. Declarándose sobre-explotado en el año 1989. En 1.993 se aprueba el programa de compensación de rentas agrarias, para que reduzcan el riego, y conseguir la recuperación de los niveles del acuífero y de las Lagunas de Ruidera.

Aun en la actualidad son muchos los retos y problemas que existen en torno a este frágil espacio Protegido. Entorno a la declaración del parque natural, durante los últimos años se ha originado un uso público que ha sido el motor de desarrollo de la población local. El turismo ha ido, creciendo paralelamente al urbanismo de los años sesenta y ochenta. Llegando en determinados momentos del año, principalmente durante el verano, a concentrarse gran número de público, y de visitantes. Por lo que se necesita una regulación urgente para alcanzar un modelo de desarrollo turístico sostenible, quizás uno de los retos para el futuro de esta frágil zona húmeda.

Ruidera se declaró como parque natural en el año 1979 por el Gobierno de Castilla-La Mancha, de esta forma se consiguió la conservación de su rico patrimonio. Trabajando en la actualidad por el desarrollo sostenible del parque y su entorno. El viajero que se acerque a conocer este parque natural podrá disfrutar del planeo del Águila perdicera, y la garza imperial, el Barbo cabecicorto, o el murmullo del agua en las cascadas y saltos de agua. Y un sinfín de actividades como el senderismo, la educación ambiental, así como el buceo o la piragua. Existen zonas de baño durante el verano, y buenos lugares para la pesca deportiva.

Fecha de declaración:

- Real Decreto 2610/79 de 13 de Julio, de declaración del Parque Natural de las lagunas de Ruidera.
- Real decreto 1676/1984 de 8 de Febrero se incluye el refugio de fauna de Hazadillas y era vieja.

4. LOCALIZACIÓN

El Parque Natural de las Lagunas de Ruidera es un espacio natural antiguamente protegido perteneciente al Campo Montiel, situado en la cuenca hidrográfica del Guadiana, más concretamente en el Río Guadiana Alto, en una prolongación del Río Pinilla. Más concretamente, se ubica en España, en la Comunidad de Castilla La-Mancha, distribuido entre las provincias de Ciudad Real y Albacete, y el punto de localización de este trabajo está en el término municipal de Ossa de Montiel.



Ilustración 1: Localización y emplazamiento de la obra

Está constituido en su mayor parte por un valle principal con dirección NO-SE, y su fondo ocupado a lo largo de 35 kilómetros por dieciséis lagunas conectadas entre sí mediante arroyos, cascadas y algún elemento natural o artificial de conducción subterránea.

El propio Campo de Montiel pertenece tanto a la Comunidad de Castilla La-Mancha, más concretamente a las provincias de Ciudad real y Albacete, que servirá como barrera límite natural entre ambas. Nuestra zona de actuación se ubica en la provincia de Albacete, entre la Laguna Tinaja y la Laguna Tomilla (más adelante se mostrará de forma visual y más clara). La superficie poligonal del Campo de Montiel se extiende hasta unos 2.507,84 km², mientras que su superficie aflorante es algo menor, 2420 km².

Fue declarado Parque Natural el 13 de julio de 1979, con una superficie de 3.772 ha. Aunque anteriormente, en el año 1933, fueron declaradas Sitio Natural de Interés Nacional por Orden Ministerial de la 2ª República. Posee dos figuras de protección principales, la Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda (incluido en ésta en el año 1980) y por el espacio LIC, es decir, Lugar de Importancia Comunitaria, alcanzando una extensión total de LIC de 34.452 ha.

Para acceder a este espacio Natural desde Ciudad Real o Madrid se llega hasta Manzanares por la N-IV, y desde aquí por la carretera N-430, pasando por La Solana, Alhambra y Ruidera. Desde Albacete por la N-430 tenemos una ruta muy fácil y sencilla de seguir. Las localidades que componen el entorno de este Parque Natural son 10, todas ubicadas en Ciudad Real y Albacete, éstas son: Munera, El Bonillo, Ossa de Montiel, Villahermosa, Villanueva de los Infantes, Alhambra, Ruidera, Tomelloso, Argamasilla de Alba y Manzanares.

El término municipal de Ruidera es el único núcleo de población localizado dentro del propio Parque Natural, sin embargo, también lo forman otros municipios como son Argamasilla de Alba, Alhambra de Ciudad Real, Ossa de Montiel y Villahermosa.

Este Parque Natural lo componen 16 lagunas distribuidas a lo largo de los 35 kilómetros cuadrados de superficie de este gran humedal de importancia formada por acumulación de carbonato cálcico (toba), cuya consecuencia es unas aguas ricas en carbonatos. A lo largo del paso de los miles de años se puede apreciar cómo se han formado presas naturales que actúan de barreras, las cuales forman cascadas espectaculares entre laguna y laguna.

Las Lagunas que componen el Parque Natural son las siguientes: Laguna Blanca, Laguna Conceja, Laguna Tomilla, Laguna Tinaja, Laguna de San Pedro, Laguna Redondilla, Laguna Lengua, Laguna Salvadora, Laguna Santos Morcillo, Laguna Batana, Laguna Colgada, Laguna del Rey, Laguna Cueva Morenilla, Laguna Coladilla y Laguna Cenagosa.

Las profundidades de estas lagunas oscilan entre los 10 y 25 metros, y su altitud entre los 720 y 920 metros, extendiéndose longitudinalmente a lo largo de 35 km desde el nacimiento del Río Guadiana, formando de este modo lo que se conoce como el Valle Alto Guadiana. A través de las diversas cascadas, arroyos... causadas por las barreras naturales travertínicas de calizas tobáceas. Cabe destacar que desde hace unos 10.000 años, la formación de las lagunas, hasta la actualidad, el dinamismo de las aguas de las lagunas ha estado activo, lo que provoca una ruptura por completo con Castilla-La Mancha, y en particular con el Campo de Montiel, lo que algunos denominan como “un oasis en pleno desierto”.



Ilustración 2: Lagunas de Ruidera

Las Lagunas se clasifican en tres grupos principales según la localización y altitud de las mismas.

- Lagunas altas: situadas en la parte más alta del valle y responsables del reflejo del nivel freático del acuífero afectando al caudal aportado de agua al resto de lagunas. Estos son las denominadas Blanca, Concejo y Tomilla.
- Lagunas intermedias: constituido por las lagunas: Tinaja, San Pedro o San Pedra, Taza, Redondilla, La Lengua, Salvadora, Santos Morcillo o Santo Amor, y Batana. Las más afectadas por el caudal aportado, sobre todo en el descenso del nivel freático, son las lagunas Redondilla y Lengua.
- Lagunas bajas: más afectadas por la mayor dificultad del traspaso de agua desde las lagunas intermedias hasta éstas debido al escaso caudal que les llega en sequía y a la posición tan elevada de los materiales impermeables. Este grupo está compuesto por las lagunas: Colgada, Laguna del Rey, Morenilla, Coladilla y Cenagosa. Éstas tres últimas se alimentan principalmente del salto del Hundimiento.

Esta pasarela se encontrará en la zona Baño de las Mulas, entre las Laguna Tinaja y Tomilla, las cuales se abastecen mutuamente, es decir, la Laguna Tomilla alimenta con un caudal realmente pequeño e ínfimo (sobre todo en épocas estivales), a la Laguna Tinaja. En concreto en lo que se conoce como La plaza de Toros de la zona. El propio transcurso del agua de ambas lagunas no comunica sus lagos de ningún modo, exceptuando las diversas rutas circulares existentes rodeando la zona de actuación y sus proximidades. La ruta de menor extensión es una vía verde de, aproximadamente, 14 kilómetros.

Esta vía verde donde se pretende construir este puente peatonal fue realizada en 1979 junto con la inauguración del propio Parque Natural de las Lagunas de Ruidera. Esta ruta de forma circular cuenta con 14 km de extensión y protección mediante un vallado de madera. Existen diferentes variantes de rutas, pero ésta es la más corta y solicitada. Su recorrido comprende: Lagunas de Ruidera → Baño de las mulas-Castillo de Rochafrida-Lagunas San Pedro-Laguna Tinaja.

Los estribos de nuestro puente habilitado únicamente al uso peatonal y maquinaria de emergencia se localizan en las siguientes coordenadas:

- Estribo izquierdo:
 - LATITUD: 38° 55' 39"
 - LONGITUD: -2° 49' 57"
- Estribo derecho:
 - LATITUD: 38° 55' 40"
 - LONGITUD: -2° 49' 58"

5. ESTUDIOS PREVIOS

5.1 Estudio topográfico

El objetivo que este estudio presenta es la obtención de la localización exacta así como las isohipsas, también conocidas como curvas de nivel, donde se ubican los estribos de la pasarela, mediante la ayuda de material topográfico. A falta de instrumental necesario y de

información, que no se ha podido obtener, no se ha podido llevar a cabo un estudio completo topográfico.

Sin embargo, se ha utilizado de apoyo un mapa topográfico donde las isohipsas dibujadas tienen diferencia de 10 metros de cota. Este es un mapa posee una base topográfica a escala 1 : 25.000 (GEODE).

Con estos datos podremos definir la zona de actuación. Obteniendo a su misma vez una conclusión sobre las características de la pasarela:

- La distancia total entre estribos es de 18,87 metros.
- La cota de coronación de ambos estribos se encuentra a 840 metros

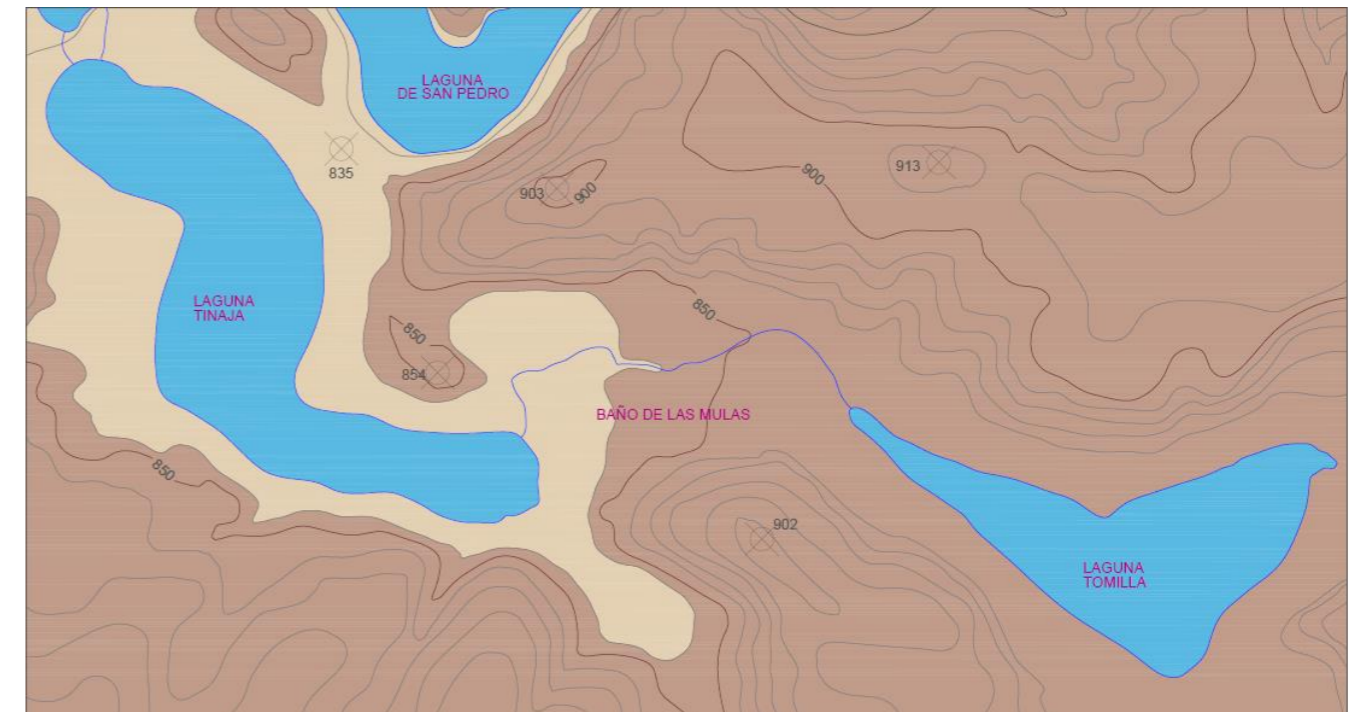


Ilustración 3: Plano topográfico general

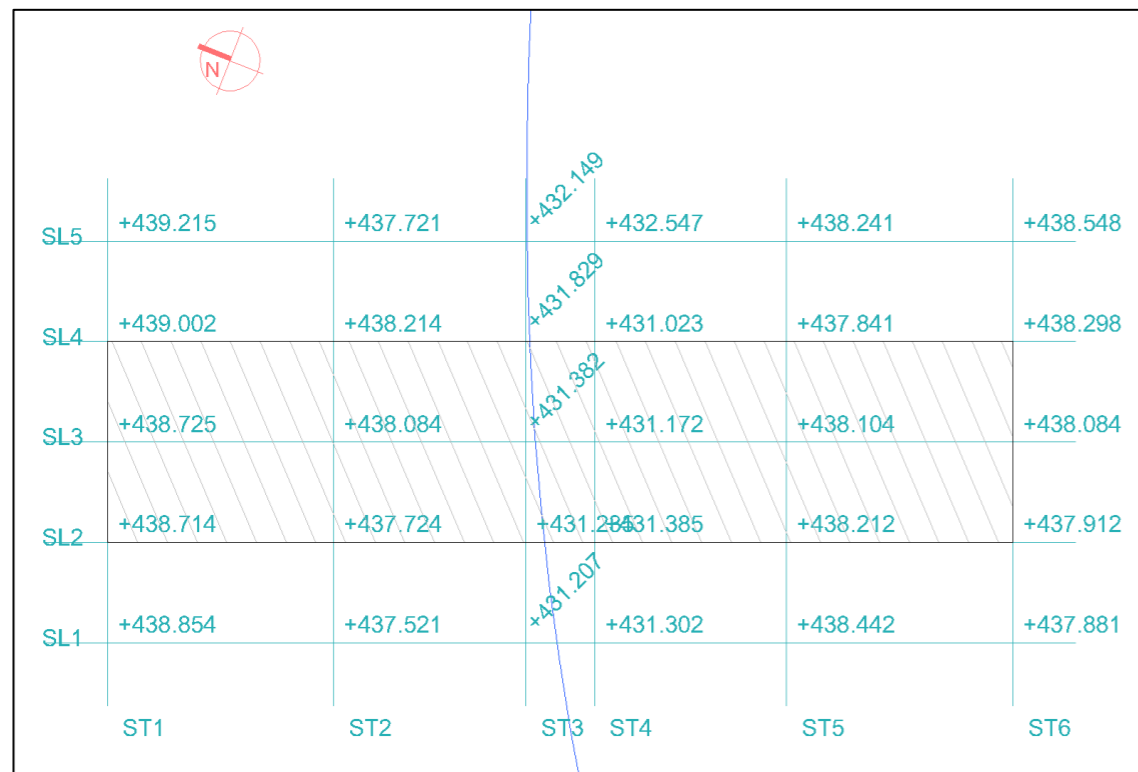


Ilustración 4: Plano topográfico detalle

5.2 Estudio geotécnico-geológico

Se ha realizado un documento, incluido en este trabajo como Anejo II: Estudio Geotécnico, en el cual se procede a un análisis del terreno, así como su determinación de su aptitud para la realización de la obra. Para llevar a cabo este estudio se ha revisado y consultado toda la información proveniente de diversos organismos como es el IGME, más concretamente la serie MAGMA, y varios informes geológico ya existentes.

Se realizaron las tres visitas de campo en el mes de abril de 2017, que ayudaron a llevar a cabo este anejo y así poder visualizar el emplazamiento de la pasarela, y más concretamente de sus estribos. Se procedió a la primera expedición el día 9 de abril.

Tras haber finalizado y obtenido los datos de este estudio se puede concluir que el terreno se caracteriza por una abundancia de calizas y rocas calcáreas, con presencia de materiales sueltos y arcillas silíceas. Este suelo presenta una baja permeabilidad, un nivel freático profundo y capacidades de cargas medias.

5.3 Estudio hidráulico

Se procede al cálculo del caudal correspondiente a la cuenca hidráulica del emplazamiento, para ver si afecta a la pasarela propuesta. Éste es el caudal máximo asociado al pico máximo de lluvia de diseño en el último periodo de 10 años, se calcula del siguiente modo:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{360}$$

Donde:

- Q:** Caudal máximo [m³/s]
- C:** Coeficiente de escorrentía
- I:** Intensidad de la Lluvia de Diseño, con duración igual al tiempo de concentración de la cuenca y con frecuencia igual al período de retorno seleccionado para el diseño (Curvas de I-D-F) [mm/h]
- A:** Área de la cuenca. [Ha]

Con la ayuda de la información facilitada por los organismos del Ministerio de Fomento y de la Confederación Hidrográfica del Guadiana. En este caso la superficie de la cuenca correspondiente al lugar del emplazamiento de la pasarela es de 15'99 Ha, la cual se tomará como 16 Ha para estar del lado de la seguridad y corregir algún posible error de medición.

En cuanto al Coeficiente de escorrentía tiene un valor de 0'385, y el valor correspondiente a la Intensidad de Lluvia de Diseño es 99 mm/h. Lo que genera un caudal de:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{360} = \frac{0'385 \times 99 \times 16}{360} = 1'694 \text{ m}^3/\text{s}$$

El propio Plan Hidrológico Nacional de España incluye un Plan Especial de Sequía a cargo de la Confederación Hidrográfica del Guadiana. Los estudios realizados en la zona de la cuenca del alto Guadiana se representan varios episodios de sequía de los que se consideran de importancia. Estos episodios marcan los últimos 28 años, estos tres episodios continuos suceden desde el año 1980. Esto puede corroborarse con la Red SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica).

No se lleva a cabo ni se ha encontrado ningún estudio Hidrológico e Hidráulico exhaustivo del emplazamiento del puente peatonal. Se ha considerado prácticamente como suceso improbable la afección de la estructura por parte de la lámina de agua, a causa de la elevada cota de coronación que presentan ambos estribos respecto del cauce. Por este motivo se descarta la realización de este estudio.

6. ANÁLISIS COMPARATIVO

6.1 Análisis entre los distintos materiales de construcción

Se procede, a continuación, a hacer una descripción técnica de las diferentes opciones de materiales más utilizados en construcción, para hacer una selección determinada teniendo en cuenta las limitaciones de transporte, montaje, durabilidad, integración paisajística, resistencia estructural, sostenibilidad, economía e impacto visual.

Al final del apartado encontraremos una tabla comparativa, así como la justificación del material escogido para este supuesto.

6.1.1 Hormigón

El hormigón es un material de construcción resultante de la mezcla de un aglomerante (arena, grava o piedra tratada, conocidos como áridos) y agua. A la mezcla se le añadirán aditivos, para modificar alguna de sus propiedades (fluidez, tiempo de fraguado, etc.).

Podemos distinguir entre hormigón en masa (sin armadura, aunque puede cumplir funciones estructurales) y hormigón estructural (armado o pretensado). En este análisis nos centramos en las ventajas y desventajas del hormigón estructural.

Las estructuras de hormigón no están formadas sólo por este elemento, dada su poca resistencia a la flexión, es por esto que se refuerza con la incorporación de barras o mallas de acero, denominadas armaduras (también puede armarse con fibras).

Entre sus ventajas, cabe destacar las siguientes:

- Bajo precio (comparado con una estructura de acero).
- Versatilidad (se puede ejecutar prácticamente cualquier forma).
- Alta resistencia.

- Alta resistencia al fuego.
- Larga durabilidad.
- No requiere mucho mantenimiento.
- Impermeable.
- La disponibilidad de los materiales que lo componen lo convierten en un material universal, en cualquier parte del mundo sería sencillo encontrar un proveedor relativamente cercano.

Para el hormigón estructural, encontramos las siguientes desventajas:

- Peso elevado.
- Los elementos de hormigón se corroerán con facilidad si están en contacto directo con el agua u otro agente corrosivo. Se hace necesario “proteger” el hormigón.
- Volumen elevado (para edificaciones con grandes luces o volados grandes, los elementos estructurales como vigas o losas serían, del mismo modo, de grandes dimensiones).
- A pesar de la subjetividad del aspecto estético, el acabado “visto” del hormigón puede generar un fuerte impacto visual.

6.1.2 Acero

El acero es un material de construcción compuesto por una aleación de hierro y carbono, cuando este último elemento se encuentra en un porcentaje de entre el 0,05% y el 1,7% de la aleación. La aleación puede tratarse de acuerdo a las necesidades específicas que se busquen en él.

Junto con el hormigón, es uno de los materiales más populares en construcción, por su alta versatilidad y adaptabilidad. Su principal ventaja frente a su elemento parental, el hierro, es su mayor resistencia, aunque del mismo modo es más débil frente a la corrosión. Además, funde entre los 1.400°C y los 1.500°C, siendo más moldeable que el hierro.

Su clasificación responde, además de al porcentaje de carbono en la aleación, a la presencia de otros metales en la misma, véase manganeso (que le concederá mayor resistencia frente al impacto), tungsteno (mayor resistencia a temperaturas altas), etc.

A pesar de la vasta variedad de aceros que encontramos en construcción, intentaremos analizar sus ventajas y desventajas de modo general.

Los puntos fuertes del acero estructural son los siguientes:

- Alta resistencia tanto a compresión como a tracción, por ende, permitiendo vigas de una estupenda resistencia a la flexión.
- En relación a su peso, permite la elaboración de estructuras ligeras, las cuales, sin acero, aumentarían drásticamente sus dimensiones.
- Rapidez de montaje. Permite prefabricar la mayor parte de los elementos estructurales en taller, consiguiendo mayor exactitud y reduciendo el tiempo de puesta en obra.
- Es un material dúctil, permitiendo deformarlo previo estado plástico o de rotura.
- Es un material fácilmente reciclable, además de ser totalmente degradable.
- Tenacidad (alta capacidad de absorción de energía).
- Estandarización: los perfiles laminados se fabrican bajo estándares, que permiten establecer de manera muy precisa las propiedades geométricas de la sección.

6.1.3 Composite

El composite (término popularizado en los 70 para designar a todos los nuevos materiales), en construcción, hace referencia a los materiales compuestos de matriz polimérica. Permitiendo una gran variedad de formas, acabados, calidades y un sinfín de propiedades, los composites se encuentran en varios tipos, siendo el más popular de ellos el composite laminado: varias láminas, heterogéneas, no siempre de grosores similares, de distintos materiales que actúan en sinergia.

Su aplicación más popular, desde los años 40, ha sido el campo de la aeronáutica, así como aplicaciones bélicas. Hoy en día, se utiliza en mayor o menor medida, desde prótesis médicas hasta envases para productos comerciales.

Existe una amplia gama de composites dependiendo de la propiedad que busquemos en el material, sea aislamiento térmico, propiedades estructurales, etc.

Entre las principales ventajas del composite, encontramos:

- Elevada resistencia mecánica respecto a su densidad: Pueden ser diseñados para cumplir un intervalo específico de propiedades mecánicas, como resistencias a tracción, flexión, impacto o a compresión.
- Gran versatilidad de diseño: Se pueden ejecutar formas muy complejas con gran precisión con este material.
- Gran variedad de acabados.
- Alta resistencia a la corrosión: Los composites no se oxidan ni se corroen.
- Larga vida útil con bajo mantenimiento. Es un material relativamente nuevo, por lo que hay pocas referencias al respecto, pero las pruebas indican que pueden aguantar más de 50 años.

- Bajo peso sin comprometer su fuerza, compitiendo con los metales.
- Propiedades de aislamiento: térmico, eléctrico, etc., según se requiera.

No obstante, estos materiales tienen una serie de inconvenientes, a destacar:

- Su coste es elevado.
- No es un material muy extendido, por lo que podríamos tener problemas a la hora de encontrar proveedores, soluciones constructivas, etc.
- Falta de normativa, reglamentación de uso o técnica en España sobre este material, lo que genera inseguridad para su diseño y cálculo.
- Al ser materiales relativamente recientes, no existe mucha información sobre su durabilidad, por lo que aún es un riesgo a correr.
- Baja resistencia a las altas temperaturas, así como a los rayos UV. Este inconveniente podría ser minimizado utilizando aditivos y componentes apropiados. Este material no dispone de clasificación al fuego.
- Aunque es reciclable, es un proceso complejo a día de hoy. Requiere de un tratamiento de trituración y su destino será otro composite u otro material de construcción.

6.1.4 Madera

La madera, el material extraído del tronco de los árboles, se utiliza en muchos elementos constructivos. A lo largo de la historia se han ido modificando sus aplicaciones: desde simples chozas fabricadas con materiales vegetales hasta modernas soluciones constructivas de madera tratada.

Su popularidad no es tan alta como los nombrados anteriormente, pues es un material más caro en comparación, al menos, en España. Si bien las estructuras de madera no están muy extendidas en nuestro país, su uso sí que ha sido complementario, por ejemplo, en la arquitectura tradicional, como elemento estructural en tejados. No es el caso de la madera en otros lugares donde su obtención y transporte son más asequibles, como en EE.UU., donde es empleado ampliamente como material estructural en edificación mediante su combinación con cimentaciones de hormigón armado.

Las ventajas del uso de la madera como material de construcción son muchas. Destacamos las siguientes:

- Producto de origen natural: En relación a otros productos industrializados, requiere un bajo consumo energético.
- Ventaja frente a sismos: las estructuras en madera, con un bajo peso, en caso de un terremoto cederán ante la oscilación y será más difícil que se derrumben.

- **Renovable:** La producción de árboles y de la obtención de su madera no compromete el medio ambiente. Además, cuando la madera deja de cumplir su función estructural, no constituye ningún peligro para el medio ambiente.
- **Aislante natural.**
- Las estructuras de madera requieren un menor tiempo de ejecución en relación con otros materiales.
- **Durabilidad:** La madera tratada es un material muy longevo, a pesar de que puede tener un coste de mantenimiento superior al de otros materiales. Sus periodos de vida útil pueden ascender hasta los doscientos años con las medidas de mantenimiento requeridas.
- **Propiedades físico-mecánicas:** Es capaz de resistir esfuerzos tanto de compresión como de tracción. Tiene una baja masa y densidad y una alta resistencia mecánica.
- **Propiedades estéticas:** Al contrario que el hormigón y el acero, su impacto visual, sobre todo en ambientes naturales, es muy reducido. Además, la madera ofrece en su aspecto natural una gran variedad de patrones.

No obstante, encontramos los siguientes inconvenientes:

- Es un material fundamentalmente heterogéneo y anisotrópico. La madera se dilatará o contraerá con las variaciones de humedad.
- Las dimensiones son limitadas, teniendo que recurrir a la utilización de piezas modulares u otras soluciones constructivas derivadas de la madera.
- Requiere de un alto tratamiento para que no ceda al ataque de los agentes corrosivos.
- Permite luces menores en relación con otros materiales estructurales.
- La madera, al ser un material ortótropo, no posee los mismos módulos de resistencia mecánica en todas sus direcciones, sino que varían con relación a la dirección de sus fibras. Esto puede generar inestabilidad en la estructura si no se selecciona el tipo adecuado de madera.
- Requiere de un alto mantenimiento

6.1.5 Comparativa

Enumerados los materiales y sus principales cualidades e inconvenientes, presentamos la siguiente tabla con ánimo de resumir lo anteriormente citado. Para poder dar valores concretos, hemos escogido un tipo de cada material, aclarando previamente que los valores variarán en el caso de ser seleccionados.

	Flexión (N/mm ²)	Tracción (N/m ²) ⁽¹⁾	Compresión (N/m ²) ⁽¹⁾	Cortante (N/mm ²)	Módulo de elasticidad medio (N/mm ²)	Densidad (kg/m ³)	Precio (€/m ²) ⁽²⁾
Madera (C24)	24	100	150	25	11000	420	3000
Horm	-	1,79	25	1,79	32000	25	6000

Hormigón (H25)						0	0	8
						0	0	0
Acero (S275)						2		
						1	7	8
	2			1	0	.	.	.
	7	275	275	5	.	8	0	0
	5			8	0	5	0	0
					0	0	0	0

⁽¹⁾ Puesto que la madera es un material diseñado para trabajar en la dirección de la fibra, se recoge el supuesto de que el esfuerzo vaya en dirección de la fibra (0º) y cuando el esfuerzo se aplica perpendicularmente a la fibra (90º).

⁽²⁾ Precios referenciales, a consultar en función del acabado, propiedades, disponibilidad, etc.

Tabla 1: Comparativa de materiales

De la tabla anterior, las conclusiones a extraer son varias. En primer lugar, la madera es un material cuyas mejores prestaciones se dan si el esfuerzo va en dirección de la fibra, siendo un material idóneo para el trabajo a flexión con una buena relación entre resistencia y peso. El hormigón, por su parte, tiene las mejores resistencias en trabajos a compresión. Por último, el acero es un excelente material estructural, pero puede presentar problemas trabajando a compresión debido a su esbeltez.

Para suplir las peculiaridades de cada material, el CTE aplica un coeficiente penalizador a la resistencia de cada material, siendo: 1.25/1.30 para la madera, 1.5 para el hormigón y 1.05 para el acero.

Sería necesario considerar otros aspectos para el cálculo estructural, como estados límites de servicio, pandeos, RF, etc.

Otro aspecto que la tabla superior no llega a cubrir son las emisiones de CO² según el sistema constructivo y el carbono almacenado. Tomando la EPA de "Environmental Protection Agency" de Estados Unidos del 2016 (que muestra las diferencias entre emisiones netas de CO² por producción de diferentes materiales) presentamos la siguiente tabla comparativa:

	Emisiones netas (kg CO ² /t)	Almacenado (kg CO ² /t)
Madera serrada	33	490
Hormigón	265	0
Acero	694	0

Tabla 2: Emisiones y almacenado de kg CO₂/t de los materiales

Los árboles, en su formación, y por la fotosíntesis, almacenan carbono, además de emitir menos dióxido de carbono en su transformación que el hormigón o acero. En la tabla anterior, la columna de emisiones almacenadas corresponde al de emisiones de kilogramo de CO² por tonelada negativas.

En el siguiente ejemplo vemos una tabla comparativa, en el supuesto de realizar una viga de 7.5 m de luz con una carga permanente de 0.75 KN/m y 3KN/m de sobrecarga de uso según cada uno de los materiales:

	Kg viga	Emisiones netas (kg CO ² /t)	CO ² Almacenado (kg CO ² /t)
Madera	217,5	7,17	106,57
Hormigón armado	1.545	409,42	0
Acero perfil H	112,5	78,07	0

Tabla 3: Emisiones y almacenado de kg CO₂/t de los materiales por viga

En este ejemplo, la madera es la solución más ecológica. No solo por la cantidad de emisiones almacenadas, también representaría una menor cantidad de material en relación con el hormigón armado. A pesar de que en peso sería superior al del acero en el perfil escogido, la producción del acero representaría muchos más gastos en términos de producción y de impacto medioambiental.

Es por esto, y por el resto de prestaciones que presenta este material, que sea el escogido para nuestro supuesto.

6.2. Tipología de puente /Estudio de soluciones

Hace aproximadamente 130 años, la mayoría de los puentes que había construidos eran de madera, junto con los puentes arco y bóvedas de piedra. La mayoría de ellos no perduraron mucho en el tiempo a causa de su exposición directa a la intemperie y escasez de protección.

Fue la aparición de materiales como el hierro forjado, el acero y el hormigón armado la causa de una menor producción de obras civiles de madera. Estos materiales satisfacían mejor las nuevas exigencias que se iban produciendo junto con el avance de la sociedad. Nos referimos a tales como: el aumento del volumen de tráfico, así como el peso de los vehículos que lo producen (cargas), las sollicitaciones dinámicas y las mayores luces con una menor deformación admisible.

Fue tras la aparición de nuevos materiales que cesó el uso de la madera en edificación de forma estructural y comenzó a estudiarse y analizarse para poder realizar cálculos exactos sobre el comportamiento de la estructura en conjunto.

Tras la elección del material a emplear se continúa con una exposición y definición de las diferentes posibles soluciones que pueden satisfacer las necesidades por las que se va a realizar la construcción de la pasarela. Se debe proceder a una selección cautelosa del sistema estructural más adecuado para salvar la luz entre apoyos. Podemos distinguir nueve tipologías estructurales principales de puentes de madera, las cuales se presentan a continuación agrupadas según su sistema estructural.

Estas nueve tipologías se pueden reagrupar en dos grandes tipos de puentes de madera según su estructura:

- **SISTEMA ESTRUCTURAL DE PLACAS DE MADERA:** son aquellas estructuras cuyo diseño y construcción se realiza por elementos cuyo comportamiento se basa en la conformación de placas. Su limitación es la luz máxima que pueden alcanzar, a excepción de su combinación con otros elementos estructurales.
- **SISTEMA ESTRUCTURAL EN BASE A BARRAS DE MADERA:** su estructura principal se determina por elementos o piezas lineales, o barras, cuyas luces varían en función del tipo estructural
 - *Vigas*
 - *De vigas de madera maciza, tensada o laminada:* con luces de 3 a 24 metros, basado en vigas con forma de V invertida, generalmente triarticuladas.
 - *De viga reticulada o vigas planas:* organizadas por barras lineales dando forma a un sistema triangulado. Existen diferentes disposiciones de retículas o cerchas y elementos de unión, la más famosa se conoce como Howe. Variando sus entre 9 a 45 metros.
 - *En arco triarticulado/arco de madera laminada encolada:* El arco normalmente es una parábola, un círculo o una línea sinusoidal. Se emplean para grandes luces, desde 12 a 70 metros.
 - *Colgante:* el tablero está sujeto por cables de acero atados a uno o varios mástiles. Gracias a la incorporación de apoyos intermedios se pueden aumentar las luces.

- *De apertura/atirantado??:* en este caso el tablero del puente se compone de dos piezas independientes que pueden izarse dejando libre el paso o bien deslizarse lateralmente. La luz máxima de recomendación en esta tipología estructural es de 24 metros
- *Apuntalado*

5.4.1 Sistema estructural de placas de madera

Como ya hemos dicho, este sistema estructural tiene la base principal de su comportamiento en la conformación de placas rígidas, y con la limitación o restricciones de su luz máxima. Esta disposición de placas rígidas realizada a través de piezas de madera, ya sean laminadas o aserradas y dispuestas en canto longitudinalmente uno al lado de la otra.

Este sistema estructural es uno de los más empleado en construcciones de madera en la actualidad, aplicados con sistemas de placas tensada. Es desplazamiento individual de cada pieza o elemento de madera es impedido gracias a la propia tensión de las diferentes barras transversales, formando así un conjunto resistente frente a una concentración de cargas.

Es este sistema de tensión el que permite un aumento de la resistencia que la propia estructura requiere. Consiste en una colaboración de las láminas que no se encuentran directamente cargadas a través de una compresión entre las mismas y una resistencia de fricción que aseguran un trabajo integrado. Este mismo sistema permite una prevención en el riesgo de fracturas de la carpeta de rodado, así mismo, también es el encargado de la distribución de una carga concentrada. Las propias placas actúan como elemento estabilizador de las cargas horizontales.

La principal ventaja del empleo de este sistema de tensión de placas es que no existe ninguna delaminación entre las placas y su comportamiento frente a sobrecargas es realmente bueno.

En cuanto al procedimiento y metodología de diseño de un puente peatonal basado en la conformación de placas de madera puede resumirse en doce pasos principales:

1. Definir cargas y geometría de la placa
2. Elegir la especie, grado de calidad y tensiones admisibles
3. Estimar el grosor de la placa y el ancho de la distribución de la carga puntual
4. Calcular los momentos de las cargas
5. Determinar el grosor requerido con la tensión admisible
6. Determinar el grosor requerido con la flexión admisible

7. Revisar el grosor elegido
8. Cálculo de la flexión bajo carga propia
9. Determinar el nivel requerido de tensión
10. Seleccionar espaciamentos de tensores
11. Determinar el tamaño de los tensores
12. Determinar el tamaño de los elementos de anclaje



Ilustración 5: Puente vehicular Kjorem, Kvam, Noruega - Kurt Shcwaner

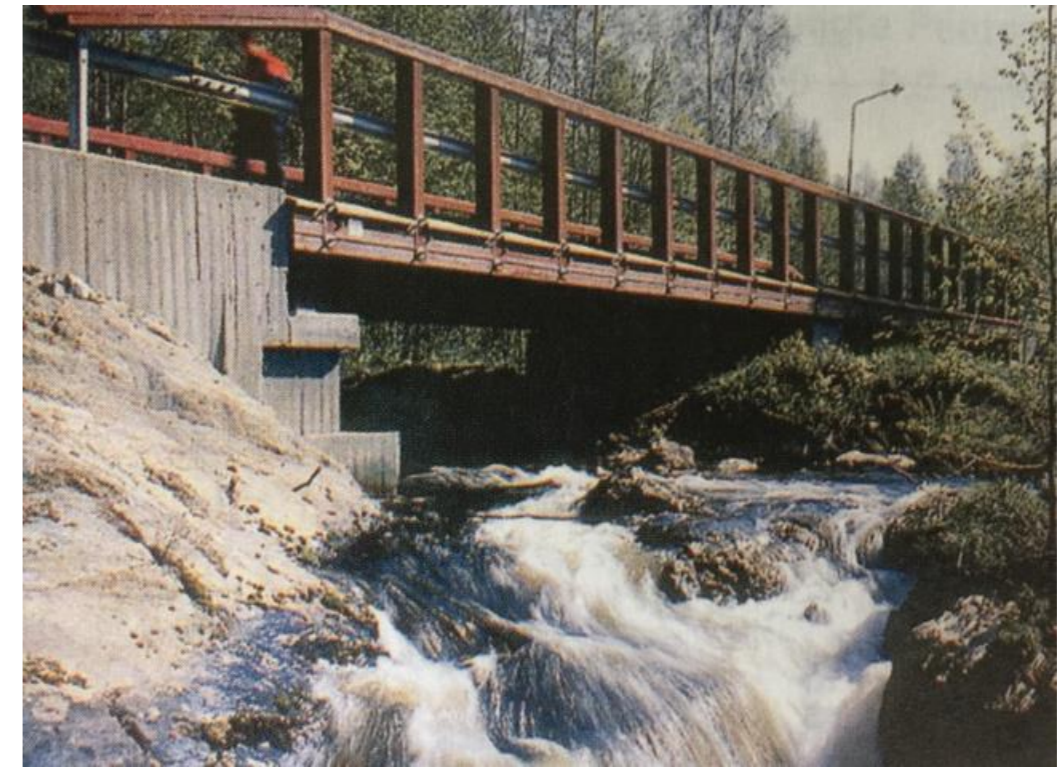


Ilustración 6: Puente vehicular Lintforsan, Klintfors, Suecia - Kurt Shcwaner

5.4.2 Estructuras de madera basadas en sistemas de barras

Como hemos dicho con anterioridad, esta tipología tiene su estructura principal basada en elementos lineales o barras, cuyas luces se limitan al tipo estructural elegido dentro de este ámbito. Estas barras son las encargadas de la transmisión de las cargas por la estructura hasta el terreno. Es decir, este sistema engloba todos aquellos cuyo comportamiento tenga su base en la transmisión de las cargas a través de dichas líneas o barras, el motivo principal por lo que se localizan aquí casi todos los sistemas estructurales de madera.

La clasificación anteriormente realizada de los tipos estructurales establecidos se lleva a cabo a partir de la estructura más pregnante del puente.

Ya hemos mencionado con anterioridad los sistemas estructurales más comunes en el empleo de esta estructura, de los cuales, los más adecuados para nuestro estudio y viables como prototipos. Presentan luces de entre 9 y 45 metros

- Sistemas de vigas
- Sistema de viga reticulada
- Sistema de puente atirantado

- Sistema de puente arco

- Sistemas de vigas

Es sistema estructural de viga simple se basa en el principio básico de un puente, es decir, la propia viga que salva una distancia concreta entre dos puntos. Suele resolverse mediante el empleo de una viga de madera aserrada o bien laminada.

La luz de este tipo de puentes va a depender del tipo y cantidad de apoyos a los que las vigas del mismo estén sujetas, pudiendo ser:

- Viga simplemente apoyada
- Viga simple apoyada con voladizo
- Viga continua
- Viga combinada: simplemente apoyada y con voladizos centrales

Suele ser la solución más viable económicamente, al igual que la más sencilla cálculo y diseño. Convirtiéndose así las restricciones de luz entre apoyos en prácticamente su única desventaja, que dependerá del tipo de viga empleada, es decir, si es laminada o aserrada.

Se pueden colocar las vigas tanto bajo como sobre la plataforma de circulación.



Ilustración 7: Puente de viga simple Unterensingen foto de Karl Gotsch

- Sistemas reticulado

En cuanto a este tipo estructural, podemos decir que se trata de la configuración de vigas planas que se encuentran organizadas a causa de la unión de determinadas barras lineales que se unen intentando alcanzar la máxima convergencia posible de los ejes de las barras que van a cada nudo, y así de este modo se consigue crear un sistema triangulado.

Podemos localizar dentro de este grupo las vigas de cordones rectos, tanto el superior como el inferior; la viga que posee el cordón superior curvo y el inferior recto; o vigas cuyos dos cordones sean curvos.



Ilustración 8: Urnäsch Brücke. Hundwil-Herisauer. Tobel. Suiza. 1778

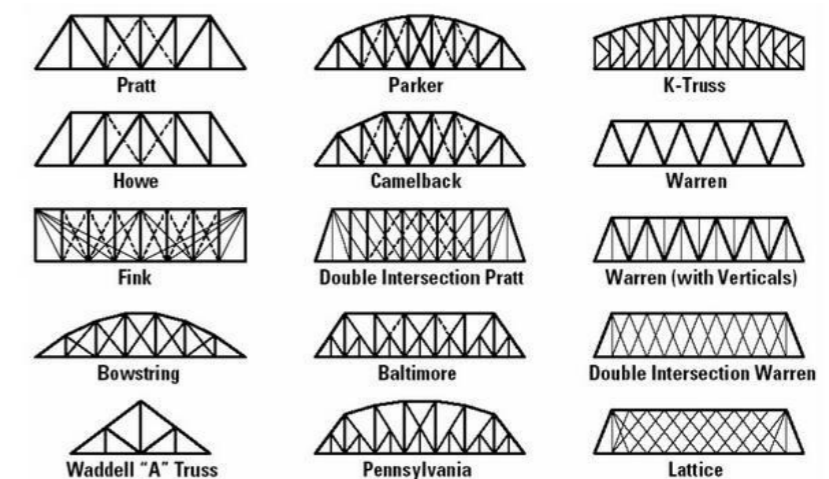


Ilustración 9: Sistemas reticulados

Las formas de diseño en las que finalmente puedan disponerse estos sistemas pueden ser en vertical o con una determinada inclinación.

Es fácilmente reconocible en cualquier ejemplo de este sistema estructural, que la plataforma de circulación se suele colocar en el cordón inferior de la propia viga reticulada, lo que provoca una menor posibilidad de protección a la intemperie si no se cubre. La adición de una cubierta llevaría a considerar tanto en diseño como el cálculo, la sobrecarga del techo y los efectos del viento sobre este.

- Sistemas atirantado

Se define este tipo de puente como una estructura que basa su funcionamiento en la incorporación de vigas dispuestas en forma de V invertida, suelen ser triarticuladas. La aneja de tirantes es lo que da permiso a una suspensión de la subestructura que sustenta la plataforma de circulación.

Suele requerirse un sistema de protección debido a la elevada exposición a la intemperie que con el tiempo provocará el deterioro de las vigas.

Los elementos que componen a esta subestructura son las vigas horizontales transversales, ya se coloquen colgando de una estructura triangular, rectangular o trapezoidal superior. Este tipo de sistemas suelen necesitar una placa horizontal rígida que se encargue de dar la estabilidad y equilibrio final necesario, a excepción de la variante similar a una cercha.

Dependiendo del número de tirantes se encuentran tres tipos: colgado simple, doble o múltiple.



Ilustración 10: Ejemplo de puente vehicular atirantado



Ilustración 11: Puente vehicular Vihantasaimi, Matyharju, Finlandia (1999)

- Sistemas en arco

Este sistema utiliza la madera laminada como elemento de diseño y construcción cumpliendo con el principio de generar una estructura de puente lo más continua posible. Esto permitía su construcción en fábricas y almacenes y posterior transporte y colocación del mismo.

Solía emplearse tipología de arco triarticulado, debido a que no solía presentar inconvenientes en cuanto los cimientos a causa de esfuerzo lateral mínimo y esfuerzo horizontal por los mismos. También se debe a su facilidad de maniobra en el traslado.

Centrándonos en la plataforma de circulación, encontramos tres posiciones diferentes:

1. **Arco con plataforma sobrepuesta** → de este modo se protege parte de la estructura de arcos gracias a la colocación plataforma
2. **Arco con plataforma intermedia** → se evita el volcamiento de los dos arcos gracias a que la plataforma actúa como arriostramiento entre estos dos mismos.
3. **Arco con plataforma suspendida** → han de recubrirse los arcos al completo debido a su exposición a efectos de intemperie, del clima, de la estructura.



Ilustración 12: Ejemplo con sistema de arco



Ilustración 13: Puente peatonal en Asturias

5.4.3 Solución adoptada

La idea inicial siempre fue el empleo de un material cada vez más en desuso y realmente eficaz en el empleo de la construcción de estructuras como pasarelas en vías verdes. Este material es la madera, dando así a conocer tanto como a estudiar sus ventajas y mayores aplicaciones en el mundo de la ingeniería civil, ya que, con la aparición de nuevos materiales, se encuentra apartado tanto de la enseñanza como cada vez más de su empleo en vida real para este tipo de obras.

Tras realizar un análisis y estudio detenido de los diferentes sistemas estructurales anteriormente explicados y desarrollados, cabe destacar que todos ellos son válidos para la realización de la pasarela en emplazamiento que se ha caracterizado y estudiado.

Se busca una solución cuya estructura sea de un único vano, descartando de este modo aquellas que obligue a la división del puente en dos diferentes.

En la tabla que se presenta a continuación, se sintetizan los inconvenientes que presentan las diferentes tipologías de pasarelas de madera:

	COLGANTE	ATIRANTADO	ARCO	RECTO CELOSÍA	CURVA CELOSÍA
Poco apropiado para luces cortas	X	x			
Sobredimensionado	X				
Impacto visual	X	X		x	
Cimentación		X			
Ocupación de espacio extra		X			
Riesgo de vandalismo		X			
Piezas curvas	x		X		X
Barandillas elevadas			x		X
Riesgo de aglomeración				X	
Sobrecargas de nieve				X	
Excesivas uniones					X

Tabla 4: Inconvenientes de cada tipología.

Se decide el empleo de un sistema de viga reticulada, siguiendo el modelo tipo Pratt, el cual permite salvar luces de entre 16 y 25 metros, permitiendo a su vez anchos de paso de hasta 3'5 metros. Estas características cumplen con nuestros condicionantes a la hora del diseño de la pasarela, los cuales son los siguientes:

- Longitud entre los estribos de la pasarela, de acuerdo al análisis topográfico es de 15'80 metros.
- El impacto visual creado será mínimo y su integración con el paisaje máxima.
- La carga a soportar será baja, más concretamente, peatonal con un paso ocasional de los vehículos de emergencia.

6 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

6.1 Características de la madera estructural

La madera es un material natural ortótropo, no homogéneo debido a su constitución de diversas células caracterizadas en conducción de la savia, almacenamiento y transformación de los productos vitales y sostén del vegetal, particular del árbol. Lo que explica un comportamiento desigual frente a una propiedad física o mecánica, dependiendo de la dirección a considerar. Este fenómeno, provocado por su heterogeneidad, se da a conocer como anisotropía de la madera.

En un estudio más detallado de la madera como material estructural, se da explicación a su comportamiento físico-mecánico, su agregación de células con la finalidad de formar madera limpia, y a su consideración comercial, tres diferentes niveles en su estructura:

- Estructura submicroscópica: la conforman las paredes celulares (75% de la masa total) constituidas por celulosa o moléculas de glucosa encadenadas, embebidas en una matriz de grandes células amorfas de lignina. Estas estructuras tubulares son altamente eficaces trabajando a compresión, zunchándose con las capas vecinas entre sí, y reduciendo el posible pandeo lateral.

Esta estructura es invisible por métodos tradicionales, siendo necesario un aumento mínimo de 3000. Ésta es la responsable de movimientos de humedad de 10 a 20 veces mayor en la dirección transversal que en el longitudinal.

- Estructura microscópica: tanto las coníferas como las frondosas tienen una estructura análoga, constituidas en su mayor parte, casi el 95%, por células denominadas traqueidas. Este nivel está dispuesto concéntricamente, posee una visibilidad aceptable mediante el empleo de medios tradicionales con 2000 aumentos. Nos ayuda a entender por qué dicho material es entre 20 y 40 veces más rígido en su dirección longitudinal, que en su dirección transversal.

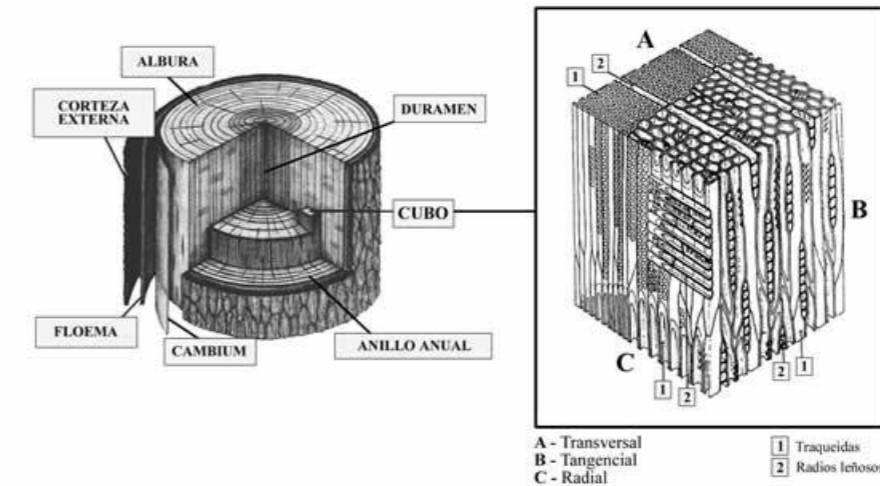


Ilustración 14: Detalle de la sección de un tronco 1.

- Estructura macroscópica: es aquella apreciable a simple vista o con el uso de una lupa de 10 aumentos máximos. Se pueden distinguir tres secciones a estudiar al efectuar tres cortes:
 - Transversal: perpendicular al eje del tronco o rama
 - Radial: pasa por un eje y un radio del tronco o de la rama
 - Tangencial: es aquella paralela a un plano tangente al tronco, o al anillo de crecimiento.

Si se examina un corte determinado, realizado a un tronco de madera, se pueden distinguir en la sección transversal las siguientes estructuras:

- Corteza externa o corteza común: la componen las células muertas.
- Corteza interna o líber: por donde circula la savia
- Cambium, es aquel tejido producido por la madera que circula hacia el interior, y por la corteza hacia el exterior
- Leño o tejido leñoso

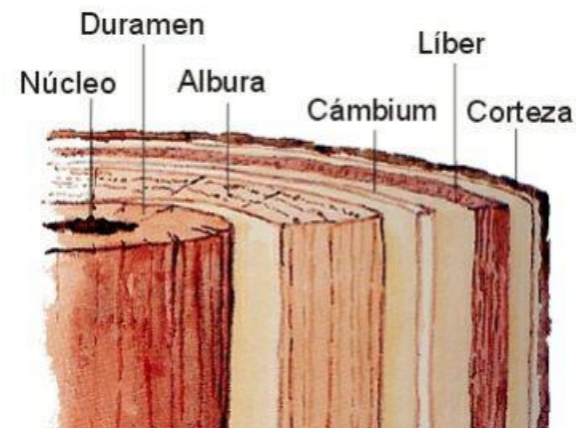


Ilustración 15: Detalle de la sección de un tronco 2.

Analizando los cortes tangencial y principalmente el radial, se puede apreciar los radios leñosos, que son discontinuidades del tejido, perpendiculares al eje del árbol, que producen un efecto de trabazón sobre las fibras longitudinales.

Es importante considerar tres direcciones principales que permitan considerar así la madera como un material estructural ortótropo. Estas direcciones son las siguientes:

- Axial: Paralela al eje de crecimiento del árbol.
- Radial: Perpendicular a la axial.
- Tangencial: Normal a los dos anteriores

De este modo, es necesario especificar la dirección de actuación, ya sea una propiedad física o mecánica, sin embargo, este condicionante da complejidad en el desarrollo del cálculo estructural. En la práctica se simplifica al estudio de dos direcciones:

- Axial
- Perpendicular a la fibra neutra, que engloba las direcciones radial y tangencial.

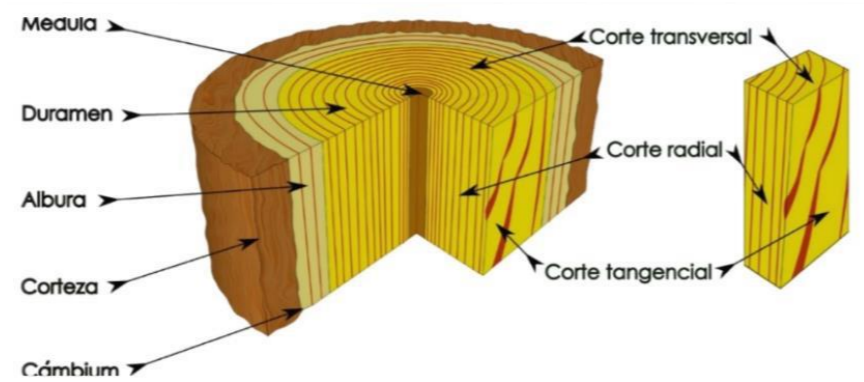


Ilustración 16: Detalle de la sección de un tronco 3.

6.2 Propiedades físicas

La madera está compuesta principalmente por moléculas de celulosa y lignina. Esto es importante para entender su carácter biodegradable, anisótropo, etc., a efectos de posteriores consideraciones técnicas que garanticen su durabilidad en el tiempo.

Como material anisótropo, sus propiedades físicas y mecánicas dependen de la dirección del esfuerzo dependiendo de si este es a favor (paralelo) o en contra (en perpendicular u otro ángulo) de las fibras que componen la madera.

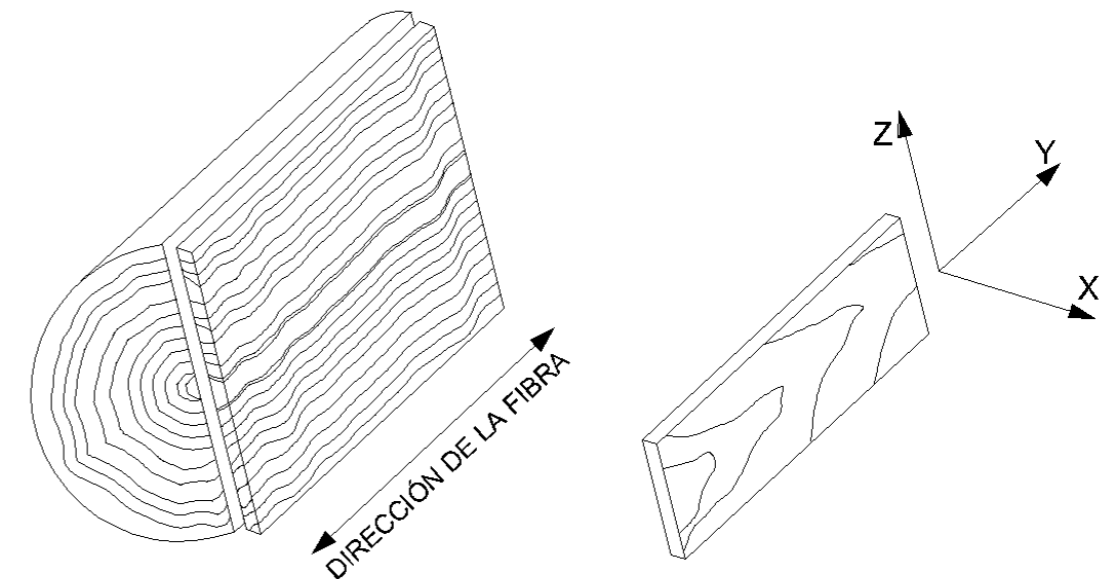


Ilustración 17: Dirección de la fibra de la madera

Se procede a explicar las tres principales direcciones de trabajo en base al esquema anterior.

La dirección de trabajo axial o longitudinal se dará cuando la fuerza se ejerce paralelamente a la dirección de la fibra, eje Y del esquema. Podrá ser radial cuando se dé perpendicular a la axial, o eje X del esquema anterior. Por último, la fuerza será tangencial si la fuerza se ejerce tangencialmente a los anillos de crecimiento, perpendicular a las dos anteriores, o eje Z del esquema anterior.

La madera resiste entre 20 y 200 veces más si la fuerza ejercida es en el sentido del eje del árbol (paralela a las fibras) que en el sentido transversal, por lo que es importante especificar la dirección considerada.

6.2.1 El agua en la madera

Dado el carácter higroscópico de la madera, la presencia de agua en el material es una de sus más importantes propiedades, dado que su valor influye sobre todas las demás propiedades físicas o mecánicas.

La madera tratada como material de construcción, fue anteriormente, el cuerpo de un árbol: un vegetal que atrapa la humedad y el agua del suelo para llevarlo hasta las hojas, así como el resto de nutrientes. Es por esto por lo que cuando su tronco es cortado, encontraremos un porcentaje de agua en él.

Esta agua puede presentarse en la madera bajo tres formas diferentes:

- Agua de constitución: constituida por las moléculas que constituyen la madera, es decir, es parte de ella, y su eliminación provocaría la destrucción del material
- Agua de impregnación: se localiza en las paredes celulares, cuando la madera se encuentra completamente saturada. Influye notablemente en sus propiedades físico-mecánicas. Conforme disminuye su grado de humedad, aumentan sus resistencias mecánicas. Ésta es la que mantiene el grado de equilibrio con el ambiente, *Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH)*
- Agua libre: aquella que supera el punto de saturación, y utilizada por los vegetales para el transporte de sus nutrientes.

Es necesario tratar la madera y secarla adecuadamente para reducir su contenido en agua y su comportamiento sea más favorable. Este porcentaje de agua variará dependiendo del uso posterior de la madera.

6.2.2 Contenido de humedad de la madera

Por norma general, cuanto mayor es el contenido del agua en la madera, menor es su resistencia y mayores son las deformidades que se producen por fluencia.

$$H(\%) = \frac{P_H - P_s}{P_s} \times 100$$

En donde:

- P_H es el peso húmedo de la probeta
- P_s es el peso seco de la probeta obtenido por secado en estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$

En la madera el agua puede estar presente de tres formas distintas:

- Como agua libre: El agua llena las cavidades celulares como un líquido. Esta agua se encuentra dentro de los huecos interiores celulares y los vasos de la propia madera. Si la madera pierde esta agua, ya no puede ser recuperada como humedad. Si la madera se volviera a sumergir en agua, las cavidades se volverían a llenar. Dado que una vez terminado el proceso de secado, el agua libre se pierde, no tiene más repercusión y no influirá en las propiedades mecánicas.
- Como agua higroscópica o agua límite: El agua se halla contenida en las paredes celulares, es decir, ha sido absorbida por estas. La absorción de esta agua se debe a las propiedades higroscópicas constituyentes de la madera. Esta agua sí que tiene influencia sobre sus propiedades físicas. A medida que disminuya el grado de humedad, la madera aumentará sus resistencias mecánicas. Cuando se llega al grado máximo de absorción del agua higroscópica, se llega al Punto de Saturación de la Fibra (PSF). El PSF de la madera es el punto máximo de humedad que una madera puede contener sin que exista agua libre contenida en ella. Es importante conocer también que la madera y sus aguas higroscópica y libre interactúan. Si existe agua libre, la madera la absorberá, para pasar a ser agua higroscópica y viceversa. El punto de Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH) es el punto en el que el agua higroscópica no pasa a ser agua libre o viceversa.
- Como agua de constitución: El agua se encuentra formando parte integrante de la estructura molecular. Esta agua es parte de la composición química de la propia madera y su eliminación deterioraría la madera como tal, por lo que los procesos de tratamiento y secado no buscan expulsar la madera de constitución.

La norma UNE 56544:2011 implanta unos valores de referencia para el grado de humedad de la madera empleando tres denominaciones:

- Madera húmeda: con humedad media superior al 30% (35% para piezas de sección mayor de 200 cm^2).
- Madera semi-seca: con humedad media superior al 20% e inferior o igual al 30% (25%-35%) para secciones mayores de 200 cm^2 .
- Madera seca: para humedades medias inferiores o iguales al 20%.

6.2.3 Higroscopicidad

La higroscopicidad es la capacidad del material de intercambiar humedad con el ambiente, provocando que su densidad pueda cambiar como más adelante describiremos. Esta propiedad viene dada por la gran porosidad del material, que absorberá o cederá humedad al ambiente dependiendo de si este es seco o húmedo, la época del año, etc.

Esta capacidad puede afectar al comportamiento mecánico del material, y por tanto a la estructura. Estos cambios variarán dependiendo del tipo de madera, siendo, por ejemplo, en la madera aserrada, cambios prácticamente inapreciables en su dimensión, respecto al eje paralelo a las fibras.

En la madera laminada, al ser un material compuesto por varias láminas, cada una con una disposición aleatoria en sus anillos de crecimiento, sumado al adhesivo entre ellas, se da una gran absorción de las tensiones internas.

La norma UNCE 56540:1987 clasifica las maderas por su higroscopicidad en 3 categorías:

- Grado débil con higroscopicidad de 0,0015
- Grado normal con higroscopicidad de 0,0030
- Grado fuerte con higroscopicidad de 0,0050.

Se deduce entonces que la madera deberá tener la humedad lo más parecida a la humedad de equilibrio higroscópico siempre que el proceso de fabricación lo permita.

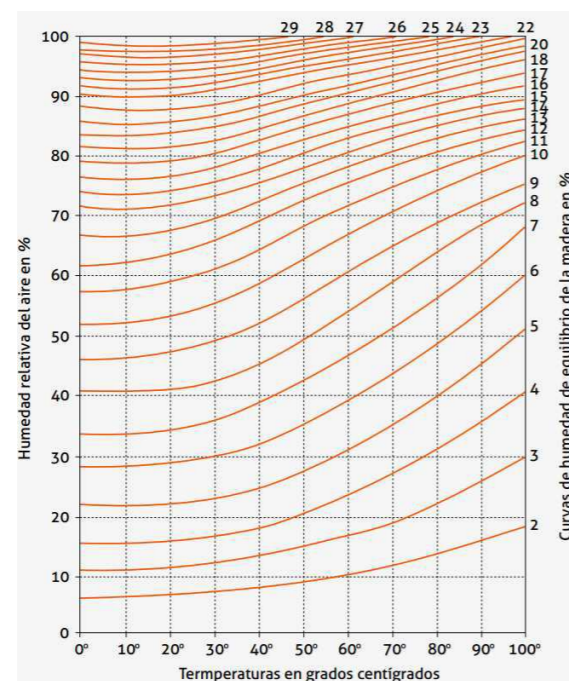


Ilustración 18: Curvas de equilibrio higroscópico de Kollmann

A modo de resumen para los distintos ambientes se tiene que el nivel de humedad aconsejable es:

- 30% en obras hidráulicas
- 25-30% en medios muy húmedos
- 18-25% en maderas expuestas a la humedad (no cubiertas)
- 16-20% en obras cubiertas pero abiertas
- 13-17% en obras cerradas y cubiertas
- 12-14% locales cerrados con calefacción
- 10-12% en locales con calefacción continua

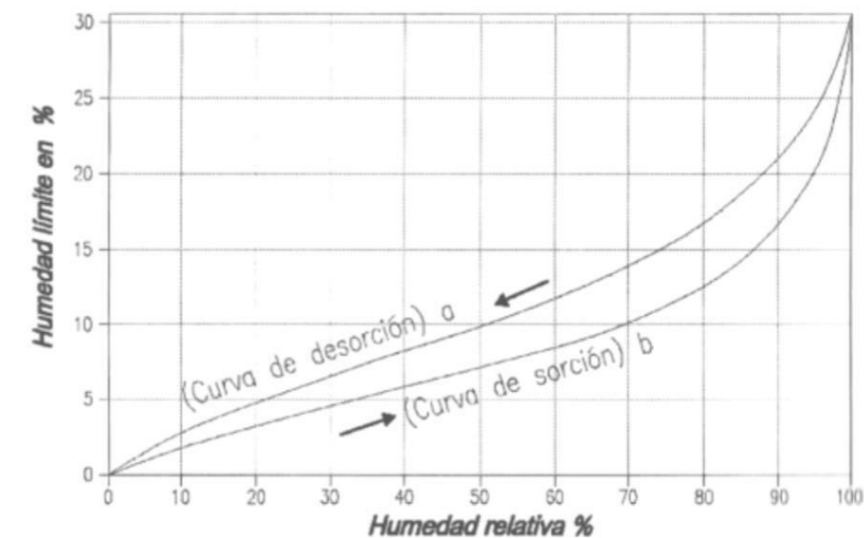


Ilustración 19: Curvas de histéresis de la madera

6.2.4 Hinchazón y merma

Dependiendo de la humedad que presente una madera, sus dimensiones pueden crecer o mermar. A más agua, más se dilatará el material, así como si su contenido en agua disminuye, sus dimensiones también lo harán.

Estos cambios en sus dimensiones sólo se darán cuando el contenido en humedad de la madera sea inferior al Punto de Saturación de la Fibras (PSF), que es aproximadamente del

30%. A partir de este punto sólo se producirá un aumento en su peso, pero sus dimensiones serán constantes.

Como se ha explicado anteriormente, la madera es un material anisotrópico. Por lo cual, las variaciones dimensionales no serán las mismas en las tres direcciones. Para evaluar las contracciones y dilataciones dimensionales se han definido los coeficientes de contracción: contracción volumétrica total, contracción tangencial y contracción radial. La diferencia entre la contracción radial y tangencial es la causa por la que se deforma la madera durante su proceso de secado. Según sus coeficientes la madera tendrá distintos grados de “nerviosidad”.

Es importante resaltar que:

- Es en la dirección tangencial donde se produce una mayor variación dimensional
- En la dirección radial la variación dimensional está entorno al 50-60% de la producida en al tangencial.
- Si la longitud es muy reducida, la variación dimensional es prácticamente despreciable.

6.2.5 Densidad

La relación entre la masa y el volumen de la madera, su densidad, siempre estará referida a un determinado contenido de humedad, que será generalmente del 12% (20°C y 65% de humedad).

La densidad entre los distintos tipos de madera es muy variable, abarca desde los 300 kg/m³ hasta los 1200 kg/m³. La conífera, popular entre las maderas utilizadas en construcción, tiene una densidad de entre 400 y 550 kg/m³. Según su densidad, la madera estará clasificada como muy ligera, ligera, semipesada, pesada y muy pesada.

Puede observarse de este modo, que la madera es un material ideal, de aplicación en obras de construcción, presenta una densidad relativamente baja comparado con su resistencia y módulo de elasticidad, y sobre todo, ligera.

6.2.6 Coeficiente de dilatación térmica

Casi todos los sólidos se dilatan cuando se calientan y se encogen al enfriarse. El caso de la madera, al no ser una estructura homogénea, es un caso especial. Para la madera existen dos coeficientes de dilatación lineal, al contrario que con los metales. Los coeficientes de

dilatación de la madera son muy bajos, por lo que se podría decir que apenas se dilata. (de 3 a 6 x 10⁻⁶ en la dirección paralela y de 30 a 70 x 10⁻⁶ en la perpendicular). El roble, por ejemplo, tiene un coeficiente de dilatación lineal (por cada grado de temperatura y centímetro de longitud) de 0,000005, mientras que si se hace de manera perpendicular el coeficiente será de 0,000054.

Este coeficiente es variable según la dirección respecto a la fibra. En 2010, Dupraz estipula que éstos son:

MADERA CONÍFERA Y FRONDOSA	COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA (1/K)
DIRECCIÓN LONGITUDINAL	3 – 6 * 10 ⁻⁶
DIRECCIÓN RADIAL	15 – 45 * 10 ⁻⁶
DIRECCIÓN TANGENCIAL	25 – 60 * 10 ⁻⁶

Tabla 5: Coeficientes de dilatación térmica de la madera.

Se puede observar que, el coeficiente de dilatación es de 5 a 10 veces superior en la dirección perpendicular a la de la fibra, que en la de la dirección paralela.

6.3 Propiedades mecánicas

Para un entendimiento y análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas de la madera es necesario hacer un análisis comparativo con otros materiales:

	FLEXIÓN	TORSIÓN PARALELA/PERPENDICULAR	COMPRESIÓN PARALELA/PERPENDICULAR	CORTANTE	MÓDULO E
Madera	120	120 / 1,5	110 / 28	12	110000
Hormigón	100	5	105	3	200000
Acero	1700	1700	1700	1000	2100000

Tabla 6: Propiedades mecánicas de los diferentes materiales

De este cuadro comparativo, podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Elevada resistencia a flexión (principalmente si se asocia con su peso).
- Buena capacidad resistente a tracción y a compresión // a la fibra.

- Escasa resistencia al corte, aunque generalmente suficiente para su requisito estructural
- Escasa resistencia a compresión y muy baja a la tracción \perp a la fibra.
- Bajo Módulo E, que incide substancialmente sobre la deformación y pandeo.
- Muy Bajo Módulo G, que incide en las deformaciones por cortante.

Las resistencias y módulos de elasticidad son mucho más elevadas en la dirección paralela a la fibra que en la dirección perpendicular.

- En relación a su peso, posee una muy elevada resistencia a flexión 24 N/mm²
- Tiene una buena resistencia a tracción y a compresión en fibras paralelas, 14 y 21 N/mm² respectivamente.
- Similar al hormigón aunque superior, presenta una escasa resistencia al cortante.
- Bajo módulo de elasticidad 11.000 N/mm²

Puede destacarse que la madera en estado libre de defectos, sus tracciones paralelas a la fibra son superiores a los de flexión. Estas piezas se encuentran ejemplificadas en tirantes y pendolones de cerchas.

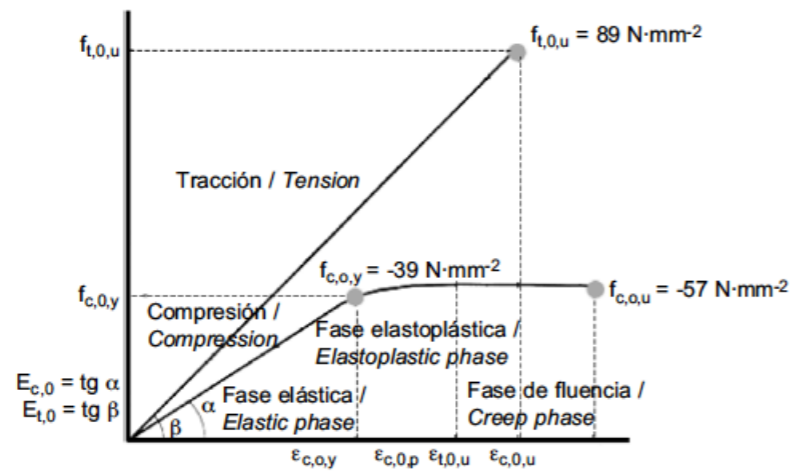


Ilustración 20: Relación entre tensión y deformación en la madera

Es beneficioso para determinados elementos estructurales como pilares, montantes de muros, entramados etc, su elevada resistencia a compresión paralelas a la fibra

Es necesario tener en cuenta el cálculo a pandeo en el análisis de los elementos sometidos a esfuerzos de compresión. La resistencia a compresión paralela a la fibra de la madera oscila entre unos 16 y 23 N/mm². Sin embargo, la resistencia a compresión perpendicular a la fibra es de un orden 7 veces inferior.

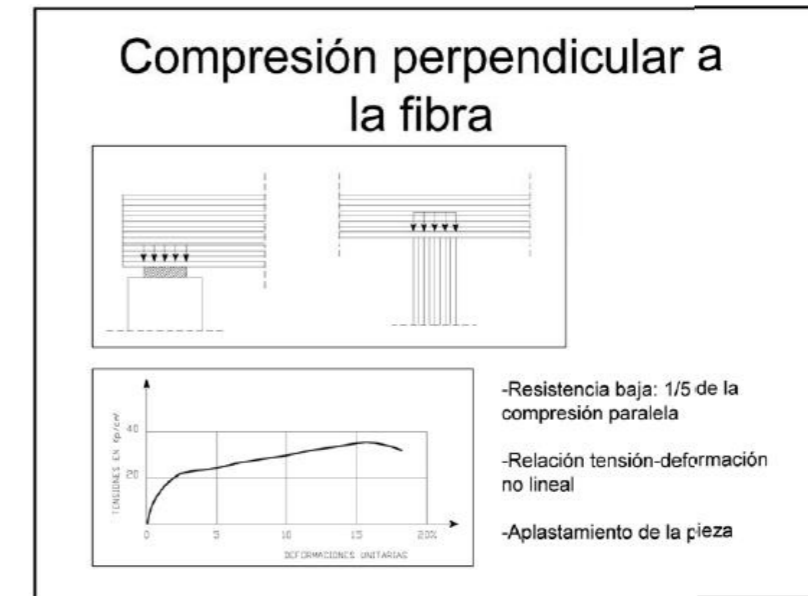


Ilustración 21: Compresión perpendicular a la fibra neutra

Las piezas de madera sometidas a flexión, están sometidas a una combinación de tracción y compresión paralelas a la fibra, variando el valor de su resistencia entre los 14 y 30 N/mm². Sus resistencias máximas se localizan en las fibras extremas de la sección y nulas en su fibra neutra. Esta propiedad tiene su mayor relevancia en elementos de vigas, viguetas de forjado, pares de cubiertas...

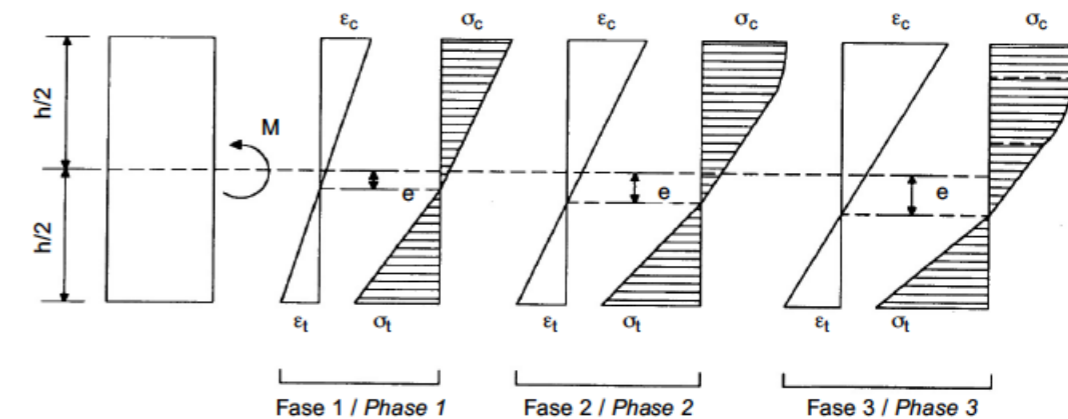


Ilustración 22: Esquema del descenso de la fibra neutra

En lo relativo al esfuerzo cortante, cabe mencionar, que provoca tensiones tangenciales actuantes, de diferentes formas, sobre las fibras de la madera. A continuación, se mencionan los diferentes tipos de tensiones tangenciales producidas por este esfuerzo:

- Tensiones tangenciales de cortadura: sus fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo. El fallo se produce por aplastamiento.

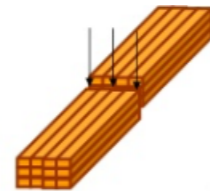


Ilustración 23: Cortadura

- Tensiones tangenciales de deslizamiento: el fallo es ocasionado a causa del deslizamiento de unas fibras respecto de otras en la dirección longitudinal.

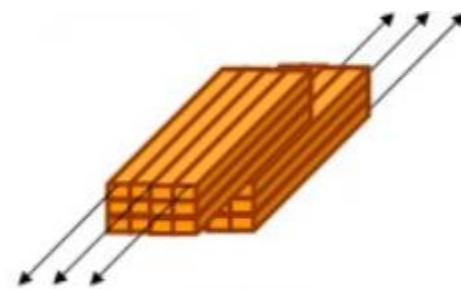


Ilustración 24: Deslizamiento

- Tensiones tangenciales de rodadura: el fallo se origina por la rodadura de unas fibras respecto de otras.

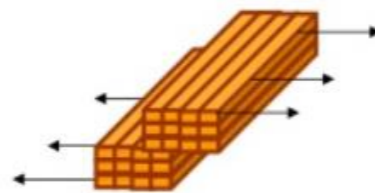


Ilustración 25: Rodadura

Se concluye este apartado comentando que los factores más influyentes en las propiedades mecánicas de las maderas son los siguientes:

- Contenido de humedad
- Duración de la carga
- Calidad de la madera

6.4 Clasificación de madera estructural

Se define madera estructural a aquella que se emplea en fines portantes, muy poco procesada, es decir, no se le deberán aplicar encolados ni ensambles de unión dentada. La obtención de este material se consigue aserrando de forma longitudinal un tronco y un posterior cepillado.

En función del tamaño de las piezas podemos distinguir: listones, tablas, tablones, madera escuadrada y madera de gran escuadría.

Es imprescindible conocer la naturaleza de la madera, sus características y su comportamiento para establecer, de este modo, unos parámetros de las bases de cálculo.

Se considera, la propia estructura interna de la madera, en términos generales, como un haz de tubos longitudinales unidos por sus paredes, denominados fibras. Por lo que es entendible una diferencia tan elevada entre la resistencia a esfuerzos paralelos a las fibras (superiores), y a esfuerzos perpendiculares (inferiores).

El empleo de la madera como material estructural presenta un conjunto de ventajas que se aprovecharán y explotarán todo lo posible, y otro de inconvenientes, que se tratarán de eliminar o minimizar su influencia en la estructura lo máximo posible.

Según la norma UNE-EN 338:2010 Madera estructural. Clases resistentes, la madera estructural se

clasifica en los siguientes tipos:

- Especies coníferas y chopo: C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45, C50
- Especies frondosas: D40, D50, D60, D70

Esta nomenclatura consiste en una letra (C para coníferas y/o chopo y D para las frondosas) y un número que indica la resistencia característica a flexión en N/mm^2

Tras esta breve introducción a la madera estructural resistente, se procede a una clasificación y estudio de las diferentes clases de madera estructural existentes.

6.4.1 Madera en rollo

Este estilo de madera estructural es el formato más simple y directo para el máximo aprovechamiento como elemento estructural obtenido directamente del árbol, es el propio

tronco del árbol desramado y, por lo habitual, descortezado con sección prácticamente circular.

Su empleo suele limitarse a causa de su sección circular, ya que es un inconveniente en el cálculo y realización de uniones debido a la escasez de normativa con aporte de dichas propiedades mecánicas.

Suelen emplearse fundamentalmente en:

- Viguetas de forjado de piso y parecillos en cubierta
- Pies derechos en construcciones de uso agrícola
- Construcciones de embarcaciones y pantalanés
- Pilotes de cimentación



Ilustración 26: Madera en rollo

Suelen emplearse, en Europa, las especies de abeto, pino silvestre, pino oregón, abeto sitka y alerce. Su sección varía entre los 100 y 350 mm de diámetro, pudiendo tener longitudes hasta de 18 metros.

Las clases resistentes de este tipo de madera estructural son C30, C24, C18.

6.4.2 Madera aserrada o madera sólida

Este tipo de madera experimenta una manipulación mínima desde que es sacada del árbol, lo que la diferencia del resto de maderas transformadas o/y industrializadas. Tienen una sección rectangular, admiten luces medias de 6 a 17 metros, aunque es empleada principalmente en estructuras de luces pequeñas de 4 a 6 metros máximo.

Puede encontrarse en el empleo de una estructura completa o como parte de sistemas mixtos, como en forjados. Su clasificación es condicionada por las propiedades mecánicas y por la intrusión visual en el medio.

Las principales especies españolas de las que se obtiene este tipo de madera, son el pino silvestre, laricino, pinaster, radiata, castaño, roble, chopo y eucalipto. Sin embargo, en la normativa española de clasificación y en norma UNE-EN 1912, sólo podemos encontrar los cuatro pinos y el eucalipto.

Es fácil encontrarla en la composición de pequeños entramados de cerchas ligeras de barras de sección reducida (40 x 140) muy cercanas con interejes próximos a los 70 cm, sin correas secundarias, y con uniones industrializadas entre barras con las propias placas dentadas, salvando, de este modo, luces de hasta los 16 m. Para conseguir luces mayores, las vigas pasaran a ser de secciones compuestas y las uniones con conectores metálicos.



Ilustración 27: Madera aserrada.



Ilustración 28: Patrones de corte de la madera aserrada

Las clases resistentes de la madera aserrada son:

- Coníferas y chopo: C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C35, C50.
- Especies frondosas: D18, D24, D30, D35, D40, D50, D60, D70.

En cuanto a las dimensiones de la madera aserrada, no se encuentran normalizadas en el entorno europeo. Normalmente las secciones empleadas son de 200 x 300 máximo para largos de 7 a 8 metros. En España la madera aserrada para uso estructural esta generalmente formada por escuadrillas superiores a 100x100mm siguiendo una gama de 100x150, 150x150, 150x200, 200x200, 200x250 mm para la madera de tipo silvestre y laricio.

6.4.3 Madera empalmada

Está compuesta por piezas de madera aserrada previamente clasificada estructuralmente. Se une a través de empalmes mediante una unión dentada múltiple en las testas, lo que nos ofrece perfiles de hasta 14 metros, y excepcionalmente alcanzan los 16 bajo pedido. Su grueso máximo es de 120mm y ancho máximo de 240mm. Su ventaja es la posibilidad de empleo en estructuras con mayores luces.

Todos los aspectos de fabricación, materiales y especificaciones de la calidad de la propia madera se encuentran recogidas en el proyecto de la norma prEN 15497. La clase comercial más habitual es la C24.

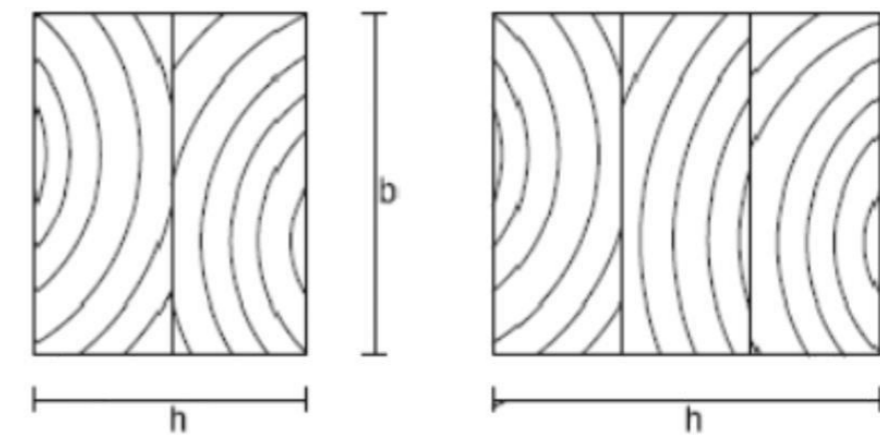
6.4.4 Madera maciza encolada

Son aquellos perfiles con sección rectangular, conformado por dos o 5 láminas encoladas de madera de espesor comprendido entre 45 y 85 milímetros, y dispuestas paralelamente al eje de las fibras. la mayor dimensión de la sección transversal no superior a 280. Los productos más habituales están formados por dos o tres láminas y son conocidos comercialmente con el nombre de dúos y tríos.

Las longitudes llegan a alcanzar los 18 m y las clases resistentes más habituales son la C24 y la C30. Su empleo es principalmente en vigas, viguetas, pares y correas en viviendas y edificios de luces reducidas.



Ilustración 29: Sección trio



ImagIlustración 30: Secciones dúo y trio

6.4.5 Madera laminada encolada

Este es un material de construcción de alta ingeniería, muy elaborado, ampliando en numerosos casos el uso tradicional de la madera estructural ya que, la producción se lleva a cabo bajo un estricto control de calidad del proceso integrado, se consiguen un gran número de ventajas en comparación con la madera sólida.

Está compuesto por perfiles formados por el encolado de al menos dos láminas de madera con la fibra en dirección paralela al eje de las mismas, con un espesor comprendido entre 6 y 45mm.

Suele emplearse fundamentalmente en edificaciones de uso público de grandes luces, entre 30 y 70 metros. Al igual que se encuentra también en los elementos principales de construcciones cuyas luces son moderadas.



Ilustración 31: Madera laminada encolada.

Las especies empleadas para la obtención de material estructural son en España principalmente especie frondosas como el Eucalipto, Roble, Cataño y el Fresno en menor proporción, Haya e Iroko.

Las longitudes y secciones de la madera laminada encolada pueden ampliarse infinitamente debido a la producción de láminas continuas. Sin embargo sí que existen limitaciones, impuestas por diversos factores como el tiempo de exposición del pegamento, el tamaño de las máquinas allanadoras y las dimensiones de las fábricas donde se producen. Por lo general, la exigencia de resistencia al fuego es de 30 minutos lo que obliga a un ancho mínimo de 100mm

En cuanto al transporte, en el caso de que las vigas superen los 15 metros de longitud, 2.5 metros de ancho o 3.5 metros de canto, sería necesario realizar acciones complementarias tales como: ampliación del equipamiento de señalización, solicitud de escolta policial o petición de permisos especiales.

Posee la facilidad de moldeo de su forma, más concretamente de sus láminas, antes de llevar a cabo la adherencia de éstas, permitiendo así la creación de vigas inusuales. Se consigue atenuar su deformación gracias a que admite la posibilidad de realizar vigas con contraflecha.

La producción de vigas curvas requiere la adaptación de los aparatos de presión para cada nueva geometría de viga, lo que provoca un aumento del tiempo de producción en comparación con vigas rectas.

Las resistencias están referidas a un canto de sección de 600mm. Si el canto es inferior se multiplica por un coeficiente k_h (no mayor que 1,1) que se calcula como:

- Para $h < 150$ mm $k_h = \left(\frac{600}{h}\right)^{0,1}$
- Para $h \geq 600$ mm $k_h = 1$

El sistema de clases resistentes es el definido según la norma UNE-EN 14080, que diferencia entre 7 clases resistentes de composición homogénea y otras 7 en el caso de que sea combinada. La denominación emplea las siglas GL **Glued Laminated timber**, seguidas de la resistencia característica a flexión en N/mm².

- Clases homogéneas: GL20h, GL22h, GL24h, GL26h, GL28h, GL30h, GL32h
- Clases combinadas: GL20c, GL22c, GL24c, GL26c, GL28c, GL30c, GL32c

6.5 Clases de servicio y niveles de riesgo

Como se ha mencionado varias veces anteriormente, la humedad juega un papel realmente importante e influyente en el comportamiento de la estructura, principalmente en sus propiedades mecánicas, por lo que será necesario aplicar un factor de corrección a las características mecánicas.

La propia normativa asigna a cada elemento estructural una determinada clase de servicio dependiendo de ciertas condiciones ambientales previstas. Este sistema de clases se encuentra, fundamentalmente, destinado a la asignación de valores resistentes y al cálculo de las deformaciones, ya sean instantáneas como diferidas.

- Clase de servicio 1: Se caracteriza por un contenido de humedad en los materiales correspondiente a una temperatura de 20+/- 2°C y una humedad relativa del aire que

solo exceda el 65% unas pocas semanas al año. Madera bajo techo totalmente protegida climáticamente.

- Clase de servicio 2: Se caracteriza por un contenido de humedad en los materiales correspondiente a una temperatura de 20+/- 2°C y una humedad relativa del aire que solo exceda el 85% unas pocas semanas al año. Madera bajo techo totalmente protegida pero donde la humedad ambiental puede producir un humedecido ocasional.
- Clase de servicio 3: Condiciones climáticas que conduzcan a contenidos de humedad superiores a los de la clase 2. Se usa para estructuras expuestas a la intemperie en contacto con el agua o con el suelo, como la estructura objeto de estudio.

En la norma UNE-EN 335-1:2013 se definen los niveles de riesgo de la siguiente forma:

- Nivel de riesgo 1: Situación en la que la madera está bajo techo, totalmente protegida climáticamente y no expuesta a la humedad.
- Nivel de riesgo 2: Situación en la que la madera está bajo techo, totalmente protegida climáticamente pero donde la alta humedad ambiental puede llegar a un humedecimiento ocasional.
- Nivel de riesgo 3: Situación en la que la madera no está bajo techo pero tampoco está en contacto directo con el suelo.
- Nivel de riesgo 4: Situación en la que la madera está en contacto con el suelo o agua natural y por tanto está permanentemente expuesta al humedecimiento.
- Nivel de riesgo 5: Situación en la que la madera está permanentemente en contacto con agua salada.

6.6 Comprobaciones a realizar

Los proyectos destinados a la realización de estructuras de madera, deben llevarse a cabo bajo el riguroso seguimiento de la Norma Europea EN-1990:2002 y el Eurocódigo 5, los cuales tienen su base principalmente en los estados límite y requisitos que conciernen a la seguridad estructural.

Los Eurocódigos estructurales establecen un conjunto de normas técnicas armonizadas, cuya finalidad es de aplicación en las estructuras de edificación y de ingeniería civil. Estas normativas suelen aprobarse inicialmente de modo experimental.

Éstos restringen su ámbito de aplicación únicamente a la ejecución y el control hasta donde sea necesario, con el objetivo de especificar la calidad de los productos de la construcción, y la caracterización de la mano de obra necesaria para alcanzar las hipótesis de las directrices del proyecto.

Concretamente, el Eurocódigo 5, es una normativa empleada para el diseño y construcción de obras cuyo material predominante es la madera estructural. La aplicación de dicha normativa dota del nivel de seguridad de las estructuras, revaluándose de este modo en el resto de los países europeos. Pudiendo compararse así su nivel actual de seguridad con las estructuras de acero y hormigón.

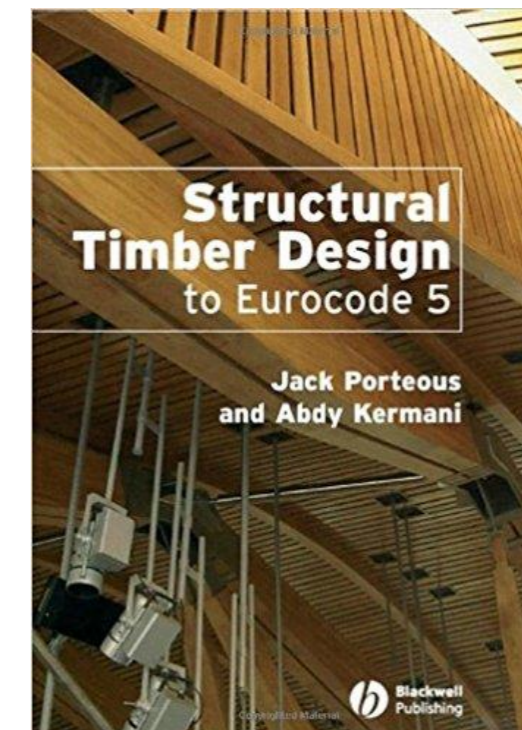


Ilustración 32: Eurocódigo 5 - Estructuras de madera

Esta normativa, considera los Estados Límite de Servicio ELS, que incluyen deformaciones que afectan a la apariencia y confort de los usuarios como consecuencia del efecto de las acciones, así como aquellos producidos por la humedad

El propio Eurocódigo 5, EC 5, indica que ha sido terminada y aprobada para su publicación bajo la dirección de la CCE, está editada por el CEN como una Norma Experimental Europea (ENV). Está orientada hacia su aplicación práctica con carácter experimental en el cálculo de obras de edificación y de ingeniería civil cubierta por el campo de aplicación de la Norma.

Este Eurocódigo únicamente trata de los requisitos relativos a la resistencia mecánica, condiciones de servicio y durabilidad de las estructuras. No se consideran otro tipo de aspectos como los relativos al aislamiento térmico o acústico.”

Esta normativa no contiene referencias claras sobre la implicación de las acciones sísmicas en la estructura. Pero se emplea como elemento de apoyo el Eurocódigo 8 "Cálculo de estructuras en zonas sísmicas", el cual completa el EC 5 incluyendo estos aspectos.

6.6.1 Valores de diseño

La expresión para los valores de diseño de la madera está dividida tanto por un coeficiente γ y por otro factor denominado K_{mod} , el cual depende completamente de la clase de servicio y duración de las cargas aplicadas.

El valor de cálculo se obtiene mediante el uso de:

$$X_d = k_{mod} * \frac{X_k}{\gamma_M}$$

Siendo:

- X_k C valor característico de la propiedad
- K_{mod} factor de modificación que tiene en cuenta el efecto de la duración de la carga y contenido de humedad en los valores resistentes, detallados en la tabla 3.1 de la norma UNE-EN 1995-1-1:2006. Así grosso modo se distinguen cinco clases de duración de la carga:

CLASE DE DURACIÓN DE LA CARGA	TIEMPO DE APLICACIÓN	EJEMPLOS DE CARGA
Permanente	Más de 10 años	Peso propio, cerramientos, tabiquerías, barandillas
Larga duración	Entre 6 meses y 10 años	Apeos o estructuras provisionales no itinerantes
Media duración	Entre 1 semana y 6 meses	Sobrecargas de uso, aparcamientos, nieve en localidades con altitud >1000 msnm
Corta duración	Menos de 1 semana	Nieve en localidades con altitud < a 1000 msnm
Instantánea	Algunos segundos	Impacto accidental, sismo, viento, explosión.

Tabla 7: Clase de duración de las cargas

	CLASE DE SERVICIO	DURACIÓN DE LA CARGA				
		Permanente	Larga	Media	Corta	Instantánea
Madera maciza	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
Madera laminada encolada	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

Tabla 8: Valores de k_{mod} para las maderas a utilizar

- γ_M coeficiente parcial de seguridad para el material

Combinaciones fundamentales

Madera maciza	1,30
Madera laminada encolada	1,25
Uniones	1,30
Combinaciones accidentales	1,25
Herrajes de placa clavo	1,00

Tabla 9: Coeficientes parciales de seguridad para los elementos a utilizar

6.6.2 Estados límites de servicio

Se define Estados límite como “son aquellos por encima de los cuales la estructura deja de ser capaz de cumplir la función para la que fue construida.” Estos se clasifican del siguiente modo:

- Estados límites últimos: entendiéndose estos como asociados con el colapso o con otras formas de fallo de la estructura que pongan en peligro la seguridad de las personas. Incluyendo también los estados previos correspondientes al colapso de la estructura, que por simplificación se consideran en lugar del colapso mismo
- Estados límites de servicio: corresponden a aquellas situaciones por encima de las cuales los criterios especificados de servicio dejan de cumplirse.

DEFORMACIONES

Para prevenir el posible daño producido en los materiales superficiales, techos, cerramientos y particiones, y de este modo cumplir con las necesidades funcionales establecidas, así como los requerimientos estéticos, el Eurocódigo 5 recomienda varios valores límite de la flecha en vigas.

La propia deformación de la estructura es consecuencia de la situación de los esfuerzos y acciones actuantes sobre la pasarela, y deberá calcularse para una combinación casi permanente.

Los componentes de la flecha se muestran en la siguiente imagen:

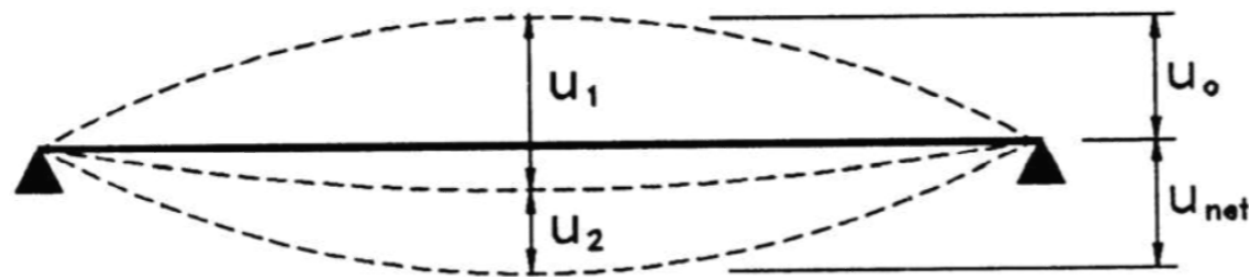


Ilustración 33: Componentes de la flecha.

- u_0 = contraflecha (en caso de ser aplicada)
- u_1 = deformación debida a cargas permanentes
- u_2 = deformación debida a cargas variables

➤ $u_{net} = \text{deformación neta} = u_1 + u_2 - u_0$

Debido al símil comportamiento de todas las piezas y uniones que componen este puente peatonal, se dará un mismo comportamiento frente a fluencia:

$$u_{final} = u_{fin,G} + u_{fin,Q1} + u_{fin,Qi}$$

Donde:

- Para la acción del peso propio (G) se emplea:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G}(1 + k_{def})$$

- Para la acción variables predominante (Q_1) se emplea:

$$u_{fin,Q1} = u_{inst,Q1}(1 + \psi_{2,1}k_{def})$$

- Para la acción variables acompañantes ($Q_i/i > 1$):

$$u_{fin,Qi} = u_{inst,Qi}(\psi_{0,i} + \psi_{2,i}k_{def})$$

- $\psi_{2,i}$, $\psi_{2,1}$ son los factores para el valor casi permanente de las acciones variables

Tipo de acción	ψ_2
Cargas permanentes	1
Sobrecarga de uso lugares públicos	0,6
Carga de nieve	0
Carga de viento	0

Tabla 10: Valores de ψ_2

- $\psi_{0,i}$ son los factores para los valores de combinación de las acciones variables.
- k_{def} es el factor de fluencia que describe el incremento de la deformación con el paso del tiempo dependiendo de las condiciones climáticas y de la duración de la carga considerada. Para el cálculo con madera laminada encolada se sus valores son los siguientes:

Duración de la carga	Clase de servicio		
	1	2	3
Permanente	0,60	0,80	2,00
Larga	00,5	0,50	1,50
Media	0,25	0,25	0,75
Corta	0,00	0,00	0,30

Tabla 11: Valores de k_{def} para la madera laminada

Los valores límite de deformación son

- U_{inst} no debe de ser superior a $L/300$.
- U_{fin} no debe de ser superior a $L/150$.

A continuación, se presenta un diagrama del comportamiento de fluencia de la madera laminada encolada

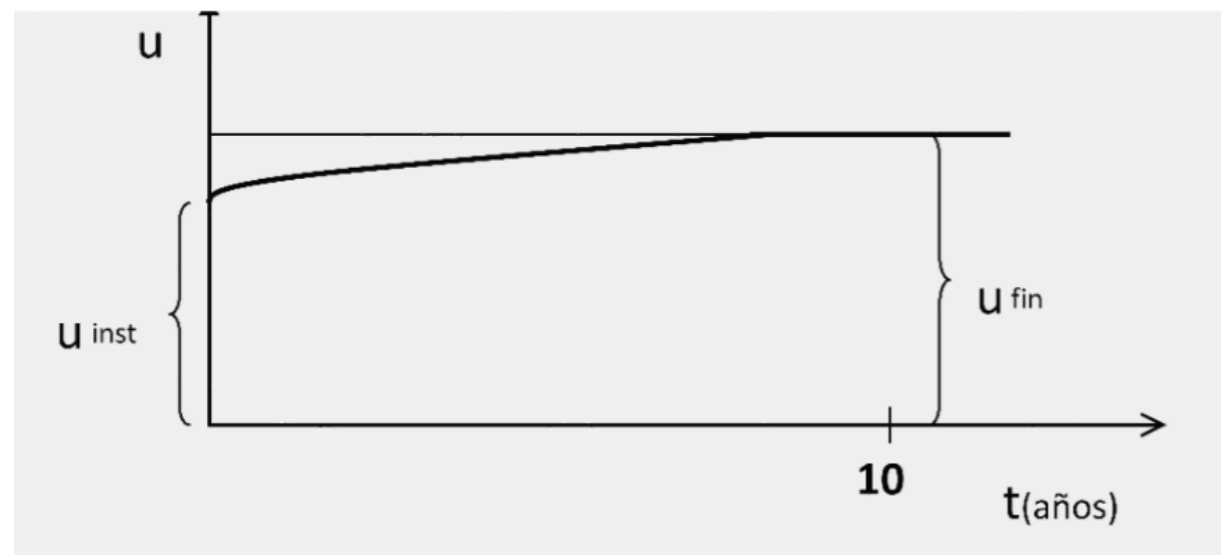


Ilustración 33: Evolución de la deformación a carga constante.

6.6.3 Estados Límite Últimos

Como ya hemos mencionado, los estados límites últimos de una estructura corresponden a aquellas situaciones por encima de las cuales los criterios especificados de servicio dejan de cumplirse.

A continuación, se enumeran las comprobaciones que se deben realizar establecidas en el Eurocódigo 5:

CÁLCULO DE SECCIONES SOMETIDAS A TENSIONES EN UNA DIRECCIÓN PRINCIPAL:

Se aplica sobre piezas de madera maciza cuya directriz es recta o de madera laminada encolada con una sección constante, donde la dirección de la fibra es básicamente paralela a la longitud de la pieza., aunque técnicamente el elemento estructural se encuentra sometida únicamente a tensiones en la dirección de uno de sus ejes principales.

Tracción paralela a la fibra

Se debe cumplir la condición siguiente:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

$$\eta = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1$$

Donde:

$\sigma_{t,0,d}$ es el valor de cálculo de la tensión de tracción paralela a la fibra

$f_{t,0,d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a tracción paralela a la fibra

Tracción perpendicular a la fibra

Se debe cumplir la condición siguiente, siempre y cuando tengamos en cuenta el efecto del tamaño de la pieza:

$$\sigma_{t,90,d} \leq f_{t,90,d}$$

Donde

$\sigma_{t,90,d}$ es el valor de cálculo de la tensión de tracción paralela a la fibra

$f_{t,90,d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a tracción paralela a la fibra

Compresión paralela a la fibra

Se debe cumplir la condición siguiente:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

Donde

- $\sigma_{c,90,d}$ es el valor de cálculo de la tensión de tracción paralela a la fibra
- $f_{c,90,d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a tracción paralela a la fibra

El valor de $k_{c,90}$ se tomará igual a 1,0 a no ser que se apliquen las disposiciones recogidas en el apartado 6.1.5 del Eurocódigo 5 (UNE_EN 1995_1_1)

Flexión

Deben cumplirse las condiciones siguientes:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Donde:

- $\sigma_{m,i,d}$: son los valores de cálculo de las tensiones de flexión respecto a los ejes principales de la sección.
- $f_{m,d}$: son los valores de cálculo de las correspondientes resistencias a flexión.
- El valor de k_m será:
- $k_m = 0.7$ Para secciones rectangulares de madera laminada encolada y madera microlaminada (LVL)
- $k_m = 1.0$ Para otros tipos de secciones
- k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga y el contenido de humedad.

Cortante

Para el caso de cortante con una componente de la tensión paralela a la fibra así como para el cortante con ambas componentes de la tensión perpendiculares a la fibra debe cumplirse la condición siguiente:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$\eta = \frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

Donde

- τ_d es el valor de cálculo de la tensión de cortante;
- $f_{v,d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a cortante para la condición existente.

Torsión

Debe cumplirse la condición siguiente:

$$\tau_{tor,d} \leq k_{shape} \cdot f_{v,d}$$

$$\eta = \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape} \times f_{v,d}} \leq 1$$

con

- $k_{shape} = 1,2$ para una sección circular

Y para una sección rectangular

$$k_{shape} = \min \left\{ 2,0 ; 1 + 0,15 \times \frac{b_{max}}{b_{min}} \right\}$$

donde

- $\tau_{tor,d}$ es el valor de cálculo de la tensión de torsión;
- $f_{v,d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a cortante;
- k_{shape} es un factor que depende de la forma de la sección transversal;
- h es la dimensión mayor de la sección transversal;
- b es la dimensión menor de la sección transversal.

Cálculo de secciones sometidas a una combinación de tensiones:

Tensiones de compresión que forman un ángulo con respecto a la dirección de la fibra.

Las tensiones de compresión con un ángulo α respecto a la fibra, deberían cumplir la condición siguiente:

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \text{sen}^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

donde

- $\sigma_{c,\alpha,d}$ es el valor de cálculo de la tensión de compresión con un ángulo α respecto a la fibra.

Flexión y tracción combinadas

Deben cumplirse las condiciones siguientes:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Flexión y compresión combinadas

Deben cumplirse las siguientes condiciones:

$$\left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}}\right)^2 + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Estabilidad de las piezas:

Como la misma normativa indica, ha de incluirse las tensiones de flexión provocadas por la curvatura inicial, las excentricidades, al igual que los desplazamientos aparecidos por éstas y los generados por alguna carga lateral.

Columnas sometidas a compresión o a la combinación de compresión y flexión

Deben de aplicarse las siguientes fórmulas para obtener un valor de las esbelteces relativas:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

Donde:

- λ_y y $\lambda_{rel,y}$ son las esbelteces mecánicas correspondientes a la flexión respecto al eje y

(deformación en la dirección z);

- λ_z y $\lambda_{rel,z}$ son las esbelteces mecánicas correspondientes a la flexión respecto al eje z

(deformación en la dirección y);

- $E_{0,05}$ es el valor del quinto percentil del módulo de elasticidad paralelo a la fibra.

En el caso de que $\lambda_{rel,y}$ y $\lambda_{rel,z}$ tengan un valor inferior a 0,3, no será necesario recurrir a la comprobación de la estabilidad frente al pandeo de la estructura. Sin embargo, en todos los casos restantes, las tensiones deben cumplir las condiciones siguientes:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Donde los símbolos se definen como:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2)$$

Siendo:

$$\beta_c = \begin{cases} 0,2 & \text{para madera sólida} \\ 0,1 & \text{para madera laminada} \end{cases}$$

Vigas sometidas a flexión o a una combinación de flexión y compresión

En cuanto a la estabilidad de una viga sometida a un esfuerzo torsional, ha de comprobarse en la situación de la única existencia de un sólo flecto M_y aplicado sobre el eje fuerte denominado eje y, al igual que ha de comprobarse su estabilidad frente a la aplicación de una combinación de momento flector M_y y un esfuerzo de compresión N_c .

Se obtiene el valor de la esbeltez relativa para una viga sometida a un esfuerzo de flexión a través de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$$

Donde se definen los parámetros que la componen como:

- $\sigma_{m,crit}$ es la tensión crítica de flexión calculada de acuerdo con la teoría clásica de la

estabilidad, utilizando los valores de la rigidez correspondientes al quinto percentil.

La tensión crítica de flexión debería calcularse según la expresión siguiente:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_z \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W_y}$$

Definiéndose:

- $E_{0,05}$ es el valor del quinto percentil del módulo de elasticidad paralelo a la fibra;
- $G_{0,05}$ es el valor del quinto percentil del módulo de cortante paralelo a la fibra;
- I_z es el momento de inercia respecto al eje débil z;
- I_{tor} es el módulo de torsión;
- l_{ef} es la longitud eficaz de la viga, que depende de las condiciones de apoyo y de la configuración de la carga, de acuerdo con la Tabla 1. 5. 7.
- W_y es el módulo resistente respecto al eje fuerte y.

TIPO DE VIGA	TIPO DE CARGA	l_{ef}/l^*
Simplemente apoyada	Momento constante	1,0
	Carga uniformemente distribuida	0,9
	Carga concentrada en el centro luz	0,8
Voladizo	Carga uniformemente distribuida	0,5
	Carga concentrada en el centro luz	0,8

* La relación entre la longitud eficaz l_{ef} y la luz l es válida para una viga con apoyos con restricción a la torsión y cargada en el centro de gravedad. Si la carga se aplica en el borde comprimido de la viga, l_{ef} debería incrementarse en $2h$ y si la carga se aplica en el borde traccionado de la viga puede disminuirse en $0,5h$.

Tabla 12: Longitud eficaz expresada como una relación con la luz

En la situación un único momento flecto aplicado sobre el y, es decir, M_y , las tensiones deberían cumplir la siguiente restricción:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d}$$

Donde:

- $\sigma_{m,d}$ es el valor de cálculo de la tensión de flexión
- $f_{m,d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a flexión
- k_{crit} es un factor que tiene en cuenta la reducción de la resistencia a flexión debido al vuelco lateral

El factor k_{crit} puede tomarse igual a 1,0 en vigas en las que el desplazamiento lateral del borde comprimido está impedido en toda su longitud y el giro por torsión de los apoyos también está impedido.

En el caso de vigas con una desviación lateral inicial respecto a la forma recta, k_{crit} puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{para } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

Si hubiera aplicado una combinación de un momento flector M_y respecto al eje fuerte y un esfuerzo axial N_c , las tensiones deberán cumplir la condición siguiente:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

Donde:

- $\sigma_{m,d}$ es el valor de cálculo de la tensión de flexión
- $\sigma_{c,d}$ es el valor de cálculo de la tensión de compresión
- $f_{c,0,d}$ es el valor de cálculo de la resistencia a compresión paralela a la fibra
- $k_{c,z}$ es el mismo que el de columnas a compresión

6.7 Modelo estructural, materiales y acciones

A continuación, procederemos a una completa caracterización de la pasarela, para la definición total de la misma. Ésta consta de dos celosías tipo Pratt, de 18'87 metros de longitud, también posee un ancho de paso de 3'5 metros, y un canto de 1'75 metros.

Estas dos celosías de las que se compone la estructura se encuentran divididas un total de 10 triangulaciones, de las cuales 5 tienen una diagonal dirigida hacia la derecha y las otras 5 hacia la izquierda.

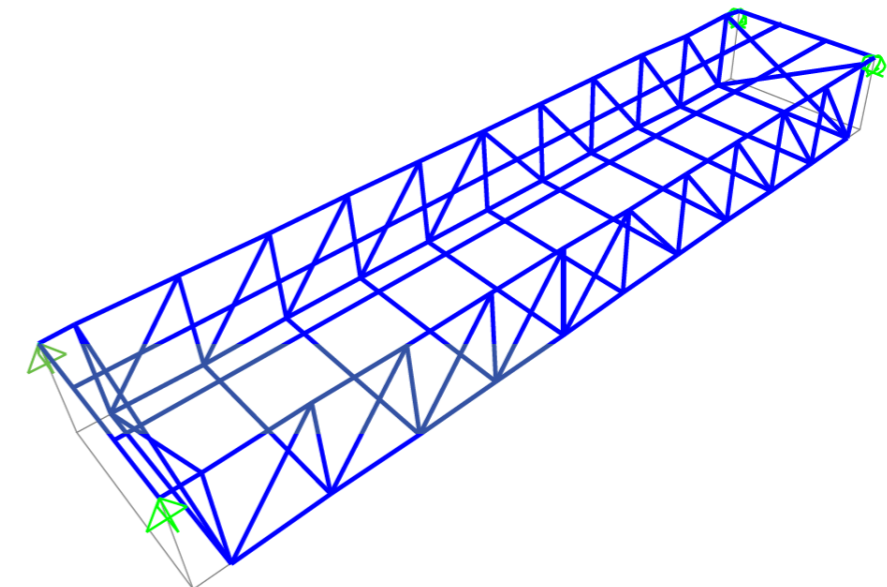


Ilustración 34: Modelo estructural celosía en SAP2000

La estructura estará compuesta completamente por madera estructural, más concretamente madera laminada encolada en la totalidad de la misma. Ésta tendrá una resistencia de 32 N/mm², en una clase de servicio tipo 3 superando la humedad del 85 % varias veces al año.

Atendiendo a la normativa EN 14080, podemos extraer las características mecánicas de la madera empleada en la construcción propuesta, resumidas en la siguiente tabla:

PROPIEDAD	GL32h	
Valores característicos de resistencia N/mm ²		
Resistencia a flexión	$f_{m,k}$	32
Resistencia a tracción paralela	$f_{t,0,k}$	25,6

Resistencia a tracción perpendicular	$f_{t, 90, k}$	0,5
Resistencia a compresión paralela	$f_{c, 0, k}$	32
Resistencia a compresión perpendicular	$f_{c, 90, k}$	2,5
Resistencia a cortante y torsión	$f_{v, k}$	3,5
Valores característicos de rigidez N/mm²		
Módulo de elasticidad paralelo	$E_{0, mean}$	14200
Módulo de elasticidad 0,05	$E_{0, 05}$	11800
Módulo de elasticidad perpendicular	$E_{90, mean}$	300
Módulo cortante	G_{mean}	650
Módulo cortante 0,05	$G_{0, 05}$	540
Valores característicos de densidad kg/m³		
Densidad característica	P_{mean}	490

Tabla 13: Características mecánicas de la madera empleada.

- **Planta:**

El trazado en planta del tablero de la pasarela es recto y perpendicular al eje del cauce, minimizando así su longitud.

Se disponen dos celosías tipo Pratt en la dirección longitudinal de la misma, cuya separación entre sus caras internas es de 3 metros.

Sobre estas dos vigas longitudinales se van a colocar los tablones de madera, de 3 centímetros de canto, que conforman el tablero, generando un ángulo de 90 grados con las longitudinales, y una separación entre las mismas de 1 centímetro correspondiente a las juntas rellenas por un material elastómero.

Las dimensiones y características principales que describen y detallan la planta de la pasarela se ven con mayor claridad en el Anejo III: Planos

- **Alzado:**

El puente presenta un alzado recto ajustado a una celosía simétrica, cuyos cordones inferiores y superiores son paralelos entre sí y separados 1'75 metros. A esto se le añade una celosía sin carácter resistente, únicamente con funcionalidad protectora, cuya altura es de 1'3 metros.

Al igual que en la sección en planta, tanto las características como las dimensiones de la pasarela pueden observarse en el Anejo III: PLANOS.

- **Sección transversal:**

En cuanto al análisis de la sección transversal, tiene forma de U, con un ancho entre las paredes interiores de 3'5 metros, y un canto total de 3'05 metros de los cuales 1'45 metros corresponden a la barandilla de seguridad.

Como hemos dicho en los dos casos anteriores, encontraremos mejor definidas las dimensiones y características principales de la sección transversal de la pasarela en el Anejo III: PLANOS.

Para llevar a cabo la comprobación de los estados límites últimos, se han tenido en cuenta las siguientes acciones:

- Peso propio
- Peatones y ciclistas
- Nieves
- Viento
- Vehículo de servicio
- Sismo

6.7.1 Peso propio

La madera que se va a proceder a utilizar se conoce como laminada encolada GL32h, cuya densidad característica es de 490 kg/m³. Peso al cual, se le incorporará un 10% más directamente relacionado con el peso de las uniones.

6.7.2 Peatones y ciclistas

Atendiendo al capítulo 5 que trata las acciones sobre aceras, pasarelas y carriles de bicicletas, de la norma EN 1991-2:2003, podemos definir dicha carga del siguiente modo:

- q_{fk} Carga uniformemente distribuida que se supondría aplicada longitudinal y transversalmente solo en las zonas desfavorables de la superficie de influencia.

$$q_{fk} = 2'0 + \frac{120}{L + 30} = 2 + \frac{120}{15'80 + 30} = 4'62 \text{ kN/m}^2$$

6.7.3 Nieve

La nieve provoca una sobrecarga que es necesario tener en cuenta y considerarla como una carga uniforme repartida tanto a lo largo como a lo ancho del tablero. Su valor e influencia sobre la estructura queda definido por la EN 1991-1-3:2003 de la siguiente manera:

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k$$

Donde:

- μ_i es el coeficiente de forma de carga de nieve

Se trata de un tablero horizontal con una inclinación inferior a 30º por lo que se adopta un valor de 0,8

- s_k es el valor característico de la carga de nieve a nivel del terreno que depende de la región climática

Regiones climáticas

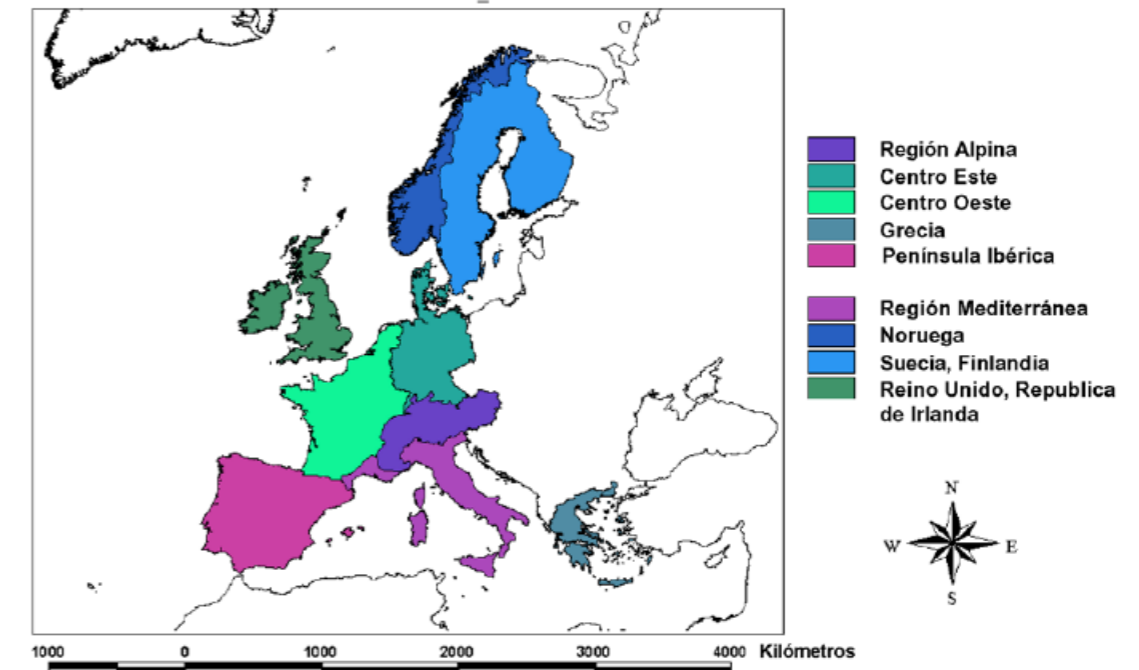


Ilustración 35: Regiones climáticas

Como nos encontramos dentro de la Península Ibérica viene definida por la siguiente expresión:

$$s_k = (0'190 * Z - 0'095) * \left[1 + \left(\frac{A}{524} \right)^2 \right]$$

Siendo:

- A, la altitud sobre el nivel del mar, que según lo estipulado en el estudio topográfico se sitúa a cota 840 msnm
- Z número de zona según:

Península Ibérica: Carga de nieve a nivel del mar

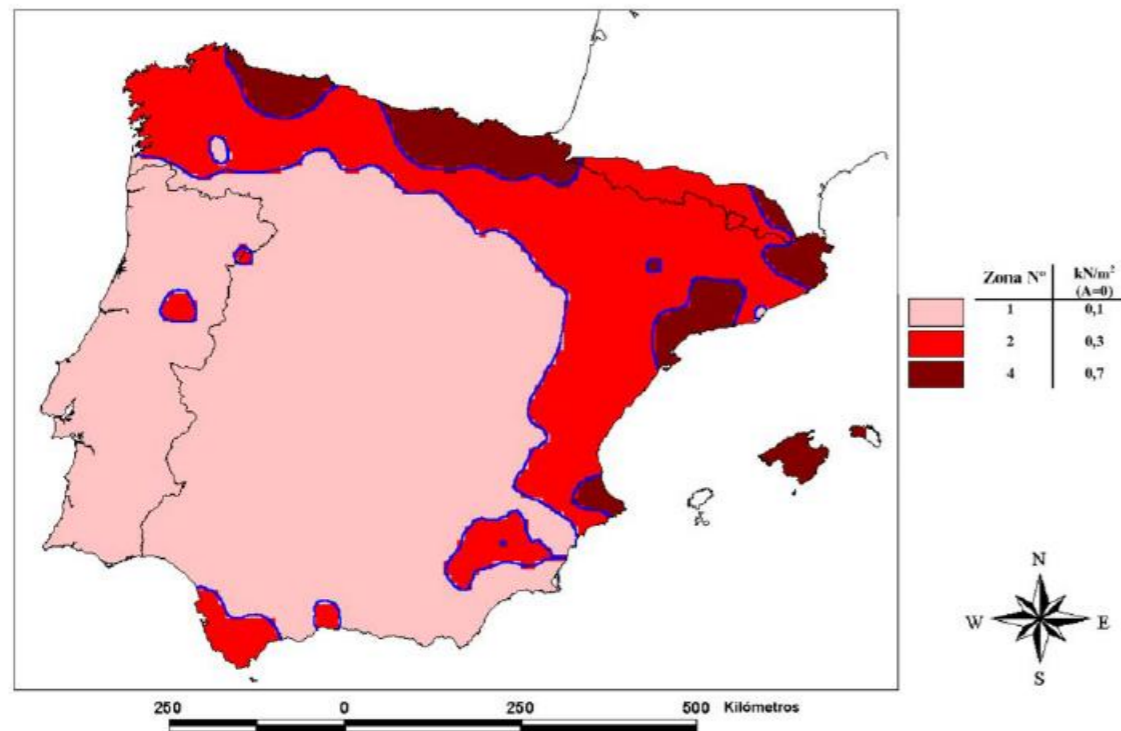


Ilustración 36: Numero de zona

Como se puede observar fácilmente, nuestra zona de actuación se localiza en la Zona nº1, por lo tanto:

$$s_k = (0'190 * 1 - 0'095) * \left[1 + \left(\frac{840}{524} \right)^2 \right] = 0'339 \text{ kN/m}^2 \cong 0'34 \text{ kN/m}^2$$

- **C_e** es el coeficiente de exposición dependiente de la topografía del terreno

La zona estudiada presenta una topografía despejada y expuesta al viento sin elementos de protección, de este modo se escogerá un valor de 0'8.

- **C_t** es el coeficiente térmico que tiene presente la posibilidad de una reducción de la carga de nieve debido a la transmisión de calor.

Este coeficiente se emplea para tener en cuenta la reducción de la carga provocada por la disminución de nieve sobre la estructura por culpa de la elevada transmisión de calor. Como ya es entendido a lo largo del proyecto, la madera es un material que presenta uno de os coeficientes más bajos.

Por lo tanto su valor recomendado por la EN 1991-1-3:2003, es un coeficiente térmico de 1.

De este modo concretamos que el valor de cálculo de la carga de nieve es:

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k = 0'8 * 0'8 * 1 * 0'34 = 0'22 \text{ kN/m}^2$$

6.7.4 Viento

Para la resolución de este cálculo nos basamos en la aplicación de la *norma EN 1991-1-4 "Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones del viento."*

Obtenemos así los valores característicos y básicos a partir de la velocidad del viento o de la presión del mismo. Los valores básicos son aquellos que tienen probabilidades anuales de ser excedidos de 0,02, es decir, se equipara a un periodo de retorno medio de 50 años.

La acción del viento sobre la estructura se representa como un conjunto simplificado de presiones, acciones o fuerzas actuantes sobre las áreas ubicadas en la superficie de la pasarela provocando fuerzas normales a la misma. Existe la posibilidad de que las fuerzas de rozamientos tangenciales afecten notablemente en los momentos en los que el viento barra la estructura. Este equivale a los efectos extremos del viento turbulento.

Esta acción produce fuerzas en las tres direcciones del espacio. Tanto la velocidad como la presión del viento se descomponen en dos componentes, una componente media y una variable.

De este modo se determina la velocidad media del viento a partir de la velocidad básica del viento v_b , la que a su vez depende del clima del lugar, de la variación de la altura del viento obtenida a partir de la rugosidad del terreno y la orografía.

- Velocidad básica:

$$v_b = C_{dir} * C_{season} * v_{b,0}$$

Donde:

- **v_b** es la velocidad básica del viento definida en función de la dirección del viento y la época del año a 10m de altura.
- **v_{b,0}** es el valor fundamental de la velocidad básica del viento.

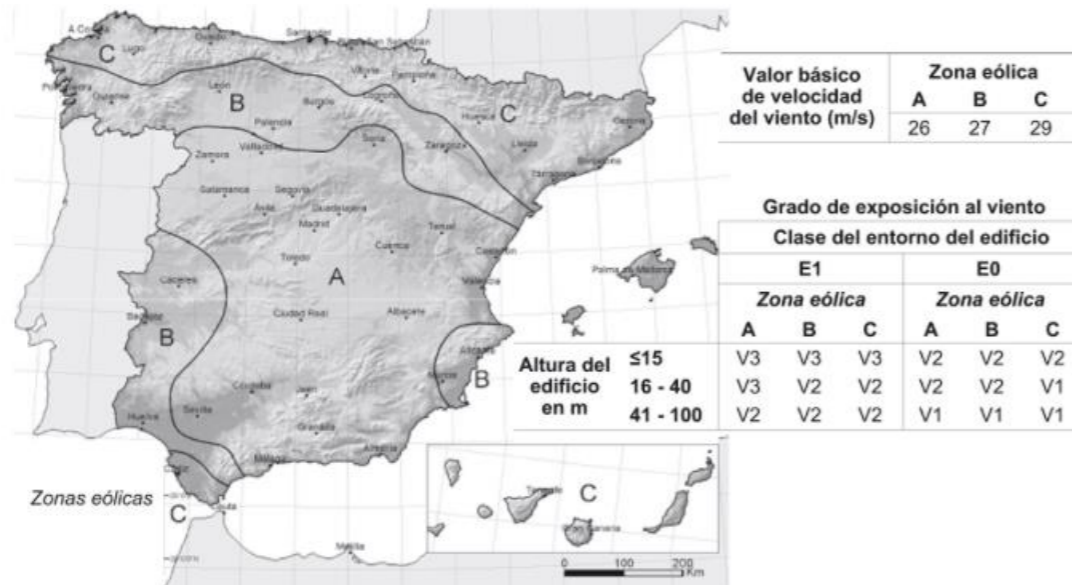


Ilustración 37: Valor fundamental de la velocidad básica del viento

Observando la leyenda del mapa superior escogemos un valor para la provincia de Albacete de 26 m/s.

- C_{dir} es el factor direccional. El valor recomendado es 1.
- C_{season} es el factor estacional. El valor recomendado es 1.

$$v_b = C_{dir} * C_{season} * v_{b,0} = 1 * 1 * 26 = 26 \text{ m/s}$$

- Velocidad media:

La velocidad media del viento $V_m(z)$ a una determinada altura z por encima del terreno, como ya se ha mencionado, depende tanto de la orografía y de la rugosidad del propio terreno de la zona actuación, como de la propia velocidad básica del viento (v_b) ya calculada. La norma EN 1991-1-4 indica que ésta ha de determinarse mediante la siguiente expresión:

$$v_m(z) = C_r(z) * C_o(z) * v_b$$

Donde:

- C_r es el factor de rugosidad correspondiente al terreno, el cual cuenta con la variabilidad de la velocidad media del viento en la localización exacta de la estructura debido a:
 - La altura sobre el nivel del suelo
 - La rugosidad del terreno situado a barlovento de la estructura en la dirección del viento considerada
- C_o es el coeficiente topográfico, que se toma como 1,0 a no ser que se especifique contrario.
- Rugosidad del terreno:

Se define el factor de rugosidad del terreno $C_r(z)$ se define según un perfil logarítmico de velocidades dado por la siguiente expresión:

$$C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$C_r(z) = C_r * (z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min}$$

Siendo así:

- z_0 la longitud de la rugosidad
- k_r factor del terreno, que depende de la longitud de la rugosidad z_0 y calculado utilizando:

$$k_r = 0'19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0'07}$$

Donde:

- $z_{0,II} = 0'05$ ya que la ubicación de la pasarela pertenece a una categoría de terreno tipo II. La cual corresponde con áreas con vegetación baja como hierba o césped y obstáculos aislados como árboles, con separación de al menos 20 veces la altura del obstáculo.

- z_{min} es la altura mínima, que junto con z_0 se define según la tablada situada abajo.
- z_{max} se toma un valor de 200 metros.

CATEGORÍA DE TERRENO		z_0 (m)	z_{min} (m)
0	Mar abierto o zona costera expuesta al mar abierto	0,003	1
I	Lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos	0,01	1
II	Áreas con vegetación baja, como hierbas y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos	0,05	2
III	Áreas con una cobertura de vegetación uniforme o edificación o con obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos (villas, terreno suburbano, bosques permanentes)	0,3	5
IV	Áreas en las que al menos un 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura media supera los 15m	1	10

Tabla 14: Categorías de terreno y parámetros del terreno

Obtenemos los siguientes valores:

$$z_{min} = 2$$

$$z_0 = 0'05$$

$$k_r = 0'19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0'07} = 0'19$$

La pasarela se asienta a una altura media de 7 metros aproximadamente sobre el lechos del río que se produce en las estaciones invernales, otoñales y primaverales, la cual corresponde a la cota mínima de la base del estribo.

$$C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0'19 * \ln\left(\frac{9}{0'05}\right) = 0'987$$

- $C_0(z)$ es el coeficiente topográfico, es cual es iguala la unidad, 1.

De este modo obtenemos un valor de la velocidad media de:

$$v_m(z) = C_r(z) * C_0(z) * v_b = 0'987 * 1 * 26 = 25'65 \text{ m/s}$$

- Turbulencias:

Es importante tener presente la afección de la intensidad de la turbulencia $I_v(z)$, la cual se define a una altura determinada z , como la desviación típica de la turbulencia dividida por la velocidad media del viento.

Se considera con un valor medio nulo la componente turbulenta de la velocidad del viento, y la desviación típica como σ_v . Esta desviación típica se determina a través del empleo de la siguiente ecuación:

$$\sigma_v = k_r * v_b * k_l$$

En este caso, los términos indican:

- k_l es el factor de turbulencia. El valor recomendado es 1,0
- k_r es el factor de terreno, definido anteriormente.

De este modo la desviación típica queda definida:

$$\sigma_v = k_r * v_b * k_l = 0'19 * 26 * 1 = 4'94 \text{ m/s}$$

De este modo se procede a la definición de la Intensidad de la turbulencia mediante:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_l}{c_0(z) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$I_v(z) = I_v * (z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min}$$

Debido a la justificación de la altura a la que se encuentra el tablero, 9 metros, la cual se localiza en un intervalo entre z_{min} y z_{max} , por lo que se determina del siguiente modo:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{4'94}{25'65} = 0'193$$

- Presión correspondiente a la velocidad de pico

En cuanto a lo relativo a la presión del viento asociado a la velocidad de pico, $q_p(z)$, la obtenemos empleando la siguiente expresión:

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2$$

Donde:

- ρ es la densidad del aire, que depende de la altitud, de la temperatura y de la presión barométrica esperada en la región durante las tormentas de viento; en este caso $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$.

El valor 7 que acompaña a la intensidad de turbulencia es el debido a un factor pico de 3,5.

Por lo tanto, el valor de la presión correspondiente a la velocidad de pico será:

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2 = [1 + 7 * 0'193] * \frac{1}{2} * 1'25 * 25'65^2 = 0'967 \text{ kN/m}^2$$

6.7.5 Vehículo de servicio

Según lo establecido por el capítulo 5 correspondiente a la norma UNE-EN-1991-2, se tendrá en cuenta una sobrecarga " Q_{serv} " producida por el paso de un vehículo de servicio. Este vehículo puede ser de emergencia, como una ambulancia o un camión de bomberos, de mantenimiento u de otros servicios.

Para la definición de dicho vehículo de servicio, puede recurrirse al anexo nacional o al propio proyecto completo mismamente. Esto se refiere a:

- Características de este vehículo que conforman el grupo de cargas son:
 - Peso por ejes → oscila entre los 40 y 80 kN
 - Separación de los ejes → deben poseer una distancia máxima de 3 metros
 - Área de contacto de los neumáticos → es de 0'2 metros de lado al nivel del pavimento.
 - Fuerza de frenado asociada al modelo de carga → debe de ser el 60% de la carga vertical.

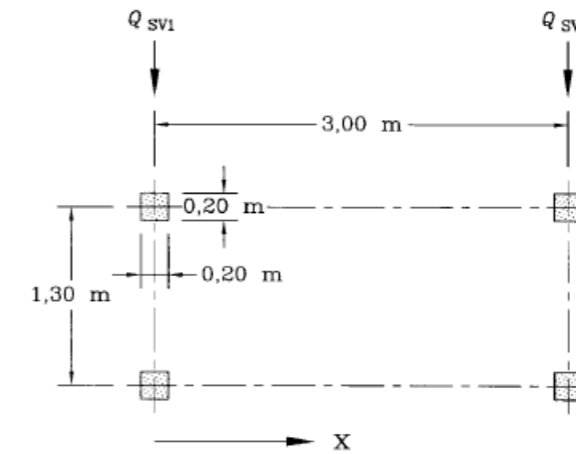


Ilustración 38: Discretización vehículo de emergencia

En relación con la imagen superior:

- $X \rightarrow$ es la dirección del eje del puente
- $Q_{sv1} = 80 \text{ kN}$
- $Q_{sv2} = 40 \text{ kN}$

Esta misma norma estimula tres limitaciones de las cargas puntuales actuantes:

1. Exclusivamente para pasarelas, se debería tener en cuenta una fuerza horizontal Q_{flk} actuando a lo largo del eje del tablero a nivel de la superficie del pavimento.
2. El valor característico de la fuerza horizontal debería ser igual al mayor de los dos valores siguientes:
 - 10% de la carga total correspondiente a la carga uniformemente distribuida
 - 60% del peso total del vehículo de servicio
3. La fuerza horizontal se considera actuando simultáneamente con la correspondiente carga vertical.

De este modo obtenemos los siguientes valores de las cargas:

- Dos cargas verticales puntuales de 40 kN
- Dos cargas verticales puntuales de 20kN
- Dos cargas horizontales puntuales de 24 kN (60% de la carga vertical correspondiente)

- Dos cargas horizontales puntuales de 12 kN (60% de la carga vertical correspondiente)

6.7 Asignación de cargas

6.7.1 Peso Propio

El peso propio correspondiente a la estructura será el asignado automáticamente por el programa SAP2000, el cual tiene en cuenta la densidad de los materiales. Se procede a incrementar un 10% la carga del peso propio de la madera pertinente a elementos como las uniones de la propia pasarela.

El peso propio de la estructura se identificará mediante el empleo del carácter G.

A este se le asignará el peso correspondiente al pavimento (entablillado) de la pasarela, denominado como Qe.

6.7.2 Peatones y ciclistas

Dado que el modelo de nuestra pasarela se compone por sucesivas barras de ancho de 200mm (b), la acción de éstos se traducirá en una carga de sentido gravitatorio por barra cuyo valor es de

$$Q = q_{fk} * b = 4'62 * 0'2 = 0'924 \text{ kN/m}$$

Actúan las cargas que han sido anteriormente calculadas aplicadas sobre todas y cada una de las barras del tablero.

La carga producida por este conjunto de acciones, peatones y ciclistas, se identificará mediante el empleo del carácter Q.

6.7.3 Nieve

Es una carga superficial aplicada como una carga lineal que actúa sobre las barras que componen la celosía. Puesto que dichas barras tienen un ancho de 200 mm, se le asigna una carga a cada barra del tablero de:

$$N = s * b = 0'22 * 0'2 = 0'044 \text{ kN/m}$$

La acción de esta fuerza se reconocerá a través de la letra N.

6.7.4 Viento

Es una carga superficial que se encuentra aplicada sobre cada una de las barras que conforman la celosía, pero únicamente actúa en un sentido y lado de la pasarela, según el ancho a dimensionar. Por lo tanto, para las barras de 200 mm de ancho, el valor de la fuerza actuante será de:

$$W = q_p(z) * b = 0'967 * 0'2 = 0'193 \text{ kN/m}$$

Esta carga se denomina con el uso del carácter W.

6.7.5 Vehículos de servicio

Las cargas provocadas por los vehículos de servicio se aplican de forma similar a cargas puntuales, las cuales han sido descritas anteriormente en la definición de la acción de estos elementos. Es necesario sumar la carga puntual provocada por el cúmulo de nieve ante la máquina quitanieves.

Esta carga se identifica con el empleo de la letra V.

6.7.6 Barandilla

Además de todas las acciones previstas, se va a construir una barandilla de protección adicional a la estructura siguiendo el código CTE-SE Barandillas. Cuando se prevean aglomeraciones de masas de personas se tomará un valor de la fuerza horizontal, de esta acción, del 1'6 kN/m en el borde superior del elemento, sin embargo, en el caso contrario se tomará un valor de 0'8 kN/m.

Se designará con la nomenclatura Q_b.

6.7.7 Acciones sísmicas

Para ello recurrimos a dos normas, el Eurocódigo 8 y la Norma NCSP-07, sin embargo, no contienen ninguna referencia a los puentes y pasarelas de madera, su ámbito de aplicación son los puentes y pasarelas de acero y hormigón.

Atendiendo a la normativa NSCP-07 podemos comprobar que no es necesario realizar comprobaciones sísmicas cuya aceleración sísmica básica horizontal es menor al 4% de la aceleración de la gravedad.

Como la aceleración sísmica básica de la zona de actuación estudiada es inferior a $0'04g$, no será necesario tener en cuenta esta acción, ni incorporarla en el programa de cálculo estructural.

6.7.8 Acción térmica

Es necesario indicar que la madera no sufre contracciones o dilataciones a causa de las variaciones de temperatura, y por lo tanto no se consideran acciones térmicas. Los coeficientes de dilatación de la madera son muy bajos (del orden de 3 a 6 A 10⁶ en la dirección paralela y de 30 a 70 A 10⁶ en la perpendicular), por lo que se puede decir que apenas se dilata.

Realmente la madera laminada encolada como material de construcción es menos peligroso, en relación a la variación de temperatura, de lo que se piensa la gente. Esto se explica mediante la exposición de las siguientes tres razones:

- Su baja conductividad térmica provoca que la temperatura disminuya hacia el interior del material y elemento estructural.
- La carbonización superficial que se produce impide por una parte la salida de gases y por otra la penetración del calor.
- Se considera despreciable su dilatación térmica, por lo que no actúa sobre las estructuras y no les provoca deformaciones.

6.8 Combinación de acciones

Para el cálculo de la estructura se procede a la realización de las siguientes combinaciones de carga:

- COMB 1: 1,35 G
- COMB 2: 1,35 G + 1,5 Q
- COMB 3: 1,35 G + 1,5 N
- COMB 4: 1,35 G + 1,5 W
- COMB 5: 1,35 G + 1,5 V
- COMB 6: 1,35 G + 1,5 Q + 1,5*0,6 W
- COMB 7: 1,35 G + 1,5 Q + 1,5*0,7 N
- COMB 8 : 1,35 G + 1,5 N+ 1,5*0,6 W
- COMB 9: 1,35 G + 1,5 W + 1,5*0,7 Q
- COMB 10: 1,35 G + 1,5 W+ 1,5*0,7 N
- COMB 11: 1,35 G +1,5 W + 1,5*0,7 V
- COMB 12: 1,35 G +1,5 Q + 1,5*0,7 V

6.9 Uniones

Los encuentros entre vigas de madera, las uniones, son puntos singulares de la estructura. Es por esto por lo que reciben un tratamiento especial dentro del conjunto de la estructura. En caso de que alguna de las uniones de la estructura fallase, podría producir el colapso total de la estructura.

Tienen una gran influencia en la estructura, tanto a nivel estructural, como a nivel económico, ya que pueden llegar a representar entre un 20% y un 25% del coste total de la estructura

6.9.1 Tipos de uniones

Según la disposición de los elementos a unir se distinguen tres tipos:

- Empalmes: Los elementos se enlazan por sus testas.
- Ensamblados: Los elementos se enlazan formando un ángulo entre sí.
- Acoplamientos: Los elementos se unen superponiendo sus caras.



Ilustración 39: Empalme, ensamble y acoplamiento

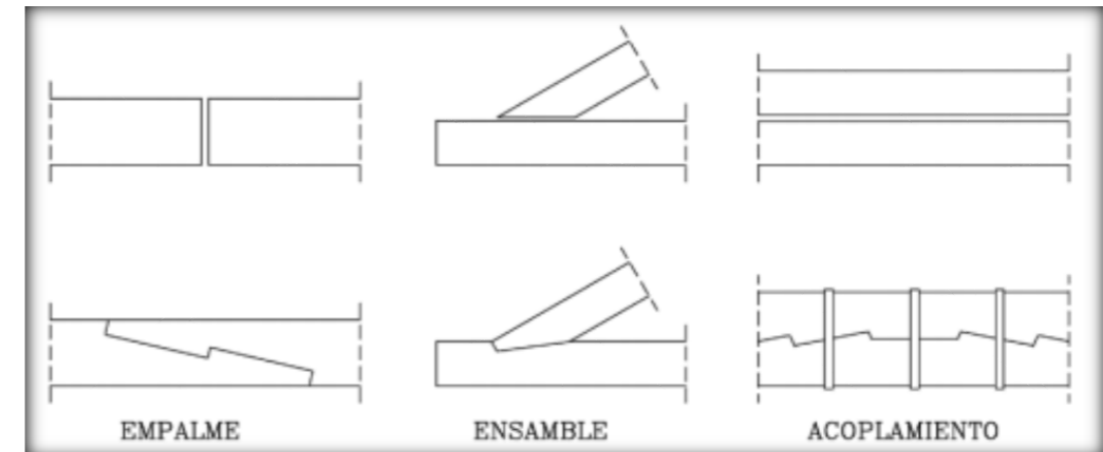


Ilustración 40: Empalme, ensamble y acoplamiento

Según su medio de unión, se distinguen los siguientes tipos:

- Uniones carpinteras o tradicionales: Los elementos se unen mediante un trabajo de carpintería mecanizado en el que se reduce el aporte de otros materiales féreos (rebajes, rozas, “caja y espiga”, esperas, etc.). el empleo de estas uniones requiere amplias tallas o rebajes, reduciendo de este modo ambas secciones, lo que obligaría a sobredimensionar a causa de los puntos nuevos de debilidad aparecidos. Suelen ser una solución poco económica, condicionada a la estética y aspecto de la propia estructura.

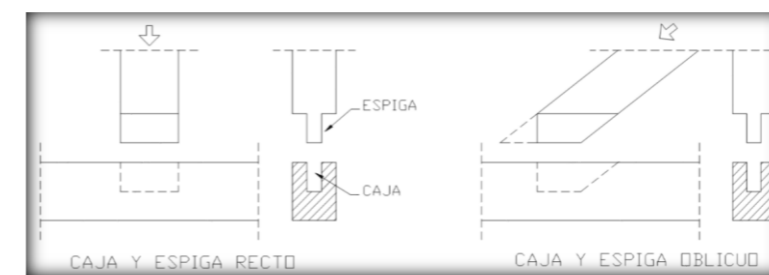
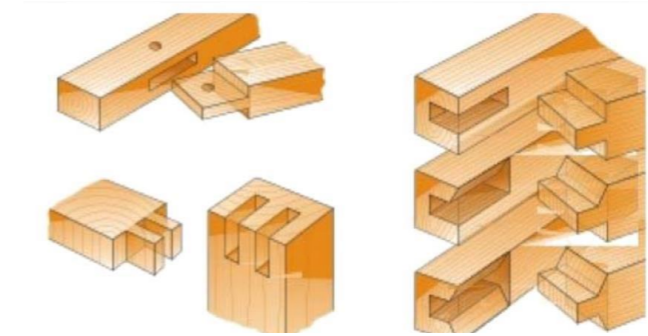


Ilustración 41: Ensamble de caja y espiga.

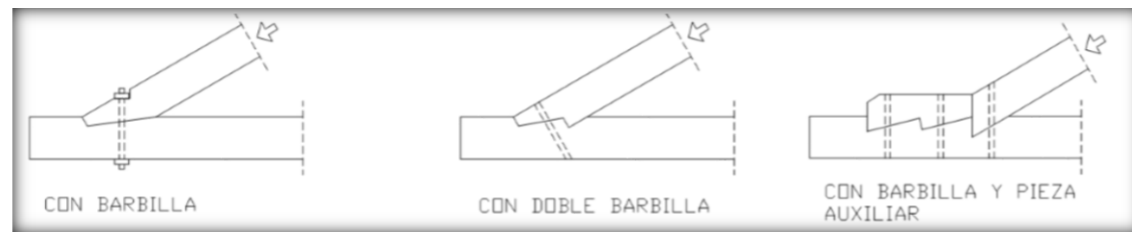
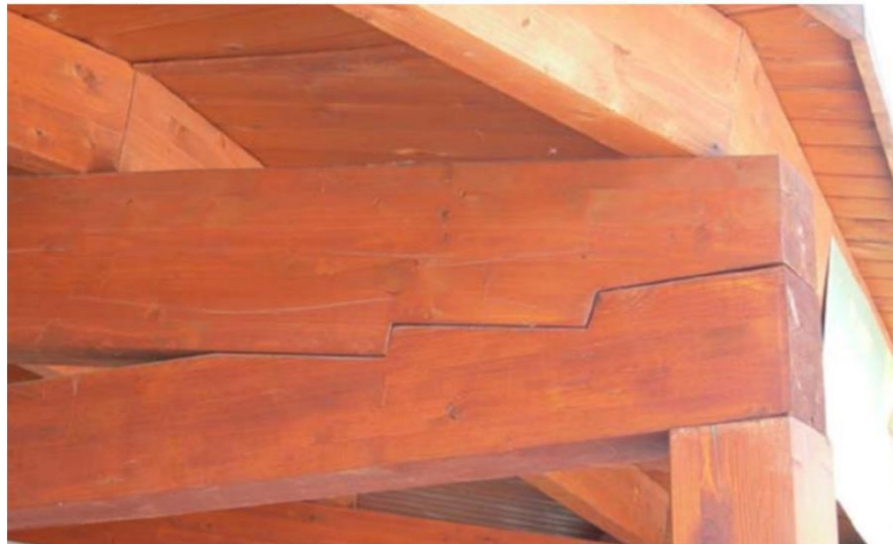


Ilustración 42: Detalle real de encuentro de par con tirante. Ensamble mediante embarbillado doble.

Este tipo de uniones han quedado, prácticamente en desuso, sustituidas por las mecánicas, a causa de sus comprobaciones de resistencia mecánica, las cuales se realizan con los procedimientos de comprobación de tensiones de compresión localizada y de tensiones tangenciales. Es por este motivo que se encuentran pocas normas que incluyan sus cálculos.

- **Uniones mecánicas:** Los elementos se unen mediante herrajes, elementos metálicos (pernos, chapas planas, dentadas o angulares, ver ilustración), para la trasmisión de esfuerzos. Dentro de estas, encontramos las clavijas, cuando la superficie de transmisión es menor (elementos de unión esbeltos tales como tornillos, pernos, clavos, etc.).

Las uniones tipo clavija tienen la posibilidad de resistir esfuerzos laterales, es decir, carga de cortante, produciéndose esfuerzos de flexión y cortadura en el vástago. Otros están sometidos ocasionalmente a esfuerzos axiales. Existen otros tipos de elementos de fijación de tipo clavija como son los tirafondos de doble rosca o de rosca completa.

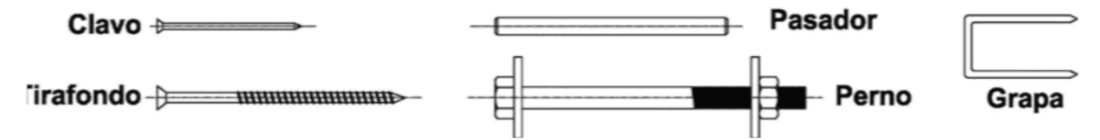


Ilustración 43: Diferentes clavijas. Fuente: Maderia.

Y de conectores y placas, tienen una superficie de transmisión mayor (elementos de unión planos, como placas, anillos, etc.). Un conector es un elemento de fijación con forma de placa con resaltes, placa dentada o anillo que se introduce ajustado entre dos piezas de madera y se afianza mediante un perno que atraviesa las piezas. Encontramos conectores tipo anillo, tipo placa, placa dentada, de madera.

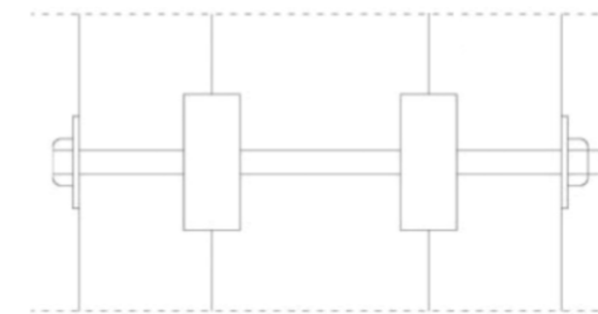


Ilustración 44: Unión con conectores tipo anillo. Fuente:

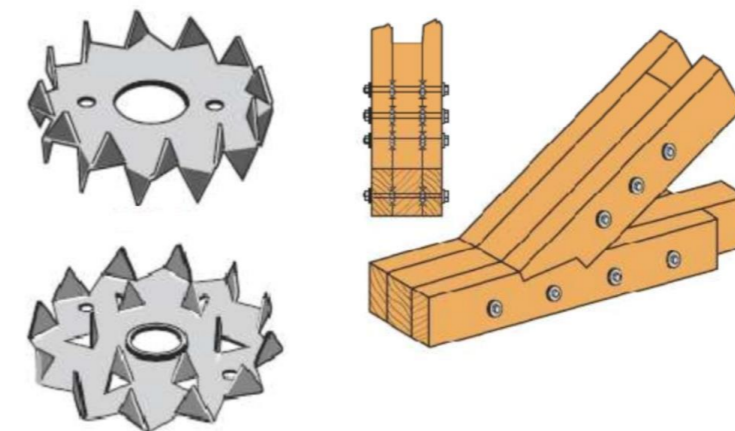


Ilustración 45: Conectores dentados de púas.

- **Uniones adhesivas o encoladas:** Los elementos se enlazan a través de la utilización de diversos adhesivos entre los elementos de la estructura. Por un lado se encuentran las uniones de barras encoladas, es decir, aquellas que consisten en una inserción de

barras en la testa de las piezas de madera mediante el empleo de un adhesivo. Estas barras están sometidas a esfuerzos axiales.



Ilustración 47: Barra de acero con toda la superficie roscada.

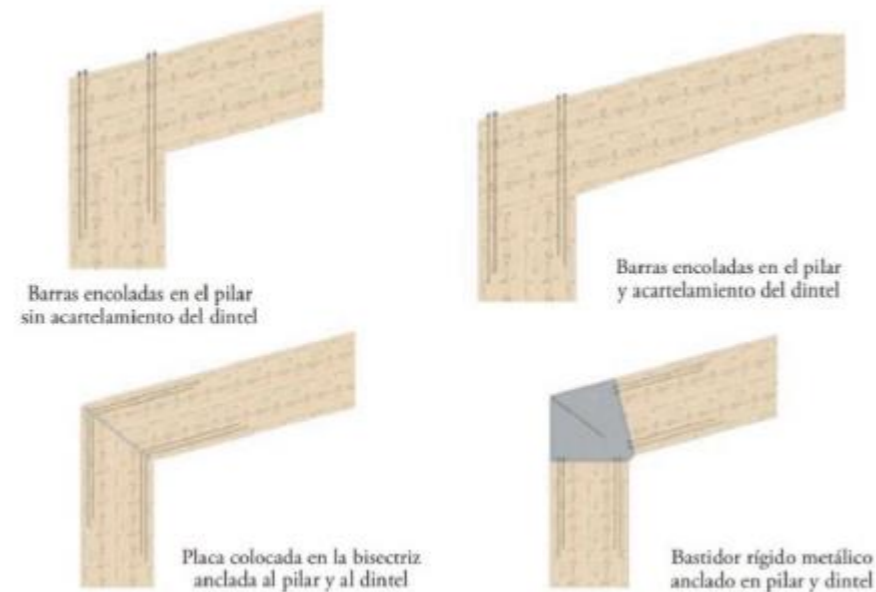


Ilustración 47: Nudos de esquina con barras encoladas de pórticos a dos aguas.

Por otro lado, están las uniones encoladas de transmisión directa, obtenidas mediante empalmes integrales dentados entre los elementos de madera. Suele ejecutarse a través de una entalladura múltiple. Cuanto menor es el ángulo que se crea entre la dirección de las fibras con la normal al plano del empalme, la capacidad resistente aumenta de forma proporcional.

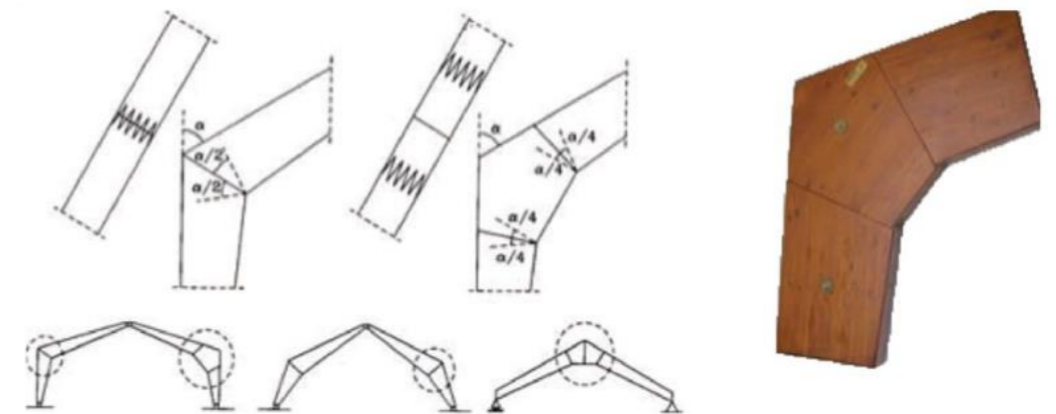


Ilustración 48: Nudos de esquina encolados de pórticos a dos aguas.

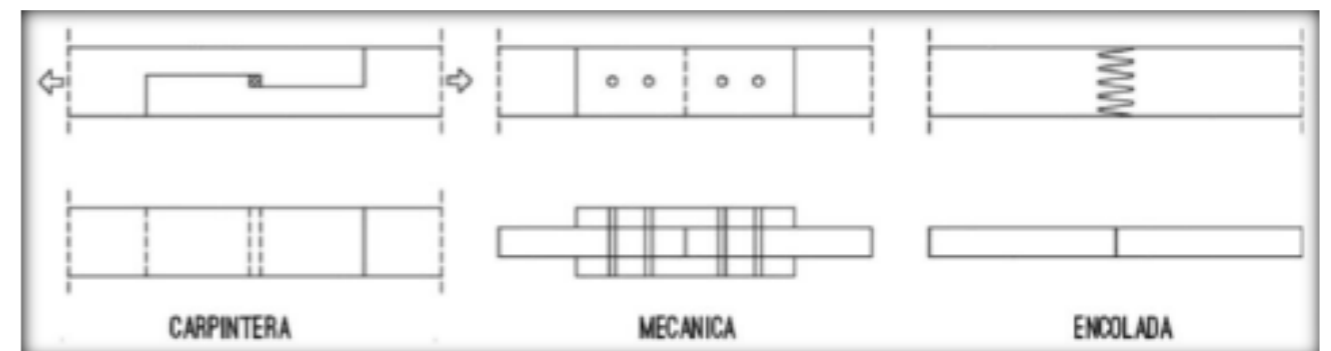


Ilustración 49: Uniones carpinteras, mecánicas y encoladas.

Dentro de estas clasificaciones, por supuesto, los métodos de unión son innumerables, pues aún a día de hoy se siguen diseñando nuevos tipos de unión en madera.

En el caso específico de las uniones de estructuras de madera es común el uso de uniones metálicas, por su flexibilidad, permitiendo un deslizamiento de las piezas, despreciable al cálculo.

6.9.2 Diseño de las uniones

Nuestro análisis tendrá su base en las fijaciones mecánicas tipo pernos, por motivos de comodidad y simplicidad de mantenimiento, de construcción y de remplazo por resistencia. Para el análisis y

comprobación de estos elementos, ha de tenerse en cuenta tanto el deslizamiento entre las propias uniones con su coeficiente (k_{ser}), como la propia rigidez de la unión.

6.9.3 Cálculo de las uniones

Para el cálculo de las uniones se utiliza el módulo de elasticidad de cada material, E_{mean} , y también, el módulo de deslizamiento del medio de la unión, K_{ser} .

TIPO DE ELEMENTO DE FIJACIÓN	K_{ser}
Pasadores	$p^{1,5}_m * d / 23$
Pernos con o sin holgura	
Tirafondos	
Clavos con pretaladro	$p^{1,5}_m * d^{0,8} / 30$
Clavos sin pretaladro	
Grapas	$p^{1,5}_m * d^{0,8} / 80$
Conectores de anillo tipo A	$P_m * d_c / 2$
Conectores de anillo tipo B	
Conectores de placa dentada	
Conectores tipos C1 a C9	$1,5 * P_m * d_c / 4$
Conectores tipo C10 y C11	$P_m * d_c / 2$

Tabla 15: Cálculo de K_{ser}

En donde

- P_m es la densidad media de la madera medida en Kg/m³
- d_c es el diámetro del conector en mm
- d es el diámetro de la clavija

6.10 Resultado del análisis y descripción de la pasarela

Para el desarrollo del cálculo y dimensionamiento de la pasarela se emplea el software SAP2000, versión 19. Es un programa de estructuras, el cual contempla las normas nacionales, y algunas internacionales, de aplicación vigente tanto para el dimensionamiento como para la comprobación de hormigón, de acero laminado, acero armado, acero conformado, mixtas y de madera. Todas estas estructuras pueden verse sometidas acciones gravitatorias, sismos, viento y nieve. Se emplea el modelo 3D de trabajo, dentro del propio programa SAP2000 v.19.

Se realiza un estudio y análisis detallado del software para comprender, entender y manejar los criterios de éste para un dimensionamiento exhaustivo de los perfiles de madera.

Este recurso no tiene la madera definida como material estructural, por lo que será necesario definirla previamente a la realización del esquema estructural de la pasarela.

Más abajo se realiza un estudio y análisis de todas las comprobaciones llevadas a cabo para el dimensionamiento de las piezas de madera.

De este modo se procede a un guión y una definición de los esfuerzos resistidos y datos obtenidos a partir del programa.

De este modo se contempla, que para una sección sometida a una tensión que sigue la dirección principal, SAP2000 cumple con todos los requisitos establecidos por la normativa Eurocódigo 5.

Como un ejemplo, a continuación, se ejemplifica el procedimiento llevado a cabo para una de las barras de la celosía, con cada uno de los coeficientes y valores de cálculo correspondientes.

BARRA 29													
PERFIL: V - 300 x 200													
Material: Madera (GL32h)													
	NUDOS		LONGITUD (m)	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS									
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y (cm ⁴) (1)	I _z (cm ⁴) (1)	I _t (cm ⁴) (2)						
	N 13	N 15	1,48	600	45000	20000	47040						
	Notas:												
	(1) Inercia respecto al eje indicado												
	(2) Momento de inercia a torsión uniforme												
	Pandeo		Pandeo lateral		Módulo resistente elástico								
	Plano XY	Plano XZ	Ala superior	Ala inferior	W _{el,y} (cm ³)	W _{el,z} (cm ³)	W _{tor,y} (cm ³)	W _{tor,z} (cm ³)					
	β	1	1	0	0	2000	4284	2856					
	L _k	1,48	1,48	0	0								
C ₁			1										
Notación:													
β: Coeficiente de pandeo													
L _k : Longitud de pandeo (m)													
C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico													
Situación de incendio													
Resistencia requerida: R30													
Superficies protegidas por tableros derivados de la madera													
Valores del coeficiente de aprovechamiento (η)													
Barra	COMPROBACIONES (EUROCÓDIGO 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008) - TEMPERATURA AMBIENTE											Estado	
	Nt,0,d	Nc,0,d	My,d	Mz,d	Vy,d	Vz,d	Mx,d	My,d Mz,d	Nt,0,d My,d Mz,d	Nc,0,d My,d Mz,d	Mx,d Vy,d Vz,d		
29	1,82692258	N.P.	1,48963801	1,177201705	0,00568388	3,73134328	18,8763133	0,59120746	1,958216454	N.P.	7,91653859	η= 7,917	
Comprobaciones que no proceden (N.P.):													
(1) La comprobación no procede, ya que no hay axil de compresión.													
(2) La comprobación no procede, ya que la barra no está sometida a flexión y compresión combinadas.													
Notación:													
N _{t,0,d} : Resistencia a tracción uniforme paralela a la fibra													
N _{c,0,d} : Resistencia a compresión uniforme paralela a la fibra													
M _{y,d} : Resistencia a flexión en el eje y													
M _{z,d} : Resistencia a flexión en el eje z													
V _{y,d} : Resistencia a cortante en el eje y													
V _{z,d} : Resistencia a cortante en el eje z													
M _{x,d} : Resistencia a torsión													
M _{y,d} M _{z,d} : Resistencia a flexión esviada													
N _{t,0,d} M _{y,d} M _{z,d} : Resistencia a flexión y tracción axial combinadas													
N _{c,0,d} M _{y,d} M _{z,d} : Resistencia a flexión y compresión axial combinadas													
M _{x,d} V _{y,d} V _{z,d} : Resistencia a cortante y torsor combinados													
x: Distancia al origen de la barra													
η: Coeficiente de aprovechamiento (%)													
N.P.: No procede													

Resistencia a tracción uniforme paralela a la fibra - Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.2)

Para ello se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1$$

$$\eta = 0,01826923 = 1,827 \% \rightarrow \text{SE CUMPLE}$$

El esfuerzo solicitante de cálculo más desfavorable se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·Q+1.05·V, en el nudo N15.

Donde:

σ_{t,0,d}: Tensión de cálculo a tracción paralela a la fibra, dada por:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{t,0,d}}{A}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{116,308 * 100}{60000} = 0,194$$

Donde:

N_{t,0,d}: Tracción axial de cálculo paralela a la fibra

A: Área de la sección transversal

f_{t,0,d}: Resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra, dada por:

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \times k_h \times f_{t,0,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{0,55 \times 1,0718 \times 22,5}{1,25} = 10,611 \text{ MPa}$$

Donde:

k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga (Larga duración) y el contenido de humedad (Clase de servicio 3)

$$K_{mod} = 0,65$$

k_h : Factor de altura, dado por:

Para cantos (flexión) o anchos (tracción) de piezas rectangulares de madera laminada encolada inferiores a 600 mm:

$$k_h = \min\left\{\left(\frac{600}{h}\right)^{0,1}; 1,1\right\}$$

$$k_h = \min\{1,0718; 1,1\} = 1,0718$$

Donde:

h : Canto en flexión o mayor dimensión de la sección en tracción

$$h = 300 \text{ mm}$$

$f_{t,0,k}$: Resistencia característica a tracción paralela a la fibra

$$f_{t,0,k} = 22,5 \text{ MPa}$$

γ_M : Coeficiente parcial para las propiedades del material

$$\gamma_M = 1,25$$

Resistencia a compresión uniforme paralela a la fibra - Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.4 - 6.3.2)

La comprobación a compresión uniforme paralela a la fibra neutra no procede llevarla a cabo, ya que no existe axil de compresión.

Resistencia a flexión en el eje y - Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6 - 6.3.3)

Para ello debe satisfacerse que:

$$\eta = \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\eta = \frac{0,2657}{15,091} = 0,0149 \leq 1$$

El esfuerzo solicitante de cálculo más desfavorable se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·Q+1.05·V.

No se comprueba la resistencia a vuelco lateral, debido a que la longitud de pandeo correspondiente es nula.

Resistencia de la sección transversal a flexión:

$\sigma_{m,d}$: Tensión de cálculo a flexión, dada por:

$$\sigma_{m,d} = \frac{|M_d|}{W_{el}}$$

$$\sigma_{m,y,d}^+ = \frac{0,797 \times 1000}{3000} = 0,2657 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d}^- = 0 \text{ MPa}$$

Donde:

M_d : Momento flector de cálculo

$$M_{y,d}^+ = 0,797 \text{ kNm}$$

$$M_{y,d}^- = 0 \text{ kNm}$$

W_{el} : Módulo resistente elástico de la sección transversal

$$W_{el,y} = 3000 \text{ cm}^3$$

$f_{m,d}$: Resistencia de cálculo a flexión, dada por:

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \times k_h \times f_{m,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{m,y,d}^+ = \frac{0,65 \times 1,0718 \times 32}{1,25} = 17,834 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d}^- = \frac{0,5 \times 1,0718 \times 32}{1,25} = 13,7187 \text{ MPa}$$

Donde:

k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga (Larga duración) y el contenido de humedad (Clase de servicio 3)

Clase de duración de la carga:

Clase⁺: Media duración

$$K_{mod}^+ = 0,65$$

Clase⁻: Permanente

$$K_{mod}^- = 0,5$$

$f_{m,k}$: Resistencia característica a flexión

$$f_{m,k} = 32 \text{ MPa}$$

k_h : Factor de altura, dado por:

Para cantos (flexión) o anchos (tracción) de piezas rectangulares de madera laminada encolada inferiores a 600 mm:

$$k_h = \min\left\{\left(\frac{600}{h}\right)^{0,1}; 1,1\right\}$$

$$k_h = \min\{1,0718; 1,1\} = 1,0718$$

Donde:

h: Canto en flexión o mayor dimensión de la sección en tracción

$$h = 300 \text{ mm}$$

γ_M : Coeficiente parcial para las propiedades del material

$$\gamma_M = 1,25$$

Resistencia a flexión en el eje z - Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6 - 6.3.3)

Se debe satisfacer que:

$$\eta = \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1.052 m del nudo N11, para la combinación de acciones 5: 1,35 G +1,5 V

No se comprueba la resistencia a vuelco lateral, ya que el módulo resistente elástico de la sección respecto al eje z es inferior o igual al módulo resistente elástico respecto al eje y.

Resistencia de la sección transversal a flexión:

$\sigma_{m,d}$: Tensión de cálculo a flexión, dada por:

$$\sigma_{m,d} = \frac{|M_d|}{W_{el}}$$

$$\sigma_{m,z,d}^+ = \frac{-0,0962 \times 1000}{2000} = 0,0481 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d}^- = \frac{0,3315 \times 1000}{2000} = 0,165 \text{ MPa}$$

Donde:

M_d: Momento flector de cálculo

$$M_{z,d}^+ = -0,0962 \text{ kNm}$$

$$M_{z,d}^- = 0,3315 \text{ kNm}$$

W_{el}: Módulo resistente elástico de la sección transversal

$$W_{el,z} = 2000 \text{ cm}^3$$

$f_{m,d}$: Resistencia de cálculo a flexión, dada por:

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \times k_h \times f_{m,k}}{\gamma_M}$$
$$f_{m,z,d}^+ = \frac{0,7 \times 1,1 \times 32}{1,25} = 19,712 \text{ MPa}$$
$$f_{m,z,d}^- = \frac{0,5 \times 1,1 \times 32}{1,25} = 14,08 \text{ MPa}$$

Donde:

k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga (Larga duración) y el contenido de humedad (Clase de servicio 3)

Clase de duración de la carga:

Clase⁺: Corta duración

$$K_{mod}^+ = 0,7$$

Clase⁻: Permanente

$$K_{mod}^- = 0,5$$

$f_{m,k}$: Resistencia característica a flexión

$$f_{m,k} = 32 \text{ MPa}$$

k_h : Factor de altura, dado por:

Para cantos (flexión) o anchos (tracción) de piezas rectangulares de madera laminada encolada inferiores a 600 mm:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}; 1,1 \right\}$$

$$k_h = \min \{ 1,0718; 1,1 \} = 1,1$$

Donde:

h : Canto en flexión o mayor dimensión de la sección en tracción

$$h = 200 \text{ mm}$$

γ_M : Coeficiente parcial para las propiedades del material

$$\gamma_M = 1,25$$

Resistencia a cortante en el eje y- Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7)

Debe satisfacerse que:

$$\eta = \frac{\tau_{y,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\eta = \frac{0,011}{1,976} = 0,006 \leq 1$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N13, para la combinación de acciones 5: 1,35 G +1,5 V

Donde:

τ_d : Tensión de cálculo a cortante, dada por:

$$\tau_d = \frac{|V_d|}{k_{cr}} \times \frac{3}{2}$$

$$\tau_d = \frac{0,301}{0,67} \times \frac{3}{2} = 0,011$$

Donde:

V_d : Cortante de cálculo

A : Área de la sección transversal

k_{cr} : Factor que tiene en cuenta la influencia de las fendas

$f_{v,d}$: Resistencia de cálculo a cortante, dada por:

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \times f_{v,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{v,d} = \frac{0,65 \times 3,8}{1,25} = 1,976 \text{ MPa}$$

Donde:

k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga y el contenido de humedad (Clase de servicio 3)

Clase de duración de la carga:

Clase: Media duración

$$K_{mod} = 0,65$$

$f_{v,k}$: Resistencia característica a cortante

$$f_{v,k} = 3,8 \text{ MPa}$$

γ_M : Coeficiente parcial para las propiedades del material

$$\gamma_M = 1,25$$

Resistencia a cortante en el eje z- Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7)

Debe satisfacerse que:

$$\eta = \frac{\tau_{y,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\eta = \frac{0,011}{1,976} = 0,006 \leq 1$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N13, para la combinación de acciones 5: 1,35 G +1,5 V

Donde:

τ_d : Tensión de cálculo a cortante, dada por:

$$\tau_d = \frac{|V_d|}{k_{cr}} \times \frac{3}{2}$$

$$\tau_d = \frac{0,301}{0,67} \times \frac{3}{2} = 0,011$$

Donde:

V_d : Cortante de cálculo

$$V_d = 0,074 \text{ kN}$$

A : Área de la sección transversal

$$A = 600 \text{ cm}^2$$

k_{cr} : Factor que tiene en cuenta la influencia de las fendas

$$k_{cr} = 0,67$$

$f_{v,d}$: Resistencia de cálculo a cortante, dada por:

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \times f_{v,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{v,d} = \frac{0,65 \times 3,8}{1,25} = 1,976 \text{ MPa}$$

Donde:

k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga y el contenido de humedad (Clase de servicio 3)

Clase de duración de la carga:

Clase: Media duración

$$K_{mod} = 0,65$$

$f_{v,k}$: Resistencia característica a cortante

$$f_{v,k} = 3,8 \text{ MPa}$$

γ_M : Coeficiente parcial para las propiedades del material

$$\gamma_M = 1,25$$

Resistencia a torsión - Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.8)

Debe satisfacerse que:

$$\eta = \frac{\tau_{\text{tor,d}}}{k_{\text{shape}} \times f_{v,d}} \leq 1$$

$$\eta = \frac{0,38663}{1,225 \times 1,672} = 0,1888 \leq 1$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N13, para la combinación de acciones 5: 1,35 G +1,5 V

Donde:

$\tau_{\text{tor,d}}$: Tensión de cálculo a torsión, dada por:

$$\tau_{\text{tor,d}} = \frac{|M_{x,d}|}{W_{\text{tor}}}$$

$$\tau_{\text{tor,d}} = \frac{|-1,1042| \times 1000}{2856} = 0,3866 \text{ MPa}$$

Donde:

$M_{x,d}$: Momento torsor de cálculo

W_{tor} : Modulo resistente a torsión

k_{shape} : Factor cuyo valor depende del tipo de sección

$$K_{\text{shape}} = \min \left\{ 2,0 ; 1 + 0,15 \times \frac{b_{\text{max}}}{b_{\text{min}}} \right\}$$

$$K_{\text{shape}} = 1,225$$

Donde:

b_{max} : Ancho mayor de la sección transversal

$$b_{\text{max}} = 300 \text{ mm}$$

b_{min} : Ancho menor de la sección transversal

$$b_{\text{min}} = 200 \text{ mm}$$

$f_{v,d}$: Resistencia de cálculo a cortante, dada por:

$$f_{v,d} = \frac{k_{\text{mod}} \times f_{v,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{v,d} = \frac{0,55 \times 3,8}{1,25}$$

Donde:

k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga y el contenido de humedad (Clase de servicio 3)

Clase de duración de la carga:

Clase: Larga duración

$$K_{\text{mod}} = 0,55$$

$f_{v,k}$: Resistencia característica a cortante

$$f_{v,k} = 3,8 \text{ MPa}$$

γ_M : Coeficiente parcial para las propiedades del material

$$\gamma_M = 1,25$$

Resistencia a flexión esviada - Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6)

Se debe satisfacer que:

$$\eta = \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\eta = 0,0049 \leq 1$$

$$\eta = k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\eta = 0,0059 \leq 1$$

El esfuerzo solicitante de cálculo más desfavorable se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·Q+1.05·V, en el nudo N15.

Donde:

$\sigma_{m,d}$: Tensión de cálculo a flexión, dada por:

$$\sigma_{m,d} = \frac{|M_d|}{W_{el}}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{|-0,0784| \times 1000}{2000} = 0,0258 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{0,2859 \times 1000}{2000} = 0,0953 \text{ MPa}$$

Donde:

M_d : Momento flector de cálculo

$$M_{z,d} = 0,2859 \text{ kNm}$$

$$M_{y,d} = 0,0148 \text{ kNm}$$

W_{el} : Módulo resistente elástico de la sección transversal

$$W_{el,y} = 3000 \text{ cm}^3$$

$$W_{el,z} = 2000 \text{ cm}^3$$

$f_{m,d}$: Resistencia de cálculo a flexión, dada por:

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \times k_h \times f_{m,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{0,55 \times 1,0718 \times 32}{1,25} = 17,834 \text{ MPa}$$

$$f_{m,z,d} = \frac{0,55 \times 1,1 \times 32}{1,25} = 19,712 \text{ MPa}$$

Donde:

k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga y el contenido de humedad (Clase de servicio 3)

Clase: Larga duración

$$K_{mod} = 0,55$$

$f_{m,k}$: Resistencia característica a flexión

$$f_{m,k} = 32 \text{ MPa}$$

k_h : Factor de altura, dado por:

Para cantos (flexión) o anchos (tracción) de piezas rectangulares de madera laminada encolada inferiores a 600 mm:

$$k_h = \min\left\{\left(\frac{600}{h}\right)^{0,1}; 1,1\right\}$$

$$k_{hy} = \min\{1,0718; 1,1\} = 1,0718$$

$$k_{hz} = \min\{1,12; 1,1\} = 1,1$$

Donde:

h : Canto en flexión o mayor dimensión de la sección en tracción

$$h_y = 300 \text{ mm}$$

$$h_z = 200 \text{ mm}$$

γ_M : Coeficiente parcial para las propiedades del material

$$\gamma_M = 1,25$$

Resistencia a flexión y tracción axial combinadas- Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.2.3)

Se debe satisfacer que:

$$\eta = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\eta = 0,0184 \leq 1$$

$$\eta = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\eta = 0,02 \leq 1$$

El esfuerzo solicitante de cálculo más desfavorable se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·Q+1.05·V, en el nudo N15.

Donde:

$\sigma_{t,0,d}$: Tensión de cálculo a tracción paralela a la fibra, dada por:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{t,0,d}}{A}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{116,308 \cdot 100}{60000} = 0,194$$

Donde:

$N_{t,0,d}$: Tracción axial de cálculo paralela a la fibra

A : Área de la sección transversal

$\sigma_{m,d}$: Tensión de cálculo a flexión, dada por:

$$\sigma_{m,d} = \frac{|M_d|}{W_{el}}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{|-0,0784| \times 1000}{2000} = 0,0258 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{0,0922 \times 1000}{2000} = 0,0461 \text{ MPa}$$

Donde:

M_d : Momento flector de cálculo

$$M_{z,d} = -0,0784 \text{ kNm}$$

$$M_{y,d} = 0,0922 \text{ kNm}$$

W_{el} : Módulo resistente elástico de la sección transversal

$$W_{el,y} = 3000 \text{ cm}^3$$

$$W_{el,z} = 2000 \text{ cm}^3$$

$f_{t,0,d}$: Resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra, dada por:

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \times k_h \times f_{t,0,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{0,55 \times 1,0718 \times 22,5}{1,25} = 10,611 \text{ MPa}$$

Donde:

k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga (Larga duración) y el contenido de humedad (Clase de servicio 3)

$$K_{mod} = 0,55$$

k_h : Factor de altura, dado por:

Para cantos (flexión) o anchos (tracción) de piezas rectangulares de madera laminada encolada inferiores a 600 mm:

$$k_h = \min\left\{\left(\frac{600}{h}\right)^{0,1}; 1,1\right\}$$

$$k_h = \min\{1,0718; 1,1\} = 1,0718$$

Donde:

h : Canto en flexión o mayor dimensión de la sección en tracción

$$h = 300 \text{ mm}$$

$f_{t,0,k}$: Resistencia característica a tracción paralela a la fibra

$$f_{t,0,k} = 22,5 \text{ MPa}$$

γ_M : Coeficiente parcial para las propiedades del material

$$\gamma_M = 1,25$$

K_m : Factor que tiene en cuenta el efecto de redistribución de tensiones bajo flexión esviada y la falta de homogeneidad del material en la sección transversal

$$K_m = 0,7$$

Resistencia a flexión y compresión axial combinadas- Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.2.4)

Esta comprobación es procedente, debido a que la barra no está sometida a flexión y compresión combinadas.

Resistencia a cortante y torsor combinados- Temperatura ambiente

(Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.8)

Se debe satisfacer que:

$$\eta = \frac{\tau_{y,d}}{f_{v,d}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape} \times f_{v,d}} \leq 1$$

$$\eta = 0,16203 \leq 1$$

$$\eta = \frac{\tau_{z,d}}{f_{v,d}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape} \times f_{v,d}} \leq 1$$

$$\eta = 0,1597 \leq 1$$

El esfuerzo solicitante de cálculo más desfavorable se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·Q+1.05·V, en el nudo N15.

Donde:

τ_d : Tensión de cálculo a cortante, dada por:

$$\tau_d = \frac{|V_d|}{k_{cr}} \times \frac{3}{2}$$

$$\tau_{y,d} = 0,00456 \text{ MPa}$$

$$\tau_{z,d} = 0,00105 \text{ MPa}$$

Donde:

V_d : Cortante de cálculo

$$V_{y,d} = -0,272 \text{ kN}$$

$$V_{z,d} = -0,063 \text{ kN}$$

A : Área de la sección transversal

$$A = 600 \text{ cm}^2$$

k_{cr} : Factor que tiene en cuenta la influencia de las fendas

$$k_{cr} = 0,67$$

$\tau_{tor,d}$: Tensión de cálculo a torsión, dada por:

$$\tau_{tor,d} = \frac{|M_{x,d}|}{W_{tor}}$$

$$\tau_{tor,y} = \frac{|-0,797| \times 1000}{4284} = 0,186 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,z} = \frac{|-0,797| \times 1000}{2856} = 0,3866 \text{ MPa}$$

Donde:

$M_{x,d}$: Momento torsor de cálculo

$$M_{x,d} = -0,797 \text{ kNm}$$

W_{tor} : Modulo resistente a torsión

$$W_{tor,y} = 4284 \text{ cm}^3$$

$$W_{tor,z} = 2856 \text{ cm}^3$$

k_{shape} : Factor cuyo valor depende del tipo de sección

$$K_{shape} = \min \left\{ 2,0 ; 1 + 0,15 \times \frac{b_{max}}{b_{min}} \right\}$$

$$K_{shape} = 1,225$$

Donde:

b_{max} : Ancho mayor de la sección transversal

$$b_{max} = 300 \text{ mm}$$

b_{min} : Ancho menor de la sección transversal

$$b_{min} = 200 \text{ mm}$$

$f_{v,d}$: Resistencia de cálculo a cortante, dada por:

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \times f_{v,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{v,d} = \frac{0,55 \times 3,8}{1,25} = 1,976 \text{ MPa}$$

Donde:

k_{mod} : Factor de modificación por la duración de la carga y el contenido de humedad (Clase de servicio 3)

Clase: Larga duración

$$K_{mod} = 0,55$$

$f_{v,k}$: Resistencia característica a cortante

$$f_{v,k} = 3,8 \text{ MPa}$$

γ_M : Coeficiente parcial para las propiedades del material

$$\gamma_M = 1,25$$

Se ha trabajado y analizado la estructura en CYPE para comparar ambos programas, el cual ofrece y lleva a cabo una comprobación de las restricciones y condicionantes anteriores con la situación de incendio, la cual acaba moderando la resistencia estructural de ésta aproximadamente un 15%.

Obtenemos una forma final de la pasarela tras haber realizado, comprobado y analizado el resultado del cálculo estructural que ambos programas ofrecen, es la ejemplificada a continuación.

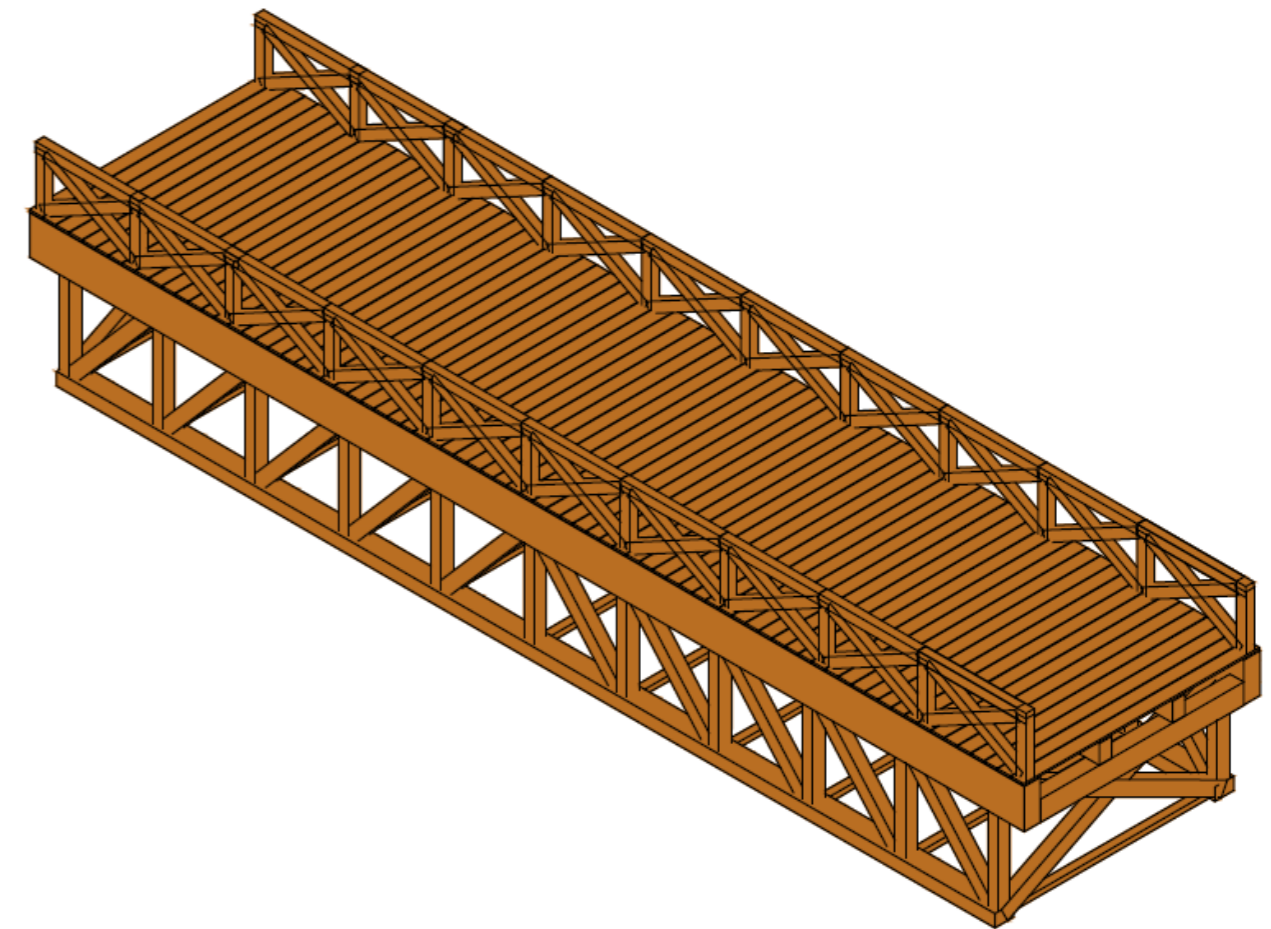


Ilustración 50 Pasarela ejemplificada, renderizada

REFERENCIA	DESCRIPCIÓN	SERIE	PERFIL	LONGITUD	PESO
VML1	Verticales y diagonales en los apoyos	VIGAS 220	160x220	22,65	473,7
VML2	Vesticales en la celosía Pratt		160x200	38,5	682,91
VML3	Corsón en la celosía Pratt	VIGAS	300x200	31,6	1 246,7
VML4	Diagonales en la celosía Pratt	200	180x200	46	1194,72
VML5	Pasarela		440x200	225,7	102,85
VML6	Cordón superior celosía Pratt	VIGAS 260	620x260	31,6	3349,358
VML7	Atado cordones inferiores entre celosías	CABIOS Y VIGUETAS	120x80	30	193,0115
VML8	Barandilla		150x130	159,04	1612,74

Tabla 21 Resumen celosía

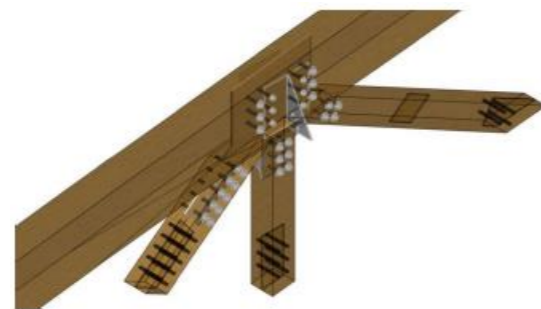
En lo que respecta al análisis y detalle de las uniones, se proponen uniones mecánicas de tipo clavija con pernos para la estructura principal. Este tipo de uniones, es decir, de madera y acero, se emplean para resistir principalmente esfuerzos de doble cortadura, incorporando una pieza de acero en el interior de la propia estructura de la viga o en el exterior.

Se emplean chapas de 10 milímetros de espesor asegurando de este modo una longitud de pandeo nula, es decir, un coeficiente de pandeo extremadamente cercano a la unidad, y permitir cierto grado de flexibilidad a las uniones.

Los pernos a emplear serán de 20 milímetros de diámetro como establece la normativa.

Distinguimos cuatro tipos de uniones diferentes:

- Nudo central en el cordón superior: Confluyen las dos diagonales a compresión y el montante vertical con el cordón superior



Ilustracion 61 Esquema general nudo central cordon superior



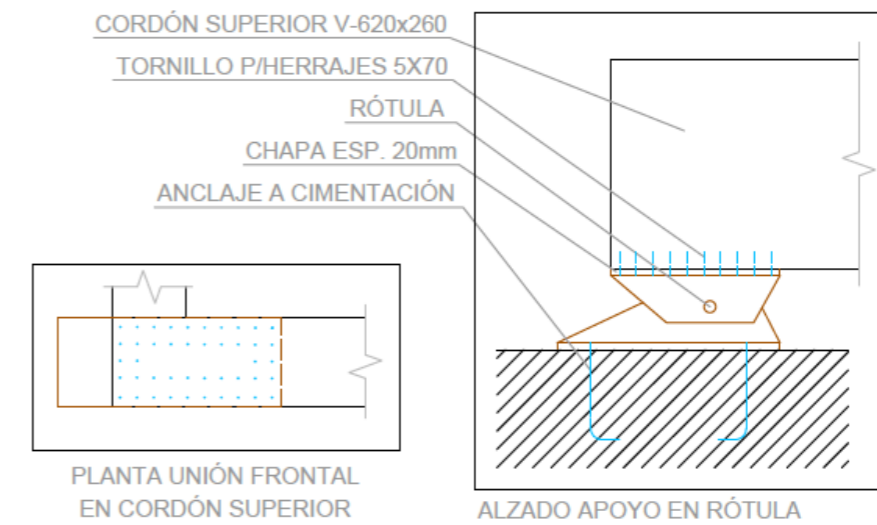
Ilustracion 62 Pieza tipo ensamble central.

- Nudo general de la celosía : Confluyen una diagonal de compresión con dos barras del cordón inferior y un montante.



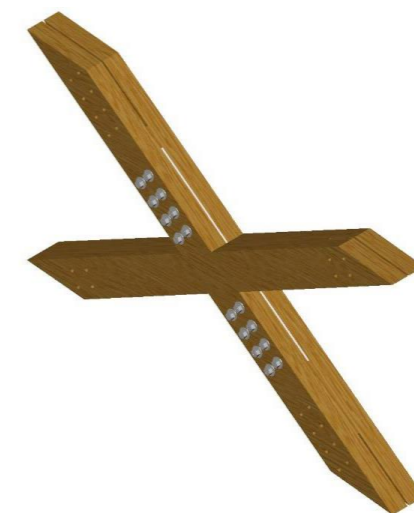
Ilustracion 63 Esquema pieza ensamble nudo general celosial

- Apoyos en los estribos: Para conseguir una total rigidización de la estructura, en los apoyos se dispondrán chapas de espesor de 20mm



Ilustracion 64 Esquema general apoyo en los estribos

- Cruces en los estribos: En los cruces de las diagonales de los estribos se dispondrán chapas de acero de 10mm de grosor con 8 tornillos de 20mm en cada lado de la unión (un total de 16).



Ilustracion 65 Esquema general cruces en los estribos



Ilustración 66 Esquema general pieza de unión de cruces en estribos

- Unión con las piezas de atado de los cordones inferiores de la celosía y unión con las piezas de la pasarela



Ilustración 67 Esquema general pieza de atado celosías y pasarela

7 PROCESO CONSTRUCTIVO

La parte más importante para el desarrollo de la obra es posiblemente la realización en taller de las piezas que compondrán la estructura del puente. Una vez cortada, será tratada, para garantizar su adecuado funcionamiento estructura. El tratamiento que recibirán las piezas será hasta alcanzar un nivel higroscópico de estabilidad 85%, un tratamiento con creosota mediante autoclave un lacado final.

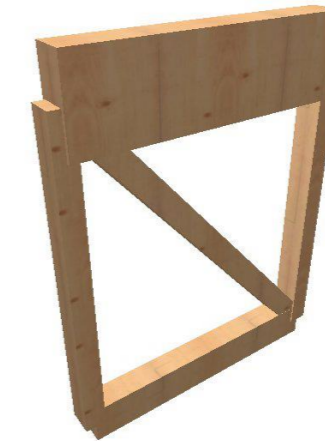


Ilustración 50 Pieza transporte celosía

Las uniones, del mismo modo, serán recibidas en taller ya preparadas, con su correspondiente sello distintivo de calidad, para una vez realizada la comprobación de las piezas, se procederá a los cajeros, pretaladrados, etc., hasta que se hallen listos para introducirlas en cada una de las piezas.

Una vez terminada la fase de taller, será transportada hasta la localización de la obra, en piezas numeradas según planos, transportando las piezas que lo requieran de manera individual, para ensamblarlas en la zona habilitada para su montaje en obra.

Comprobados los accesos a la obra, se escogerá una zona de montaje, para el ensamblaje de las piezas que así lo requieran.

Paralelamente al ensamblaje de la pasarela, se habrá adecuado la zona de actuación. Habiendo realizado el desbroce, desmonte y nivelación adecuados. Es de vital importancia que el replanteo de la estructura se realice de manera correcta, pues un desvío en el replanteo podría suponer el fracaso del resto de procesos constructivos.

Se colocará un andamiaje en la zona de actuación, para facilitar los trabajos accesorios al montaje y recibido de la pasarela. Se ejecutará la cimentación previa al recibido de la pasarela. Cabe recordar que uno de los extremos será ensamblado con una rótula que permita movilidad, mientras que en el otro extremo será recibida con un neopreno.

La elevación y montaje de la estructura se realizará mediante una grúa de tirantes, que habrá sido situada previamente.

Una vez recibida la estructura, se realizarán las pruebas de servicio correspondientes, así como la limpieza de la zona de actuación y demás comprobaciones necesarias sobre pavimento, barandilla, etc.

Durante todo el proceso de la obra serán de obligado cumplimiento las normas de Seguridad y Salud, así como el nombramiento previo de un Recurso Preventivo previamente, para dotar

a los trabajadores en todo momento de las medidas de seguridad y bienestar propias de cualquier centro de trabajo.



Ilustración 51: Ejemplo montaje pasarela, colocación de estructura principal

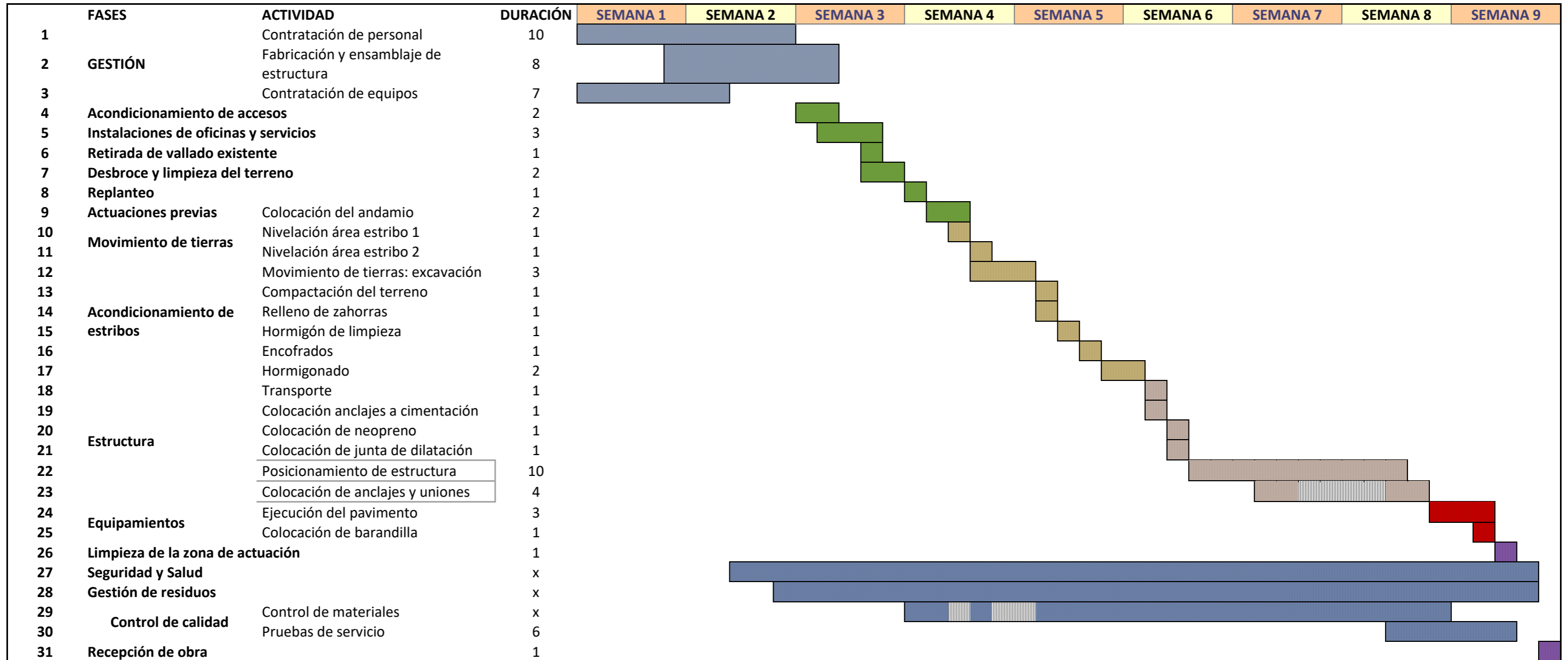
Se establece una división en tres grupos de las actuaciones principales presentes en la obra proyectada, como son:

- Actuaciones previas
- Estructura
- Equipamientos

El primer grupo corresponden a todas aquellas tareas que tienen como objetivo reacondicionar los estribos y sus accesos para la colocación de la pasarela. Se distinguen las siguientes actuaciones:

- Primeramente, se procederá al acondicionamiento de los caminos de acceso a los estribos
- A continuación, se realizará la limpieza y desbroce de la zona de actuación y, después, de ambos estribos con especial cuidado de no producir daños.
- Se continuará con la excavación y retirada del material sobrante en los accesos a los estribos, y, más tarde, la extensión de un relleno de zahorra y su compactación en la zona de los accesos.

8. PLAN DE OBRA





9 REFERENCIAS

Angst, Vanessa; Augustin, Manfred; Bell, Kolbein; Hansen, Anders Sovso; Kuklik, Petr; Lokaj, Antonín; Malo, Kjell Arne; Marynowicz, Andrzej; Materna, Alois; Premrov, Miroslav; Tajnik, Matjaz;

“Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS”

Leonardo da Vinci Pilot Project, 2008

Argüelles Álvarez, Ramón; y Arriaga Martitegui, Francisco

“Estructuras de madera: Diseño y cálculo”

Madrid, AITIM, 2000.

Arriaga Martitegui, Francisco; Peraza Sánchez, Fernando; Esteban Herrero, Miguel

“Madera aserrada estructural”

Madrid, Mundi-Prensa, 2003.

Basterra Otero, Luis Alfonso

“Construcción de estructuras de madera”

Valladolid, Universidad de Valladolid, 2009

Ferrán Gozávez, José Javier; Redón Santafé, Javier; Sanchez Romero, Francisco Javier

“Proyecto y cálculo de estructuras de madera: parte 1: teoría (Según CTE SE-M)”

Valencia, Editorial UPV, 2007

Ferrán Gozávez, José Javier; Redón Santafé, Javier; Sanchez Romero, Francisco Javier;

“Proyecto y cálculo de estructuras de madera: parte 2: teoría y práctica (Según CTE SE-M)”

Valencia, Editorial UPV, 2008

Graubner, Wolfrang

“Ensamblados en madera”

Barcelona, Ceac, 1991

Kuklik, Petr

“Timber Structures 1”

Praga, Czech Technical University, 2006

Vandier, Catherine

“Manual Técnico. Uniones metálicas en estructuras de madera”

T&T Aginco, 2004

UNE-EN 335:2013

Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Clases de uso: definiciones, aplicación a la madera maciza y a los productos derivados de la madera.

UNE-EN 336:2014

Madera estructural. Medidas y tolerancias.

UNE-EN 338:2010

Madera estructural. Clases resistentes.

UNE-EN 350-1:1995

Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera.

Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 1: guía para los principios de



ensayo y clasificación de la durabilidad natural de la madera.

UNE-EN 351-1:2008

Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Madera maciza tratada con productos protectores. Parte 1: Clasificación de las penetraciones y retenciones de los productos protectores.

UNE-EN 384:2010

Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

UNE-EN 408:2011+A1:2012

Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

UNE-EN 460:1995

Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Guía de especificaciones de durabilidad natural de la madera para su utilización según las clases de riesgo.

UNE-EN 912:2011

Conectores para madera. Especificaciones de los conectores para madera.

UNE-EN 1912:2012

Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

UNE-EN 1991-1-1:2003/AC:2010

Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-1. Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios, y sobrecargas de uso en edificios.

UNE-EN 1991-1-3:2004/AC:2010

Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-3: Acciones generales. Cargas de nieve.

UNE-EN 1991-1-4:2007/A1:2010

Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento.

UNE-EN 1991-1-7:2010/A1:2015

Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-7: Acciones generales. Acciones accidentales.

UNE-EN 1991-2:2004

Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 2: Cargas de tráfico en puentes.

UNE-EN 1993-1-1:2013/A1:2014

Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios.



UNE-EN 1995-1-1:2006/A2:2015

Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.

UNE-EN 1995-2:2010

Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes

UNE-EN 13501-1:2002

Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.

UNE-EN 14080:2013

Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada.

Requisitos.

UNE-EN 14592:2009+A1:2012

Estructuras de madera. Elementos de fijación tipo clavija. Requisitos.

UNE 56544:2011

Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas

Martha Torres Arcila

“Puentes”

Atrium, 2002

Miguel Aguiló

Forma y tipo en el arte de construir puentes

ABADA Editores, 2008