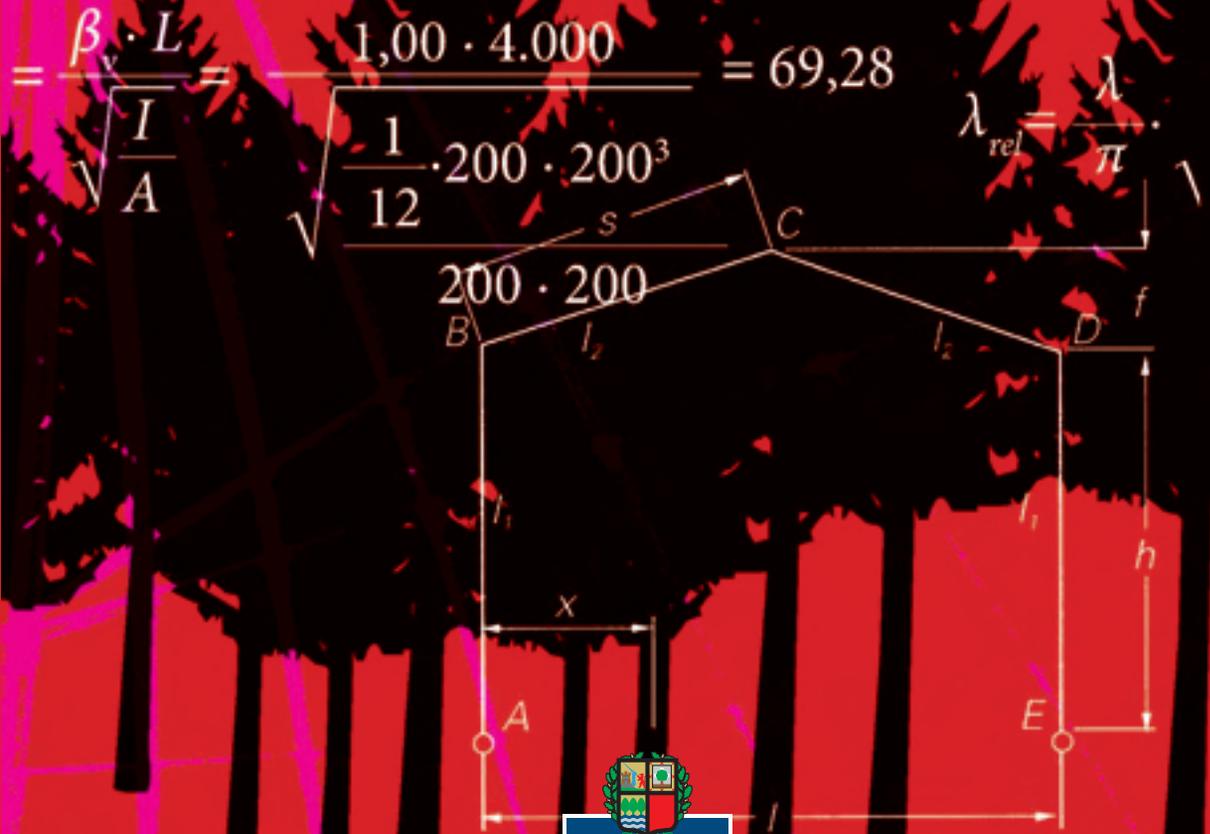


ARQUITECTURA Y MADERA

Guía de diseño de elementos estructurales adaptada al CTE



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

INGURUMEN, LURRALDE
PLANGINTZA, NEKAZARITZA
ETA ARRANTZA SAILA
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE,
PLANIFICACION TERRITORIAL,
AGRICULTURA Y PESCA

ARQUITECTURA Y MADERA

Guía de diseño de elementos estructurales adaptada al CTE

Edición actualizada en marzo de 2010



INGURUMEN, LURRALDE PLANGINTZA,
NEKAZARITZA ETA ARRANTZA SAIALA
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE,
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL, AGRICULTURA Y PESCA

Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia

Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco

Vitoria-Gasteiz, 2010

Un registro bibliográfico de esta obra puede consultarse en el catálogo de la Biblioteca General del Gobierno Vasco:
<<http://www.euskadi.net/ejgvbiblioteca>>.

Títulos publicados

1. Comercialización de los productos cultivados en invernaderos en la Comunidad Autónoma Vasca.
2. Estructura agraria de la Comunidad Autónoma Vasca.
3. Aproximación al Sistema de Derecho Alimentario.
4. Análisis y diagnóstico de los sistemas forestales de la Comunidad Autónoma del País Vasco.
5. De caserío agrícola a vivienda rural: evolución de la función agraria en la comarca de Donostia-San Sebastián.
6. La identidad reconstruida: espacios y sociabilidades emergentes en la ruralidad alavesa.
7. Variedades autóctonas del tomate del País Vasco.
8. Coste de la no agricultura en el País Vasco.
9. Emakumeak eta Osasuna EAEko Landa-Eremuetan / Mujeres y Salud en el Medio Rural de la CAE.
10. Arabako Errioxako ardo beltzen kalitatearen ebaluazio sensoriala egiteko gidaliburua / Guía para la evaluación sensorial de la calidad de los vinos tintos de Rioja Alavesa.
11. Los escolítidos de las coníferas del País Vasco: guía práctica para su identificación y control.
12. Euskadiko koniferoetako eskolitidoak.
13. Mixel Lekuona: artzainen artzain.
14. Madera y cambio climático

Edición: 2.ª marzo 2010 (1.ª en esta editorial)

Tirada: 1.000 ejemplares

© Administración de la Comunidad Autónoma del País Vasco
Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca

Internet: www.euskadi.net

Edita: Eusko Jauriaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia
Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco
C/ Donostia-San Sebastián, 1 - 01010 Vitoria-Gasteiz

Autores: Aimar Orbe, Jesús Cuadrado, Eduardo Rojí, Aitor Maturana (UPV/EHU)

Coordinación: Iñaki Lasa

Diseño: L. Francisco Gómez

Fotografías: Holtza, Cadwork y Coverclim

Nota: Se ha tenido especial cuidado en asegurar la objetividad de la información y los datos que se presentan en esta Guía, así como la exactitud de los valores numéricos presentados. Los autores no asumen responsabilidad alguna por los errores o incorrectas interpretaciones que se puedan hacer de la información contenida en esta Guía..



PRESENTACION

Es por todos conocida la creciente preocupaci3n que existe en nuestra sociedad por cuidar y salvaguardar el entorno, a la hora de llevar a cabo actuaciones de cualquier ndole, dentro del desarrollo de los espacios urbanos.

La escala de medida de esta protecci3n del entorno, est3 enmarcada dentro de lo que se conoce como sostenibilidad , que trata de buscar las pautas a seguir en los diferentes m3bitos de nuestra vida cotidiana, con objeto de llevar a cabo un desarrollo sostenible .

Las construcciones y desarrollos arquitect3nicos, de todo tipo, pueden ser una fuente importante de alteraci3n del entorno y de generaci3n de impacto ambiental, es por ello, que se vienen llevando a cabo constantes estudios encaminados a la b3squeda del dise3o3 ptimo de los edificios, bajo criterios sostenibles.

La madera, como componente estructural de las edificaciones, presenta una serie de potenciales ventajas, tanto desde el punto de vista de la ligereza de sus dise3os, como desde la perspectiva de su capacidad aislante, resistencia al fuego y los altos par3metros de sostenibilidad que supone su uso, frente a otros materiales estructurales.

Con motivo de la celebraci3n del 3er Simposium Internacional de Arquitectura y Construcci3n en Madera (EGURTEK), sale a la luz esta 23 edici3n de la Gu3a de Dise3o de Elementos Estructurales en Madera, revisada y adaptada a las 3ltimas modificaciones de la normativa, que trata de mostrar las grandes posibilidades de uso de este material en la Arquitectura, recogiendo los criterios y la formulaci3n b3sica de c3lculo y dimensionamiento establecida en el C3digo T3cnico de la Edificaci3n (CTE DB SE-M).

Es deseo, de todos los intervinientes en la elaboraci3n del presente documento que 3ste sirva, como fin principal, para acercar y potenciar el uso de la madera a los dise3os estructurales de la Arquitectura.

1**Introducción 9**

- 1.1 Pino Radiata **12**
- 1.2 Aplicaciones **13**
- 1.3 Ventajas **13**

2**Materiales 15**

- 2.1 Madera aserrada **15**
- 2.2 Madera laminada **15**
- 2.3 Tableros estructurales **19**

3**Durabilidad 21**

- 3.1 Clases de servicio **21**
- 3.2 Protección de la madera **21**
- 3.3 Protección de elementos metálicos **24**
- 3.4 Recomendaciones Constructivas **25**

4**Bases de cálculo 27**

- 4.1 Acciones adaptadas al CTE para casos de viviendas **27**
 - 4.1.1 Cargas Permanentes **27**
 - 4.1.2 Cargas Variables **28**
- 4.2 Combinaciones de acciones **31**
 - 4.2.1 Capacidad portante **32**
 - 4.2.2 Aptitud al servicio **33**
- 4.3 Factores que influyen **34**
 - 4.3.1 Contenido en humedad **35**
 - 4.3.2 Duración de la carga **35**
 - 4.3.3 Sección de la pieza **37**
 - 4.3.4 Calidad de la madera **37**

5

Comprobación de los estados límites últimos ELU

41

- 5.1 Elementos flectados (vigas y tableros) **41**
- 5.1.1 Flexión simple **41**
- 5.1.2 Flexión esviada **41**
- 5.1.3 Solicitaciones combinadas, flexotracción y flexocompresión **42**
- 5.1.4 Vuelco lateral **42**
- 5.1.5 Ejemplo de aplicación **45**

- 5.2 Elementos comprimidos (soportes) **47**
- 5.2.1 Compresión simple **47**
- 5.2.2 Solicitaciones combinadas **47**
- 5.2.3 Inestabilidad de soportes **48**
- 5.2.4 Ejemplo de aplicación **50**

6

Comprobación de los estados límites de servicio ELS

53

- 6.1 Deformaciones **53**
- 6.1.1 Ejemplo de aplicación **54**

7

Casos de flexión en vigas de sección constante

57

8

Secciones habituales

63

9

Elementos auxiliares

65

10

Referencias

68

Introducción

1

Introducción

Un término que cada día está más en boca de todo el mundo, es la «sostenibilidad», sobre todo en su vertiente medioambiental. Se buscan coches que produzcan menos emisiones, elementos reciclables o reutilizables procesos industriales y viviendas que consuman menos energía, o que dispongan de instalaciones asociadas a fuentes de energía renovables.

La construcción es uno de los sectores que generan un mayor impacto en el entorno, por la gran cantidad de recursos que se consumen, durante el proceso de ejecución y a lo largo de toda su vida útil. En nuestro entorno, los materiales utilizados en la resolución de estructuras en edificación, son principalmente el hormigón y el acero, dejando la madera relegada a un menor uso estructural y siendo más utilizada en acabados.

La Ley de Ordenación de la Edificación (Ley 38/1999), supuso una traba al uso de la madera desde el punto estructural, debido a las reservas presentadas por los Organismos de Control de Calidad (OCT) y las Compañías Aseguradoras principalmente, respecto a los cálculos de las estructuras.

La reciente aprobación del Código Técnico de la Edificación (CTE) incluye un Documento Básico de Seguridad Estructural en Madera (SE-M), basado principalmente en el Eurocódigo 5 (EC5), siendo el encargado de crear un marco reglamentario en igualdad, entre la madera en su uso estructural y el resto de los materiales de construcción.

Anteriormente a la aprobación del CTE, no existía, a nivel estatal, una normativa de obligado cumplimiento, que regulase aspectos relacionados

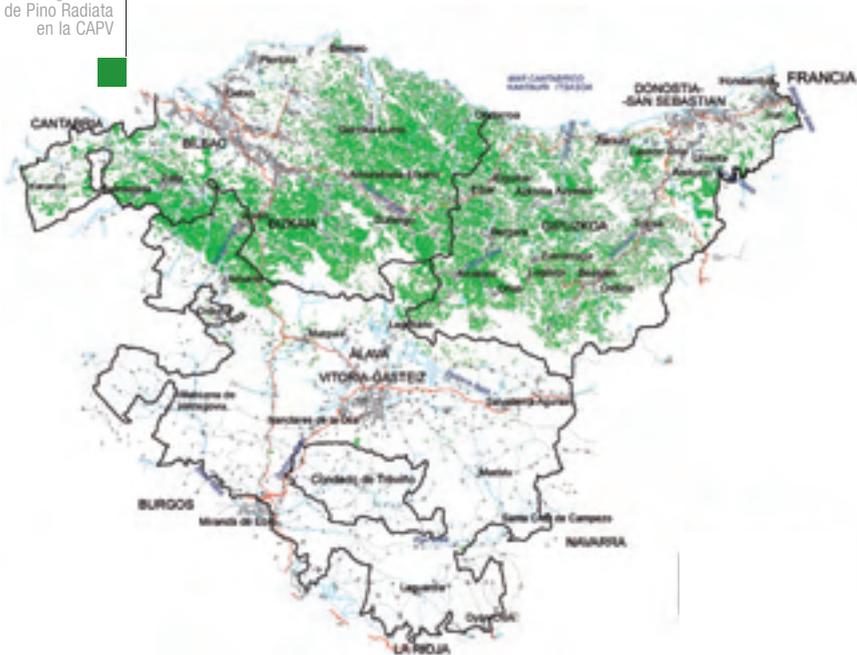




Vigas y correas de apoyo de cubierta resueltas en madera



Figura 1.1
Distribución de Pino Radiata
en la CAPV



con el diseño y cálculo de estructuras de madera. Por ello, las ingenierías, fabricantes y constructores de estructuras de madera, venían aplicando la norma experimental EC5, así como las normas francesas y alemanas.

Esta publicación pretende servir de guía práctica, en el cálculo de elementos estructurales de madera, dentro de la actual legislación vigente. Para ello, recopila el conjunto de parámetros necesarios en el dimensionamiento de pilares, vigas y paneles, con objeto de resolver la estructura de una edificación de tipo residencial.

Dentro de los materiales apropiados para la construcción de estructuras, y siempre, en función de las dimensiones de los elementos, así como de las cargas a soportar, se puede optar por emplear la madera aserrada, la madera laminada encolada y la madera microlaminada, siendo las dos primeras las que se van a tratar con mayor profundidad en el desarrollo de esta guía.

Para minimizar el impacto ambiental, un principio que se debe de utilizar en la construcción de edificios, es la utilización de los recursos naturales presentes en el entorno, reduciendo de esta forma el impacto asociado al transporte de los materiales. En el País Vasco, existe una gran superficie forestal maderable, donde predomina la especie conocida como Pino Radiata (*Pinus Radiata* D. Don), que se ha tomado como material estructural en los ejemplos realizados en esta guía.

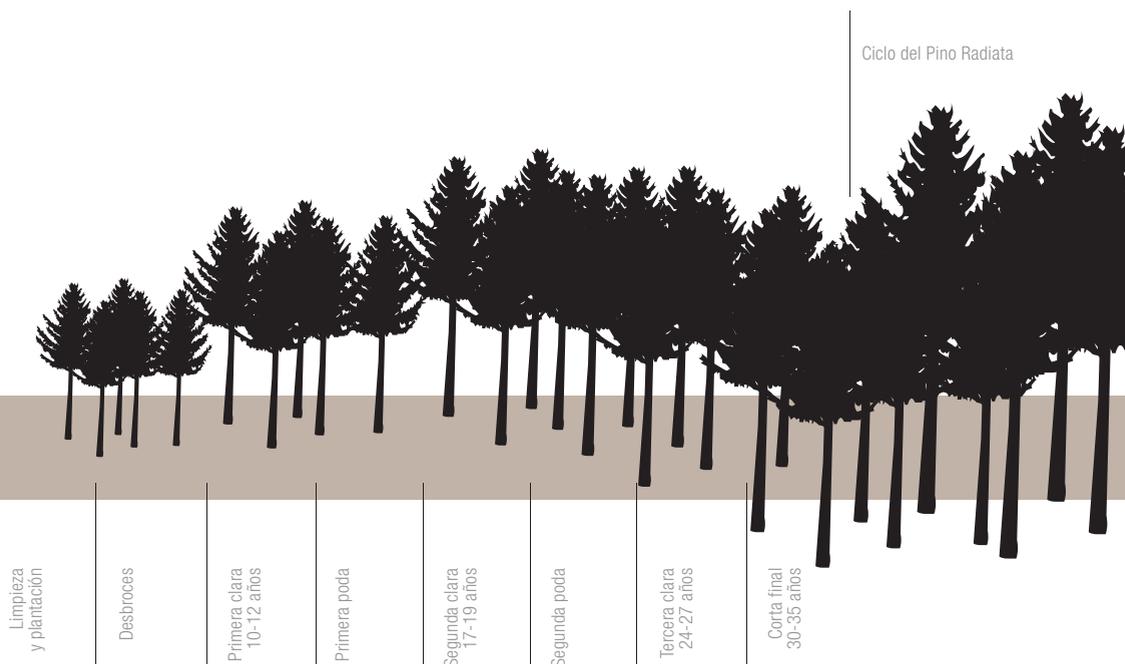
La madera es un buen material desde el punto de vista estructural, aporta resistencias elevadas, es aislante, se adapta a geometrías complejas, permite salvar grandes luces y disponer de piezas con radios de curvatura. Hoy en día, gracias a las técnicas de protección existentes y a las soluciones constructivas que se plantean, la madera se puede introducir con gran fuerza en el campo estructural, aportando un gran valor estético y soluciones muy variadas. El CTE por otro lado, va a permitir que la madera



Pasarela peatonal



Estructura de edificio singular



pueda competir en el ámbito estructural de la edificación, en las mismas condiciones que el resto de materiales utilizados habitualmente.

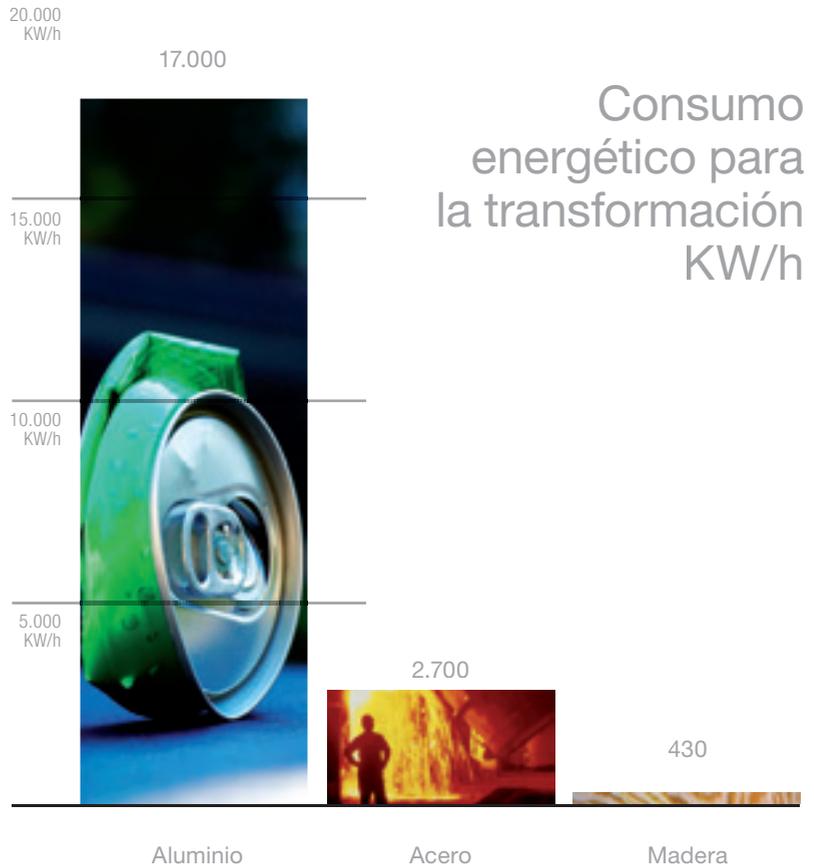
1.1

Pino Radiata

Según los datos aportados por el segundo Inventario Forestal Nacional, del Ministerio de Medio Ambiente, y el Inventario Forestal de la Comunidad Autónoma del País Vasco, el Pino Radiata es la conífera más utilizada en plantaciones forestales y su masa arbórea se localiza especialmente en el País Vasco y la cornisa cantábrica.

El área ocupada a nivel estatal alcanza las 199.000 ha, de las que aproximadamente el 70% se concentra en el País Vasco, que supone el 35% de la superficie forestal arbolada total de nuestra comunidad y el 50% del total de sus existencias maderables.

Sobre esta especie, se han realizado diversos estudios y ensayos que avalan su uso estructural, asimilando sus propiedades mecánicas a las clases resistentes recogidas en el CTE.



Aplicaciones

1.2

El empleo de la madera en el ámbito estructural, aporta al diseño arquitectónico una serie de valores añadidos, en relación a la estética, ligereza, aislamiento, protección frente al fuego o calidez y su aplicación viene siendo habitual en:

- | instalaciones deportivas
- | centros comerciales
- | salas de exposición
- | marquesinas y pérgolas
- | rehabilitación de edificios históricos

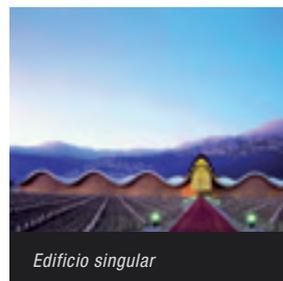
Pero sus posibilidades, pueden abarcar campos con mayores solicitaciones y ambientes más agresivos, que no han supuesto una traba para su uso, como pueden ser las aplicaciones en obra civil. En este campo, aumenta el diseño de pasarelas peatonales de madera, frente a las habituales de celosías de acero, pero también existen realizaciones de viaductos de tráfico rodado resueltas en este material.

Ventajas

1.3

Dentro de las ventajas que presenta la madera como material estructural se pueden mencionar las siguientes:

- | Es un material natural, renovable y absolutamente biodegradable, que además ofrece una gran resistencia frente a agentes químicos agresivos.
- | Debido a la combinación de sus componentes (celulosa y lignina), presenta una excelente relación resistencia/peso.
- | Es un material recuperable, que además de ser reutilizado para el uso estructural, puede ser reciclado como materia prima transformándolo en diversos productos, o aprovechando su poder calorífico como biomasa.
- | El proceso de transformación de la madera consume menos energía que la necesaria en otros materiales, aproximadamente un 16% del necesario para el acero y un 2,5% en el caso del aluminio, lo que reduce considerablemente el impacto ambiental generado por la estructura del edificio.
- | Al contrario de lo que se suele pensar, la madera presenta un correcto comportamiento frente al fuego. Esto es debido a que durante el incendio, se crea una capa carbonizada en la superficie del elemento que lo aísla, manteniendo intactas sus propiedades mecánicas en el interior.
- | Es un excelente aislante térmico y acústico, lo que repercute en un mayor bienestar y una reducción del consumo energético, factores en los cuales, se hace una gran incidencia en el CTE.
- | Se trata de un material certificado que aporta garantías respecto a sus propiedades. Su certificado de origen, y distintivo de calidad del producto en su caso, son documentos que el suministrador facilitará en el albarán de suministro. ■



Materialles

2

Materiales

La madera es un material natural de carácter anisótropo debido a la orientación de las fibras en la dirección longitudinal del tronco. Es por ello, que las diferentes propiedades del material se deben definir en las direcciones paralela y perpendicular a la de las fibras.

Las especies comerciales se pueden dividir en dos grupos. Por un lado las coníferas y las frondosas. Éstas a su vez, pueden emplearse directamente como madera aserrada, o para la realización de madera laminada encolada.

Las propiedades de cada tipo de madera, se establecen en función de la clase resistente a la que correspondan. La asignación de dicha clase, se realiza mediante el ensayo de muestras de madera, o la clasificación visual en función de la norma UNE 56.544.



Madera aserrada

2.1

Como madera aserrada, se entiende la madera procedente del tronco del árbol, donde mediante su aserrado, se obtienen los elementos estructurales, sin ningún otro tipo de transformación. El conjunto de propiedades asociadas a cada clase resistente aparecen reflejadas en la tabla 2.1.

Madera laminada encolada

2.2

La madera laminada encolada, se consigue uniendo finas láminas de madera aserrada mediante potentes adhesivos, permitiendo fabricar en taller, vigas de mayores cantos, grandes luces, o importantes radios de curvatura, y en general aporta propiedades mecánicas mejoradas, respecto a la madera simplemente aserrada.

Existen dos tipos de madera laminada encolada, la homogénea, cuyas láminas están compuestas de madera aserrada de igual clase resistente en toda su sección y la combinada, que alterna láminas de mayor clase re-



sistente en las caras exteriores y de menor clase, en el interior. Las láminas externas, deben comprender como mínimo dos láminas, y/o las localizadas en un sexto del canto.

Las propiedades asociadas a cada clase de madera laminada encolada aparecen reflejadas en la tabla 2.2 en función de su clase resistente. Mientras que las calidades requeridas por el material, para definir las clases resistentes de los dos tipos de madera laminada encolada se recopilan en la tabla 2.3.

Propiedades		Clases resistentes											
		Coníferas y chopo											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
		Resistencia característica (MPa)											
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	22	22	23	25	26	27	29
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,5	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
		Rigidez (KN/mm ²)											
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0, medio}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de elasticidad paralelo 5º - percentil	$E_{0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90, medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo transversal medio	$G_{ medio}$	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
		Densidad (kg/m ³)											
Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidad media	$\rho_{ medio}$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550



Resolución de vigas y correas de cubierta en madera

Fronzosas							
D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
18	24	30	35	40	50	60	70
11	14	18	21	24	30	35	42
0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
18	21	23	25	26	29	32	34
7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
10	11	12	12	13	14	17	20
8,4	9,2	10,1	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
0,67	0,73	0,80	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
500	520	530	540	550	620	700	900
610	630	640	650	660	750	840	1080

Tabla 2.1
Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente



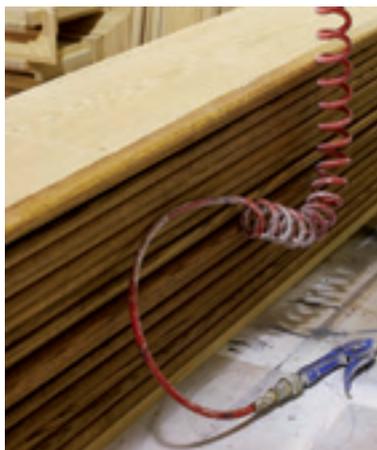
Tabla 2.2
Valores de las propiedades
asociadas a cada clase
resistente

Propiedades		Clases resistentes							
		Laminada encolada homogénea				Laminada encolada combinada			
		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
		Resistencia característica (MPa)							
Flexión	$f_{m,k}$	24	28	32	36	24	28	32	36
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,45	0,5
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,0	3,3
Cortante	$f_{v,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
		Rigidez (KN/mm ²)							
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
Módulo de elasticidad paralelo 5°- percentil	$E_{0,k}$	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,42	0,46
Módulo transversal medio	G_{medio}	0,72	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,78	0,85
		Densidad (kg/m ³)							
Densidad característica	ρ_k	380	410	430	450	350	380	410	430

Tableros estructurales

En relación a los tableros estructurales, el CTE identifica diferentes tipos, en función de su uso en ambientes secos o húmedos, del tipo de fibras que los conforman, e incluso de las características de su proceso de fabricación, estableciendo la siguiente clasificación:

- | Tableros de partículas estructurales para su uso en ambiente seco
- | Tableros de partículas estructurales para su uso en ambiente húmedo
- | Tableros de partículas de alta prestación estructural para su uso en ambiente seco
- | Tablero de partículas de alta prestación estructural para su uso en ambiente húmedo
- | Tableros de fibras duros y semiduros estructurales
- | Tableros de fibras estructurales fabricados por proceso seco (MDF)



Clases resistentes			
Madera laminada encolada homogénea	GL24h	GL28h	GL32h
Todas las láminas	C24	C30	C40
Madera laminada encolada combinada	GL24c	GL28c	GL32c
Láminas externas	C24	C30	C40
Láminas internas	C18	C24	C30

| Un tablero de partículas es un tablero formado por partículas de madera o de otro material leñoso, aglomeradas entre sí mediante un adhesivo y presión, a la temperatura adecuada. Su denominación correcta debería ser tablero aglomerado de partículas de madera.

| Un tablero de fibras está formado por fibras lignocelulósicas mediante la aplicación de calor y/o presión. La cohesión se consigue por las propiedades adhesivas intrínsecas de las fibras o por adición de un aglomerante sintético. Se distinguen dos tipos:

- | tablero de fibras duro
- | tablero de fibras semiduro

El tablero de fibras duro, es fabricado por el proceso en húmedo que tiene una densidad mayor o igual a 900 kg/m³.

El tablero de fibras semiduro, es fabricado por el proceso en húmedo que tiene una densidad comprendida entre 400 y 900 kg/m³. Si la densidad se sitúa entre 400 y 560 kg/m³ se denominan tableros semiduros de baja densidad, y si la densidad se sitúa entre 560 y 900 kg/m³, se denominan tableros semiduros de alta densidad.

Un tablero de fibras de densidad media, es un tablero fabricado por el proceso en seco, empleando un aglomerante sintético así como presión y calor. Se conoce vulgarmente como tablero DM o MDF. ■

Tabla 2.3
Correspondencias conocidas entre clases resistentes de madera laminada encolada y de madera aserrada

Durabilidad

3

Durabilidad

La durabilidad de los elementos estructurales de madera, viene condicionada por la acción derivada de agentes externos, bióticos y abióticos, durante su periodo de vida útil, además de sus características de durabilidad natural debido a los componentes situados en la albura y el duramen.

Los fenómenos de degradación, al igual que en el resto de materiales, originan en general modificaciones de las características y propiedades mecánicas de la madera, que se deben tener en cuenta.

Habitualmente se emplea la protección preventiva de la madera para evitar ataques relacionados con agentes bióticos, mientras que un correcto diseño constructivo, suele ser la mejor solución, para evitar exposiciones de la madera frente a agentes agresivos, como por ejemplo, los meteorológicos.



Apoyo de pilar sobre base de piedra

Clases de uso

3.1

El riesgo biológico que pueda sufrir una estructura, es función del grado de humedad que alcance durante su periodo de servicio. Es por ello, que se definen cinco clases de uso (Tabla 3.1), de acuerdo a la exposición de los elementos estructurales y que se relaciona con los tipos de protección a emplear.

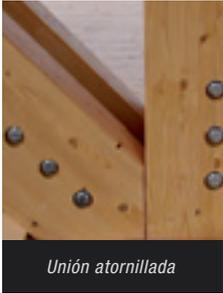
Tabla 3.1
Clases de uso

Clase de uso	Situación	Grado de humedad	Ejemplo
CU 1	Protegido de la intemperie y no expuesto a la humedad	< 20%	Interiores de edificios lejos de fuentes de humedad
CU 2	Protegido de la intemperie y expuesto ocasionalmente a la humedad	Ocasionalmente > 20%	Interiores de edificios cerca de fuentes de humedad (cubiertas de piscinas, etc.)
CU 3.1	Descubierta, sin contacto con el suelo y protegido	Ocasionalmente > 20%	Viga que vuela al exterior con albardillas o piezas de sacrificio protegiendo la cara superior y testas
CU 3.2	Descubierta, sin contacto con el suelo pero sin proteger	Frecuentemente > 20%	Piezas sin protección en caras superiores o testas, sometidos a salpicaduras de lluvia y acumulaciones de nieve
CU 4	En contacto con el suelo o con agua dulce	Permanentemente > 20%	Construcciones en agua dulce. Pilares en contacto directo con el suelo
CU 5	En contacto con agua salada	> 20%	Construcciones en aguas saladas

Protección de la madera

3.2

Con objeto de reducir la probabilidad de afección de los elementos estructurales de madera, se procede a la protección de la misma de acuerdo a la norma UNE EN 351-1, y siempre en función de la clase de uso presente (Tabla 3.2).



Unión atornillada



Unión sobre elementos metálicos

Es necesario destacar que cada especie y zona (albura y duramen) tiene asociada una impregnabilidad, por lo que el tratamiento prescrito debe ser compatible con la especie a emplear.

A su vez, es posible que la albura y el duramen de la especie seleccionada no requieran protección, para una determinada clase de uso, aunque así lo indique la tabla 3.2.

En caso de utilizar madera laminada encolada, si se debe aplicar una protección superficial, ésta se realizará sobre la pieza acabada, para evitar que trabajos mecánicos posteriores, como puede ser el cepillado o taladrado, puedan afectar al tratamiento de protección.

Tabla 3.2
Elección del tipo de protección

Clase de uso	Protección	Penetración del protector	Producto	Tratamiento	Clase de Penetración*
CU 1	SUPERFICIAL	Sin exigencias específicas - Todas las caras tratadas	Orgánico Sales Hidrosolubles	Pincelado Pulverización Inmersión	NP1
CU 2	SUPERFICIAL	Sin exigencias específicas - Todas las caras tratadas	Orgánico Sales Hidrosolubles	Pincelado Pulverización Inmersión	NP1
CU 3.1	MEDIA	Al menos 3 mm en la albura de todas las caras de la pieza	Orgánico Sales Hidrosolubles Prod. Doble Vacío	Pincelado Inmersión Autoclave	NP2
CU 3.2	MEDIA	Al menos 6 mm en la albura de todas las caras de la pieza	Orgánico Sales Hidrosolubles Prod. Doble Vacío	Pincelado Inmersión Autoclave	NP3
CU 4	PROFUNDA	Al menos 25 mm en todas las caras	Sales Hidrosolubles	Autoclave	NP4
		Penetración total en la albura			NP5
CU 5	PROFUNDA	Penetración total en la albura y al menos en 6 mm en la madera de duramen expuesta	Sales Hidrosolubles	Autoclave	NP6

* De acuerdo al CTE DB SE-M (abril 2009)

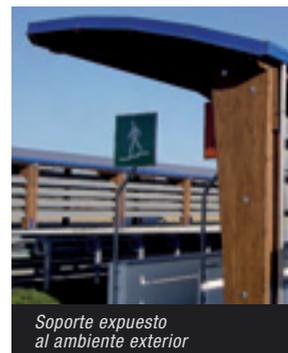
Si la protección a aplicar es media o profunda, deberá realizarse sobre las láminas previas, comprobando que los procesos posteriores como el encolado no afecten negativamente a la protección aplicada.

Hay que tener en cuenta que en aquellas obras de intervención o rehabilitación de estructuras de madera antiguas, y que puedan haber presentado en el pasado la presencia de xilófagos, requieren que el tipo de protección a utilizar en los nuevos elementos estructurales, vean aumentada su protección de la siguiente forma:

- Los elementos nuevos que no posean una durabilidad natural suficiente recibirán un tratamiento superficial (NP2).

- En caso de ataques previos por termitas el tratamiento será profundo (NP5).

- Los elementos existentes recibirán una protección profunda (al menos NP5) para el tratamiento de ataques activos de hongos de pudrición y termitas.



Soporte expuesto al ambiente exterior

En elementos exteriores, se recomienda la aplicación de lasures de poro abierto, que permiten el flujo de humedad entre la madera y el ambiente.

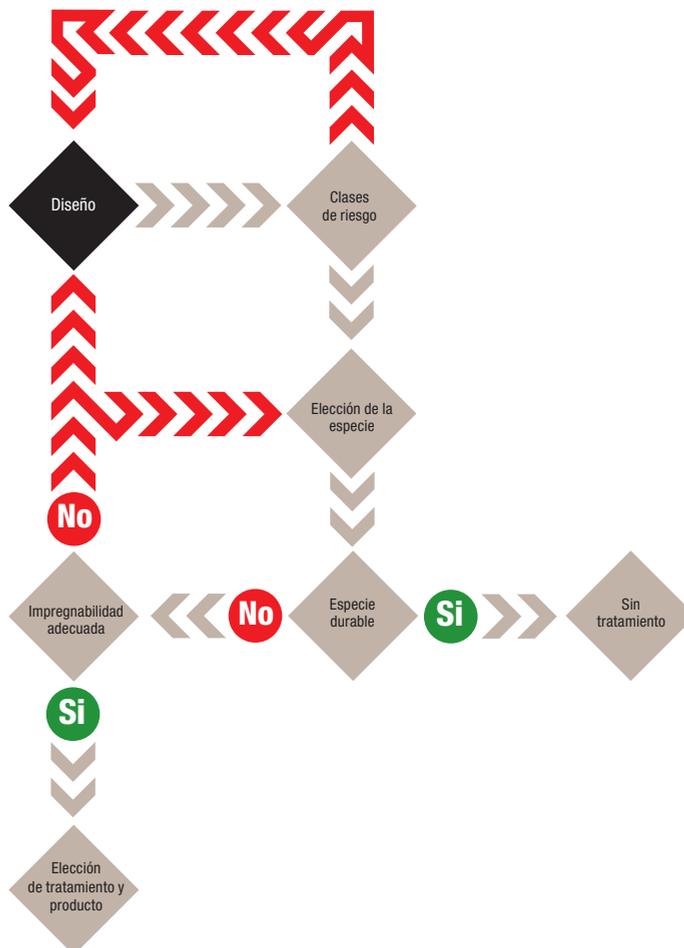


Figura 3.1
Organigrama del proceso de diseño y protección

 DECISIONES
 MODIFICACIONES



Protección sobre la sección de la viga



Unión mediante elementos metálicos

3.3

Protección de elementos metálicos

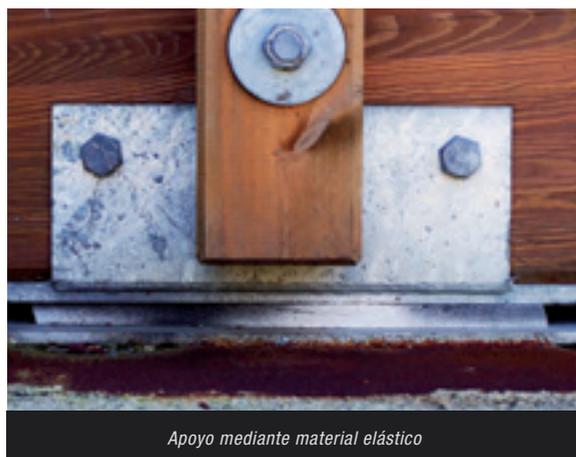
Los elementos metálicos que se emplean en el diseño de algunas uniones de piezas de madera, pueden requerir una cierta protección, o un tipo de acero específico, en función de la clase de servicio que se les asigne (Tabla 3.4). La definición de las clases de servicio, se realiza en función de las condiciones ambientales a las que va a estar sometida la estructura durante su ciclo de vida y cuya clasificación se recoge en la Tabla 4.10.

Tabla 3.3
Clases de penetración de acuerdo a UNE EN 351-1

Clase de penetración	Penetración
P ₁	---
P ₂	≥ 3 mm en caras laterales albura y 40 mm en axial
P ₃	≥ 4 mm en caras laterales albura
P ₄	≥ 6 mm en caras laterales albura
P ₅	≥ 6 mm en caras laterales albura y 50 mm en axial
P ₆	≥ 12 mm en caras laterales albura
P ₇	≥ 20 mm en caras laterales albura
P ₈	total en albura
P ₉	total en albura 6 mm en duramen

Tabla 3.4
Protección mínima frente a la corrosión o tipo de acero necesario

Elemento de fijación	Clase de servicio		
	CS1	CS2	CS3
Clavos y tirafondo $\phi \leq 4$ mm	---	Fe/Zn 12c	Fe/Zn 25c
Pernos, pasadores y clavos $\phi > 4$ mm	---	---	Fe/Zn 25c
Grapas	Fe/Zn 12c	Fe/Zn 12c	Acero Inox.
Placas dentadas. Chapas de acero $e \leq 3$ mm	Fe/Zn 12c	Fe/Zn 12c	Acero Inox.
Chapas de acero $3 \text{ mm} < e \leq 5$ mm	---	Fe/Zn 12c	Fe/Zn 25c
Chapas de acero $e > 5$ mm	---	---	Fe/Zn 25c



Apoyo mediante material elástico



Articulación metálica para evitar el contacto madera-terreno

En caso de emplear elementos galvanizados en caliente, se sustituirá la protección de Fe/Zn 12c y Fe/Zn 25c por una compatible con el tratamiento, de Z 275 y Z 350 respectivamente.

En la clase de servicio 3, la protección de Fe/Zn 25c puede ser sustituida por Fe/Zn 40c, galvanizado en caliente más grueso, o acero inoxidable para condiciones especialmente expuestas.

Recomendaciones Constructivas

3.4

Un diseño adecuado requiere unos detalles correctos, que permitan mejorar la durabilidad de la estructura de madera. Es por ello, que las principales recomendaciones constructivas tienen como finalidad, reducir la humedad que puedan alcanzar los diferentes elementos que componen una estructura portante de madera.

Disponer materiales separadores, como láminas impermeables, entre las cimentaciones o muros de hormigón y los soportes o vigas de madera que se apoyan en los mismos.

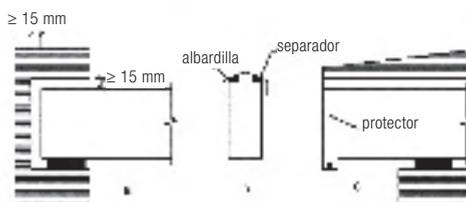


Figura 11.2
a), b) y c). Ejemplos de detalles constructivos de protección de elementos estructurales

Dejar unos espacios mínimos en las uniones con elementos de hormigón o mampostería, que permitan ventilar dichos encuentros y evacuar el posible agua que se pueda acumular, especialmente en la clase de servicio 3.

Se deben evitar aquellas uniones en las que se pueda acumular agua, sobretodo en zonas expuestas.

Proteger la cara superior de los elementos de madera, expuestos directamente a la intemperie. ■

Bases de cálculo

4

Bases de cálculo

La aprobación del Código Técnico de la Edificación (CTE), introduce una herramienta normalizada para el uso y cálculo de la madera como elemento estructural. Las bases de cálculo aquí expuestas, se ciñen por tanto, a lo expresado en los Documentos Básicos (DB) de dicha normativa.

La verificación de los estados límites expuestos en los siguientes apartados, se realiza mediante el empleo de coeficientes parciales de seguridad (Tabla 4.1), que mayoran las acciones aplicadas y minoran la resistencia de los materiales.

La seguridad de la estructura respecto a su estabilidad y resistencia, se garantiza cuando las acciones desestabilizadoras, son inferiores a las estabilizadoras, siendo los esfuerzos originados por las acciones inferiores a los resistidos por el material de acuerdo a sus propiedades mecánicas.

$$e_d < r_d$$

e_d = Esfuerzos de las acciones actuantes

r_d = Esfuerzos resistidos por el material

	Situaciones persistentes y transitorias	Situaciones extraordinarias
Madera maciza	1,30	1,00
Madera laminada encolada	1,25	1,00
Tablero estructural	1,30	1,00

Tabla 4.1
Coeficientes parciales de seguridad (γ_M) para el material

Acciones adaptadas al CTE para casos de vivienda

4.1

Las acciones a considerar en el cálculo de una estructura se identifican por su naturaleza y duración, siendo clasificadas de mayor a menor aplicación en el tiempo como, cargas permanentes, variables y accidentales.

Los datos recogidos en esta guía, se refieren a estructuras de vivienda, que no se encuentren ubicadas en zonas especialmente expuestas frente a acciones climatológicas como acantilados, altitudes superiores a 2.000 m, que sirvan de contención de tierras o que presenten dimensiones elevadas, que obliguen a considerar efectos reológicos, etc. Para obtener un estudio más detallado de las acciones a considerar en dichos casos, se deberá consultar el correspondiente Documento Básico del CTE.

Cargas Permanentes

4.1.1

Como cargas permanentes en este tipo de edificaciones de carácter residencial, se contemplan el peso propio de la estructura de madera, los solados y la tabiquería.



Materiales	Peso específico aparente (KN/m³)
Madera aserrada (C14 a C40)	3,50 a 5,00
Madera laminada encolada	3,70 a 4,40
Tablero contrachapado	5,00
Tablero cartón gris	8,00
Aglomerado con cemento	12,00
Tablero de fibras	8,0 a 10,0
Tablero ligero	4,00

Tabla 4.2
Peso específico de elementos de madera

El peso propio de la madera se determinará según su peso específico y sus dimensiones nominales. Aunque este valor debe ser suministrado por el fabricante, en la tabla 4.2, se define un rango de valores orientativos:

El resto de las cargas permanentes se encuentran condicionadas por la composición de los elementos constructivos presentes en el edificio, en el Anejo C, del Documento Básico de Seguridad Estructural - Acciones en la Edificación DB SE-AE, se recogen otros posibles valores a considerar en cada caso (Tabla 4.3).

4.1.2

Cargas Variables

Se considera carga variable, toda aquella carga, cuya presencia en el tiem-

Tabla 4.3
Peso específico de elementos de cobertura y pavimentación

Materiales y elementos de cobertura	Peso (KN/m²)
Tejas planas (sin enlistonado)	
ligeras (2,4 kg/pieza)	0,30
corrientes (3,0 kg/pieza)	0,40
pesadas (3,6 kg/pieza)	0,50
Tejas curvas (sin enlistonado)	
ligeras (1,6 kg/pieza)	0,40
corrientes (2,0 kg/pieza)	0,50
pesadas (2,4 kg/pieza)	0,60
Materiales y elementos de pavimentación	Peso (KN/m²)
Baldosa hidráulica o cerámica (incluyendo material de agarre)	
0,03 m de espesor total	0,50
0,05 m de espesor total	0,80
0,07 m de espesor total	1,10
Linóleo o loseta de goma y mortero de 20 mm de espesor total	0,50
Parqué y tarima de 20 mm de espesor sobre rastreles	0,40
Tarima de 20 mm de espesor rastreles recibidos con yeso	0,30
Terrazo sobre mortero, 50 mm espesor	0,80

Categoría de uso		Subcategoría de uso		Carga uniforme (KN/m ²)	Carga concentrada (KN)
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
F	Cubiertas transitables accesibles solo privadamente			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación	G1	Cubiertas con inclinación inferior 20°	1	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado)	0,4	1
		G2	Cubiertas con inclinación >40°	0	2

po no es continua, entendiéndose como tales, la sobrecarga de uso, la acción del viento y la acción de nieve.

I Sobrecarga de uso:

El CTE clasifica en diversas categorías las estructuras en función de su uso, siendo las sobrecargas a introducir en el caso de viviendas las que se recogen en la tabla 4.4.

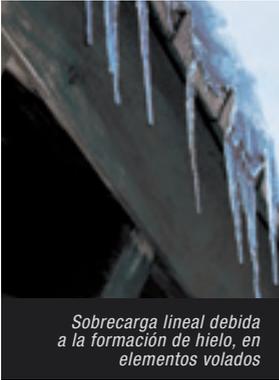
En lo que respecta a cubiertas, si se consideran de uso público, el valor a considerar, corresponde al uso de la zona desde la que se accede. Para cubiertas inclinadas con pendientes intermedias a las reflejadas en la tabla 4.4, se realizará una interpolación lineal, siendo la sobrecarga de G1 no concomitante con otras cargas variables y su componente uniforme referida a la proyección horizontal de la superficie de la cubierta.

Tabla 4.4
Valores característicos de las sobrecargas de uso



Figura 4.1
Valor básico de la velocidad del viento (m/s)
Zona A: 26
Zona B: 27
Zona C: 29

(Las Islas Canarias están clasificadas como zona C)



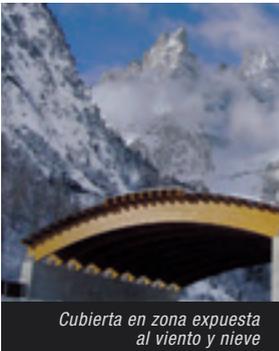
Sobrecarga lineal debida a la formación de hielo, en elementos volados

Tabla 4.5
Valores del coeficiente de exposición c_e

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

Tabla 4.6
Coeficientes eólicos globales en edificios de pisos c_p

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≤ 5,00
Coeficiente eólico de presión, c_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coeficiente eólico de succión, c_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7



Cubierta en zona expuesta al viento y nieve

I Sobrecarga de viento

La acción generada por el empuje o succión del viento (q_e), se aplica perpendicularmente a las superficies expuestas, determinando su valor en función de la presión dinámica del viento (q_b), el coeficiente de exposición (c_e) y el coeficiente eólico (c_p).

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

La presión dinámica del viento (q_b), se obtiene de la expresión,

$$q_b = 0,5 \cdot \delta \cdot v_b^2$$

siendo δ la densidad del aire (en general 1,25 kg/m³) y v_b el valor básico de la velocidad del viento, que es función de la zona, de acuerdo al mapa de la figura 4.1. (Ver página anterior)

Los efectos debidos a las turbulencias originadas por el relieve y la topografía del terreno se miden en función del coeficiente de exposición (c_e), que es función de las características del entorno y la altura del edificio (Tabla 4.5).

Por último con relación al coeficiente eólico (c_p), el CTE define que para edificios de pisos, con forjados que conectan todas las fachadas a intervalos regulares, con huecos o ventanas pequeños practicables o herméticos y compartimentados interiormente, para el análisis global de la estructura, bastará considerar coeficientes eólicos a barlovento y sotavento, con los valores obtenidos en función de la esbeltez del edificio (relación altura/base) en la tabla 4.6.

I Sobrecarga de nieve

La acción del depósito natural de nieve, se estima de acuerdo al coeficiente de forma de la cubierta (μ) y el valor característico de la carga de nieve sobre superficie horizontal (s_k).

$$q_n = \mu \cdot s_k$$

El valor del coeficiente de forma, viene condicionado por la inclinación y forma de la cubierta, de modo que en aquellos faldones en los que no hay impedimento al deslizamiento de nieve, se toma el valor de «1», en cubiertas de inclinación menor o igual a 30° y toma el valor de «0», en cubiertas con inclinación mayor o igual a 60°. Si hay impedimento se tomará $\mu=1$, sea cual sea su inclinación. Para otros casos, se podrá consultar el capítulo 3, del Documento Básico de Seguridad Estructural - Acciones en la Edificación DB SE-AE.

De acuerdo al mapa de zonas climáticas de invierno (Figura 4.2), el País Vasco se encuentra repartido entre las zonas 1 y 2. Los valores de sobrecarga de nieve (s_k) a considerar, serán función de la zona y la altitud de la localidad en la que se ubica la obra, según la tabla 4.7.

Cuando la estructura esté protegida de la acción del viento, el valor de carga de nieve se puede reducir un 20%, pero deberá aumentarse un 20% si se encuentra fuertemente expuesta.

Para estructuras situadas a más de 1.000 metros de altitud, se debe considerar una sobrecarga lineal p_n añadida en elementos volados, debido a la formación de hielo, según la siguiente expresión:

$$p_n = 3 \cdot \mu^2 \cdot s_k$$

	Zona de clima invernal	
	1	2
2200	--	8,0
1800	--	4,6
1600	4,3	3,5
1400	3,2	2,6
1200	2,3	2,0
1000	1,7	1,5
900	1,4	1,3
800	1,2	1,1
700	1,0	1,0
600	0,9	0,9
500	0,7	0,7
400	0,6	0,6
200	0,5	0,5
0	0,3	0,4

Tabla 4.7
Sobrecarga de nieve en superficie horizontal s_k (KN/m²)

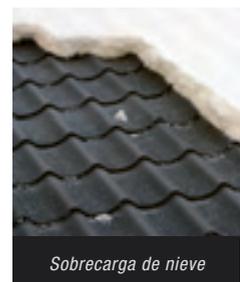
Combinaciones de acciones

Las acciones, con sus valores característicos mayorados en función de los coeficientes indicados en la tabla 4.8 (valores de cálculo), se combinan con el resto de las acciones de forma que tras el cálculo, se obtiene una envolvente de esfuerzos pésima en cada sección de los elementos estructurales.

$$F_d = \gamma \cdot F_k$$

En función de la probabilidad de acontecer todas las cargas simultáneamente, se ha definido una serie de coeficientes de simultaneidad (ψ), según la tabla 4.9.

4.2



Sobrecarga de nieve



Figura 4.2
Zonas climáticas de invierno

4.2.1

Capacidad portante

I En situaciones de carga persistentes o transitorias

Todas las cargas permanentes adoptarán su valor de cálculo, mientras que las variables, se repartirán en una acción principal en su valor de cálculo y unas acciones concomitantes en sus valores de cálculo de combinación.

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

Tabla 4.8
Coeicientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

En este caso y los siguientes, se considerará la envolvente de iterar sucesivamente cada acción variable como principal.

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

		Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Sobrecarga de uso	Zonas residenciales (categoría A)	0,7	0,5	0,3
	Cubiertas transitables (categoría F)	según uso acceso		
	Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (categoría G)	0	0	0
Nieve	Altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
	Altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento		0,6	0,5	0

Tabla 4.9
Coeficientes de simultaneidad (ψ)

I En situaciones extraordinarias

Todas las cargas permanentes y la acción accidental adoptarán su valor de cálculo, mientras que las variables se repartirán en una acción principal en su valor de cálculo frecuente y unas acciones concomitantes en sus valores de cálculo casi permanente.

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

Si el efecto de la acción se considera favorable, el coeficiente de seguridad a adoptar será igual a cero, mientras que en caso desfavorable será la unidad.

Cuando la acción accidental sea originada por el sismo, todas las acciones variables se considerarán en su valor casi permanente.

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



Solución de cubierta de graderío

Aptitud al servicio

4.2.2

I En situaciones de acciones de corta duración.

Cuando los efectos pueden resultar irreversibles, los efectos de las acciones se determinan a partir de la combinación de acciones característica, con acciones permanentes y variable principal en valor característico y el resto de acciones variables en valor de combinación

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

En el caso que los efectos puedan considerarse reversibles, se considerará la combinación de acciones frecuente, con acciones permanentes en valor



característico, acción variable principal en valor frecuente y el resto de acciones variables en valor casi permanente.

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

I En situaciones de acciones de larga duración, la combinación a considerar se denomina casi permanente, con acciones permanentes en valor característico y variables en valor casi permanente.

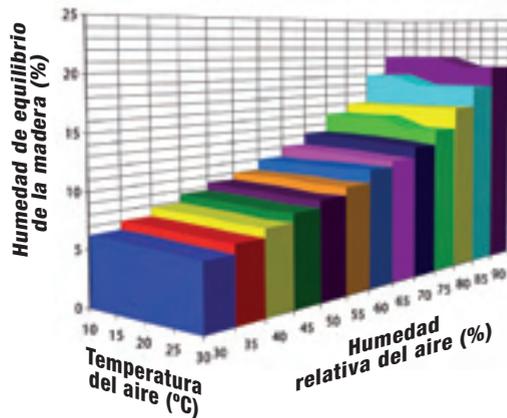
$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

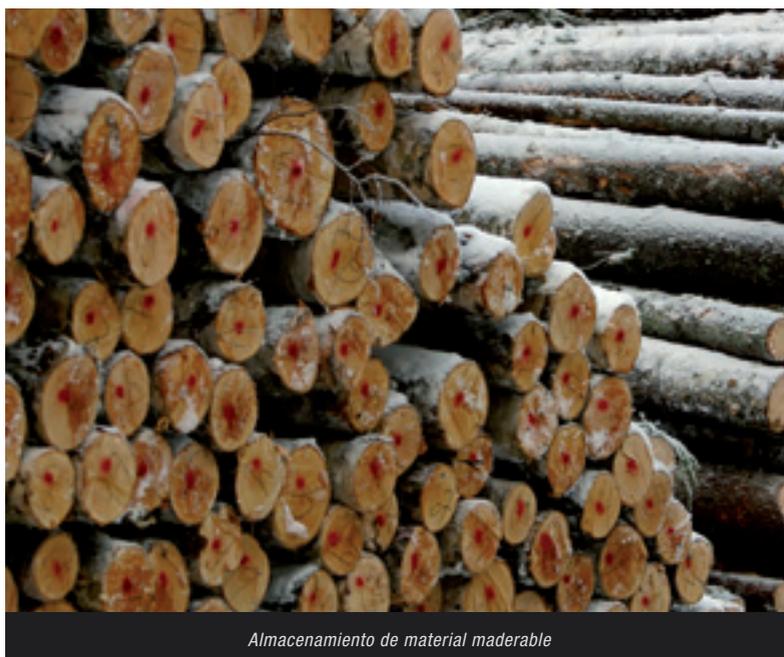
4.3

Factores que influyen

La madera como elemento estructural, presenta unas propiedades y características mecánicas, que dependen de factores como el contenido de

Figura 4.3
Humedad de equilibrio de la madera





Almacenamiento de material maderable

humedad y la duración de la carga. En ausencia de factores de degradación, la edad de la estructura no influye en la resistencia de sus materiales.

Contenido en humedad

4.3.1

En ambientes interiores, con humedad controlada y clase de servicio 1, la madera adquiere su equilibrio higroscópico, con un contenido de humedad aproximado del 12%. Propiedades mecánicas de la madera, como son la resistencia y el módulo de elasticidad, ven modificados sus valores con un aumento de la humedad.

Duración de la carga

4.3.2

Las estructuras de madera son sensibles a las cargas de larga duración, habitualmente cargas permanentes, que aún siendo de menor valor que otras, sus acciones pueden originar situaciones más desfavorables sobre los elementos resistentes. Esta característica por otro lado, proporciona un correcto comportamiento frente a cargas de viento o sismo.

En función de la humedad presente en el ambiente, se establecen las clases de servicio (Tabla 4.10), por otro lado hay que identificar la duración de la acción considerada (Tabla 4.11). Partiendo de ambos valores y en fun-



Estructura de madera

Tabla 4.10
Clases de servicio

Clase de servicio	Humedad en la madera	Humedad relativa del aire
CS 1	Correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	> 65% pocas semanas al año
CS 2	Correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	> 85% pocas semanas al año
CS 3	Condiciones ambientales que originen contenidos de humedad superiores a los correspondientes a la clase de servicio 2	

Tabla 4.11
Clases de duración de las acciones

Clase de duración	Duración aproximada acumulada de la acción en valor característico	Acción
Permanente	> 10 años	Peso propio, permanente
Larga	< 10 años > 6 meses	Apeos o estructuras provisionales no itinerantes
Media	< 6 meses > 1 semana	Sobrecarga de uso, nieve (altitud > 1000 m)
Corta	< 1 semana	viento, nieve (altitud < 1000 m)
Instantánea	algunos segundos	sismo

Tabla 4.12
Valores del factor k_{mod}

Material	Clase de Servicio	Clase de duración de la carga				
		Permanente	Larga	Media	Corta	Instantánea
Madera aserrada o madera laminada encolada	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

ción del tipo de material, se identifica un factor de modificación (k_{mod}) que disminuye o aumenta la resistencia del material (Tabla 4.12).

De acuerdo a dicha tabla, la resistencia del material frente a cargas permanentes, en una clase de servicio 1 ó 2, es un 30% inferior, que frente a cargas de corta duración. Si una combinación de acciones incluye cargas de diferente duración, se debe adoptar el valor correspondiente a la acción de menor duración.

Sección de la pieza

4.3.3

En algunos casos las características geométricas de las secciones utilizadas, también modifican los valores característicos de las propiedades de los materiales, como son la tracción o la flexión, y cuyos factores, así como las propiedades a las que afectan, se encuentran recogidos en la tabla 4.13.

Calidad de la madera

4.3.4

La calidad de la madera es fundamental para su clasificación de acuerdo a las clases resistentes definidas. Dicha caracterización se puede realizar en función de una inspección visual, que relacione los defectos (fendas, nudos, etc) de la madera con su resistencia, mientras que mediante ensayos, se determina el módulo de elasticidad en flexión, relacionándolo con las propiedades resistentes.

Una clasificación visual según la norma UNE 56.544, define nuestro pino radiata con dos calidades, una de ellas, la ME-1, asociada a una clase re-

Material	Factor	Propiedad modificada	Condición*	Ejemplos				
				h	< 40	70	100	≥ 150
Madera aserrada	$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \leq 1,3$	$f_{m,k}$ $f_{t,0,k}$	h < 150 mm	k_h	1,30	1,20	1,10	1,00
				h	< 240	300	400	≥ 600
Madera laminada encolada	$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \leq 1,3$	$f_{m,g,k}$ $f_{t,0,g,k}$	h < 600 mm	k_h	1,10	1,07	1,04	1,00
				$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} \leq 1$	$f_{t,90,g,k}$	V > 0,01 m ³	h	< 0,010
				k_{vol}	1,00	0,92	0,87	0,80

Tabla 4.13
Valores de los factores k_h y k_{vol}

*h, canto en flexión o mayor dimensión en tracción paralela

V, volumen de la zona considerada en la comprobación en tracción perpendicular

sistente de mayor calidad y la otra ME-2 de una clase resistente de menor calidad, como se puede apreciar en la tabla 4.14.

Cada país dispone de su normativa de referencia en lo que respecta a clasificación visual de la madera (DIN 4074, INSTA 142, etc.), que deberán ser consultadas para maderas procedentes del extranjero.

La clasificación visual requiere menos infraestructuras, pero presenta una mayor subjetividad que la caracterización mecánica. Los criterios de calidad de la norma UNE 56.544, se encuentran recogidos en la tabla 4.15.

Calidad	Clase Resistente
ME-1	C24
ME-2	C18

Tabla 4.14
Clase resistente del Pino Radiata de acuerdo a UNE 56.544

Tabla 4.15
Singularidades y clasificación visual

Para secciones cuya relación $h/b \leq 1/5$, las cuatro superficies serán consideradas como caras.

(1) Estos criterios sólo se consideran cuando se comercializa en húmedo.

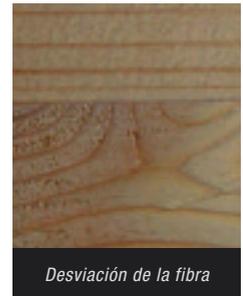
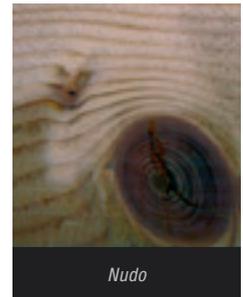
(2) Estos criterios no se considerarán cuando la clasificación se efectúa en húmedo.

(3) Referidas a un 20% del contenido en humedad.

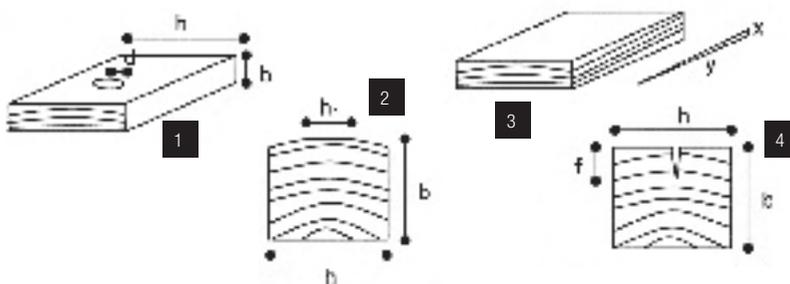
(4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.

Criterios de calidad según UNE 56.544

		ME-1	ME-2
Nudos	Sobre la cara (h)	$d < h/5$	$d < h/2$
	Sobre el canto (b)	$d < b/2$ $d < 30 \text{ mm}$	$d < 2 \cdot b/3$
Anillo de crecimiento ⁽¹⁾	Pino radiata	$\leq 10 \text{ mm}$	Sin limitación
	Pino pinaster	$\leq 8 \text{ mm}$	Sin limitación
	Pino laricio	$\leq 5 \text{ mm}$	Sin limitación
	Pino silvestre	$\leq 4 \text{ mm}$	Sin limitación
Fendas	De secado ^{(2) (3)}	$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
		Las fendas de secado sólo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza y 1 m	
	De rayo / heladura / abatimiento	No se admiten	No se admiten
Acebolladuras		No se admiten	No se admiten
Gemas	Longitud	$\leq L/4$	$\leq L/3$
	Dimensión relativa	$g \leq 1/4$	$g \leq 1/3$
Desviación de la fibra		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
Madera de compresión		Admitida en 1/5 de la sección o la superficie de la pieza	Admitida en 2/5 de la sección o la superficie de la pieza
Médula ⁽¹⁾	Clasificada en húmedo	No se admite	Se admite
	Clasificada en seco	Se admite	Se admite
Entrecasco		Se admiten si su longitud $< h/5$	
Bolsas de resina		Se admiten si su longitud $< h/5$	
Alteraciones biológicas	Muérdago (<i>V. Album</i>)	No se admite	No se admite
	Azulado	Se admite	Se admite
	Pudrición	No se admite	No se admite
	Galerías de insectos xilófagos	No se admiten	
Dimensiones y tolerancias		Según especificaciones de la norma UNE-EN 336	
Deformaciones máximas ^{(2) (3) (4)}	Curvatura de cara	10 mm (para L = 2 m)	20 mm (para L = 2 m)
	Curvatura de canto	8 mm (para L = 2 m)	12 mm (para L = 2 m)
	Alabeo	1 mm (por cada 25 mm de h) (para L = 2 m)	2 mm (por cada 25 mm de h) (para L = 2 m)
	Abarquillado	$h/25$	$h/25$



La mayoría de las singularidades presentes en la madera son resultantes del crecimiento natural del árbol, aunque también las hay debido al proceso de transformación al que se ven sometidos, que introducen discontinuidades en la constitución de la madera originando una disminución de sus propiedades mecánicas.



Algunas singularidades

- 1 Nudos
- 2 Gemas
- 3 Desviación de la fibra
- 4 Fendas

| **Nudos:** Se trata del defecto de mayor relevancia. Debido al crecimiento de las ramas del árbol, las fibras en los nudos y sus cercanías pierden el paralelismo respecto a la dirección longitudinal de la pieza.

| **Desviación de la fibra:** Pendiente de la dirección de la fibra respecto al eje de la pieza, debido a la conicidad del fuste del árbol y la presencia de nudos.

| **Fendas:** Defecto originado generalmente durante el secado de la pieza. Consisten en agrietamientos longitudinales cortando los anillos de crecimiento.

| **Acebolladuras:** Separación de los anillos de crecimiento adyacentes que originan agrietamientos longitudinales, debido a irregularidades en el crecimiento causados por heladas o incendios.

| **Gemas:** Falta de madera en las aristas de la pieza.

| **Anillos de crecimiento:** Se limita la anchura máxima de los anillos de crecimiento a fin de detectar la presencia de madera juvenil.

| **Otros:** Bolsas de resina, madera de reacción, madera juvenil, ataques de agentes bióticos (hongos e insectos xilófagos), etc.

Las fendas de secado sólo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: $1/4$ de la longitud de la pieza y 1m. ■

Comprobación de los

estados

límites

últimos | ELU

5

Comprobación de los estados límites últimos | ELU

Los estados límites últimos son aquellas situaciones que no deberán rebasarse para evitar colocar fuera de servicio la estructura, por superar su máxima capacidad resistente.

Se define como índice de agotamiento, el cociente que relaciona la tensión y la resistencia de cálculo para cada combinación de cargas.

Elementos flectados (vigas y tableros)

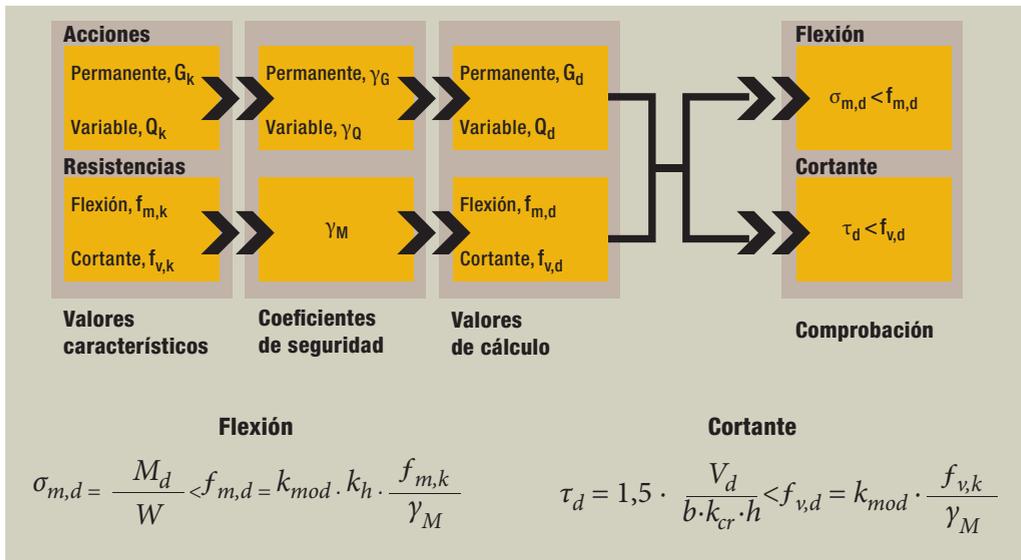
5.1

Generalmente, se traslada al estudio de correas, cabios, viguetas, vigas y similares.

Flexión simple

5.1.1

Se comprueban los esfuerzos de flexión y tangenciales originados en un elemento, perpendiculares a su eje longitudinal.



$k_{cr}=0,67$ para madera aserrada y laminada encolada y $k_{cr}=1$ para otros productos, debido a la influencia de las fendas

Flexión esviada

5.1.2

El caso de la flexión esviada, se da por ejemplo en las correas de cubierta, y en ella se debe cumplir que la suma de los índices de agotamiento respecto a cada eje principal de la sección, deberá ser inferior a la unidad.

Flexión esviada

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

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

En este caso, se incluye un factor k_m que tiene en cuenta, el efecto de redistribución de tensiones y la falta de homogeneidad del material en la sección transversal.

Para secciones rectangulares de madera maciza y madera laminada encolada, se puede reducir alternativamente el índice de cada eje en un 30%, es decir, $k_m = 0,7$. En el resto de los casos $k_m = 1,0$

5.1.3

Solicitaciones combinadas, flexotracción y flexocompresión

En la comprobación de secciones sometidas a esfuerzos de flexotracción, se sumará a los índices de agotamiento anteriores, el correspondiente a la tracción.

Flexotracción

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

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

En caso de solicitaciones de flexocompresión, el índice de agotamiento a sumar irá elevado al cuadrado, debido al proceso de plastificación que sufren las fibras antes de su agotamiento por compresión.

Flexocompresión

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

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

5.1.4

Vuelco lateral

Las vigas que no disponen de un adecuado arriostramiento (bien sea puntual o continuo), pueden llegar a desarrollar un fallo por vuelco lateral. Este

Vuelco lateral

$$L_{ef} = \beta_v \cdot L$$

$$C_e = \sqrt{\frac{L_{ef} \cdot h}{b^2}}$$

fenómeno se produce, cuando la sollicitación supera un valor crítico, que origina un desplazamiento y giro lateral en la cabeza comprimida de la sección.

Se define la longitud eficaz, como la longitud entre puntos de arrios-



Estructura de cubierta de madera en un edificio industrial

tramiento que impidan el vuelco, para obtener un coeficiente de esbeltez geométrica, que es función también de las dimensiones de la pieza.

Se define el factor de penalización k_{crit} , menor que la unidad, que se encuentra relacionado con la esbeltez relativa en flexión ($\lambda_{rel,m}$), que reduce la resistencia de cálculo de la sección, en función de la variación de este último.

$$\lambda_{rel,m} = 1,15 \cdot C_e \cdot \sqrt{\frac{f_{m,k}}{E_{0,k}}}$$

$$\begin{array}{ll} \lambda_{rel,m} < 0,75 & k_{crit} = 1,00 \\ 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,40 & k_{crit} = 1,56 - 0,75 \lambda_{rel,m} \\ \lambda_{rel,m} > 1,40 & k_{crit} = 1/\lambda_{rel,m}^2 \end{array}$$

$$i_m = \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} < 1$$

A modo de resumen de la formulación expuesta, se adjunta en la tabla 5.1 un listado que aporta el valor del coeficiente de vuelco lateral k_{crit} para vigas de directriz recta y sección rectangular, en función de la clase resistente de material y del coeficiente de esbeltez geométrica (C_e).

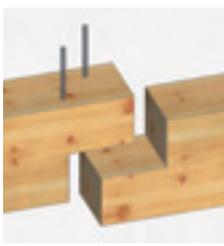
Tipo de carga y viga

	$\beta_v = L_{ef} / L$
	$\beta_v = 1,00$
	$\beta_v = 0,95$
	$\beta_v = 0,8/\alpha$ $\alpha = 1,35 - 1,4 \times (L - x) / L^2$
	$\beta_v = 2,00$
	$\beta_v = 1,20$
	$\beta_v = 1,70$
	$\beta_v = 0,40$
	$\beta_v = 0,25$

Los dos últimos casos de la tabla corresponden con situaciones en las que el vuelco está coaccionado en el centro de la viga.

Tabla 5.1
Coeficiente de vuelco lateral

Clase resistente	Coeficiente de esbeltez geométrica, C_e														
	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
C14	1,00	1,00	0,91	0,82	0,73	0,63	0,54	0,45	0,39	0,33	0,29	0,26	0,23	0,20	0,18
C16	1,00	1,00	0,91	0,82	0,73	0,64	0,54	0,46	0,39	0,34	0,29	0,26	0,23	0,20	0,18
C18	1,00	1,00	0,91	0,82	0,72	0,63	0,54	0,45	0,38	0,33	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18
C20	1,00	0,99	0,90	0,80	0,71	0,61	0,52	0,43	0,37	0,32	0,28	0,24	0,22	0,19	0,17
C22	1,00	0,98	0,88	0,78	0,69	0,59	0,49	0,41	0,35	0,30	0,26	0,23	0,21	0,18	0,16
C24	1,00	0,98	0,88	0,79	0,69	0,59	0,50	0,42	0,36	0,31	0,27	0,23	0,21	0,19	0,17
C27	1,00	0,97	0,87	0,77	0,67	0,57	0,48	0,40	0,34	0,29	0,26	0,23	0,20	0,18	0,16
C30	1,00	0,94	0,83	0,73	0,62	0,52	0,43	0,36	0,31	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14
C35	1,00	0,91	0,81	0,70	0,59	0,48	0,40	0,34	0,29	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13
C40	1,00	0,90	0,78	0,67	0,56	0,46	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13
C45	0,99	0,88	0,78	0,65	0,53	0,43	0,36	0,30	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12
C50	0,98	0,86	0,75	0,63	0,52	0,42	0,34	0,29	0,25	0,21	0,19	0,16	0,14	0,13	0,12
D30	1,00	0,94	0,83	0,73	0,62	0,52	0,43	0,36	0,31	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14
D35	1,00	0,91	0,81	0,70	0,59	0,48	0,40	0,34	0,29	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13
D40	1,00	0,90	0,78	0,67	0,56	0,46	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13
D50	1,00	0,90	0,79	0,68	0,57	0,46	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13
D60	1,00	0,90	0,79	0,68	0,57	0,46	0,38	0,32	0,28	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13
D70	1,00	0,90	0,79	0,68	0,57	0,47	0,39	0,33	0,28	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13
GL24h-c	1,00	1,00	0,96	0,87	0,79	0,70	0,62	0,53	0,45	0,39	0,34	0,30	0,26	0,24	0,21
GL28h-c	1,00	1,00	0,94	0,85	0,76	0,67	0,58	0,49	0,42	0,36	0,32	0,28	0,25	0,22	0,20
GL32h-c	1,00	1,00	0,92	0,83	0,74	0,65	0,56	0,47	0,40	0,35	0,30	0,26	0,23	0,21	0,19
GL36h-c	1,00	1,00	0,91	0,81	0,72	0,63	0,53	0,45	0,38	0,33	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18



Unión a media madera (modelizado)



Unión a media madera (modelizado)

En general, la esbeltez de los elementos flectados de madera aserrada suele ser baja, por lo que rara vez se presenta este fenómeno de inestabilidad. Mientras que en la madera laminada encolada, debido a las elevadas luces que alcanzan, combinado con la utilización de cantos de reducidos anchos, requiere la comprobación del vuelco lateral.



Unión a media madera (realizado)

Ejemplo de aplicación

5.1.5

Como aplicación práctica de la sistemática de cálculo planteada, se realiza la comprobación de un forjado de viguetas de madera maciza de pino radiata de las siguientes características:

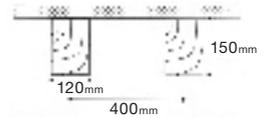
Datos de partida:

Clase resistente de la vigueta de pino radiata, correspondiente a una calidad ME-2 → C18

Clase de servicio → I por tratarse de un ambiente interior.

Longitud de cálculo → 4 metros (se corresponde con viguetas biapoyadas)

Entrevigado de tablero contrachapado de pino radiata → $e = 18\text{mm}$ ($\rho_{p,k} = 587\text{kg/m}^3$)



De los datos iniciales, se obtienen las cargas actuantes y las solicitaciones de los elementos resistentes:

Peso propio:

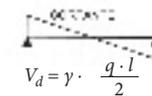
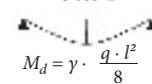
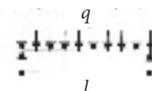
Tablero	→	$587\text{kg/m}^3 \cdot 0,018 \approx 0,1\text{KN/m}^2$
Acabados	→	$1,0\text{KN/m}^2$
Vigueta	→	$120\text{mm} \cdot 150\text{mm} \cdot 380\text{kg/m}^3 \approx 0,07\text{KN/m}$
Total	→	$(0,1\text{KN/m}^2 + 1,0\text{KN/m}^2) \cdot 400\text{mm} + 0,07\text{KN/m} = 0,51\text{KN/m}$

Sobrecarga de uso:

Total	→	$2\text{KN/m}^2 \cdot 400\text{mm} = 0,8\text{KN/m}$
-------	---	--

Las tensiones normales y tangenciales máximas, se localizan en el centro del vano para el caso de flexión, y en los apoyos para el caso de cortante.

Geometría de la sección a evaluar



I Flexión:

Teniendo en cuenta únicamente la carga permanente:

$$M_d = \gamma \cdot \frac{q \cdot l^2}{8} = 1,35 \cdot \frac{0,51 \cdot 4^2}{8} = 1,37\text{KN} \cdot \text{m}$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{120 \cdot 150^2}{6} = 450.000\text{mm}^3$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{1.370.000}{450.000} = 3,04\text{MPa}$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,60 \cdot 1,00 \cdot \frac{18}{1,30} = 8,3\text{MPa}$$

Teniendo en cuenta la carga total:

$$M_d = \gamma \cdot \frac{q \cdot l^2}{8} = 1,35 \cdot \frac{0,51 \cdot 4^2}{8} + 1,50 \cdot \frac{0,80 \cdot 4^2}{8} = 3,77\text{KNm}$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{120 \cdot 150^2}{6} = 450.000\text{mm}^3$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{3.770.000}{450.000} = 8,38\text{MPa}$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,80 \cdot 1,00 \cdot \frac{18}{1,30} = 11,0\text{MPa}$$

Los índices de agotamiento son de 0,36 y 0,76 para las dos combinaciones de carga consideradas, por lo que las solicitaciones son del 36% y del 76% de la resistencia del material, respectivamente.

I Cortante:

Se realizará la comprobación solamente para la carga total, dado que se aprecia que la combinación con cargas permanentes únicamente, no es más desfavorable.

$$V_d = \gamma \cdot \frac{q \cdot l}{2} = 1,35 \cdot \frac{0,51 \cdot 4}{2} + 1,50 \cdot \frac{0,80 \cdot 4}{2} = 3,77 \text{ KN}$$

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot k_{cr} \cdot h} = 1,5 \cdot \frac{3,770}{120 \cdot 0,67 \cdot 150} = 0,47 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,80 \cdot \frac{3,4}{1,30} = 2,09 \text{ MPa}$$

El índice de agotamiento en este caso y frente a las solicitaciones tangenciales presenta un valor de 0,22.



I Vuelco lateral:

Aunque en este ejemplo, el tablero del forjado sirve como arriostamiento de las viguetas, se va a realizar la comprobación correspondiente a modo de ejemplo.

$$L_{ef} = \beta_v \cdot L = 0,95 \cdot 4 = 3,8 \text{ m}$$

$$C_e = \sqrt{\frac{L_{ef} \cdot h}{b^2}} = \sqrt{\frac{3800 \cdot 150}{120^2}} = 6,29$$

$$\lambda_{rel,m} = 1,15 \cdot C_e \cdot \sqrt{\frac{f_{m,k}}{E_{0,k}}} = 1,15 \cdot 6,29 \cdot \sqrt{\frac{18}{6.000}} = 0,40 < 0,75 \Rightarrow k_{crit} = 1,00$$

El índice de agotamiento será idéntico a los ya calculados, puesto que no se supera el umbral crítico y el factor de penalización k_{crit} es igual a la unidad.

A título orientativo, considerando los mismos datos de partida pero para viguetas de madera laminada encolada, se deberían realizar las mismas comprobaciones modificando únicamente el factor reductor k_h y el coeficiente de seguridad γ_m .

Dado que la clase resistente mínima a emplear, GL24h o GL24c, presenta propiedades mecánicas superiores, a la clase C18 considerada en el ejemplo inicial, se podría adoptar una vigueta de menores dimensiones.



Material	Clase resistente	Factor reductor	Coeficiente de seguridad	Índice de agotamiento (carga total)		Vuelco
				Flexión	Cortante	
Madera aserrada	C18	$k_h = 1,00$	$\gamma_M = 1,30$	0,76	0,22	No procede
Madera laminada encolada	GL24h	$k_h = 1,10$	$\gamma_M = 1,25$	0,49	0,28	No procede

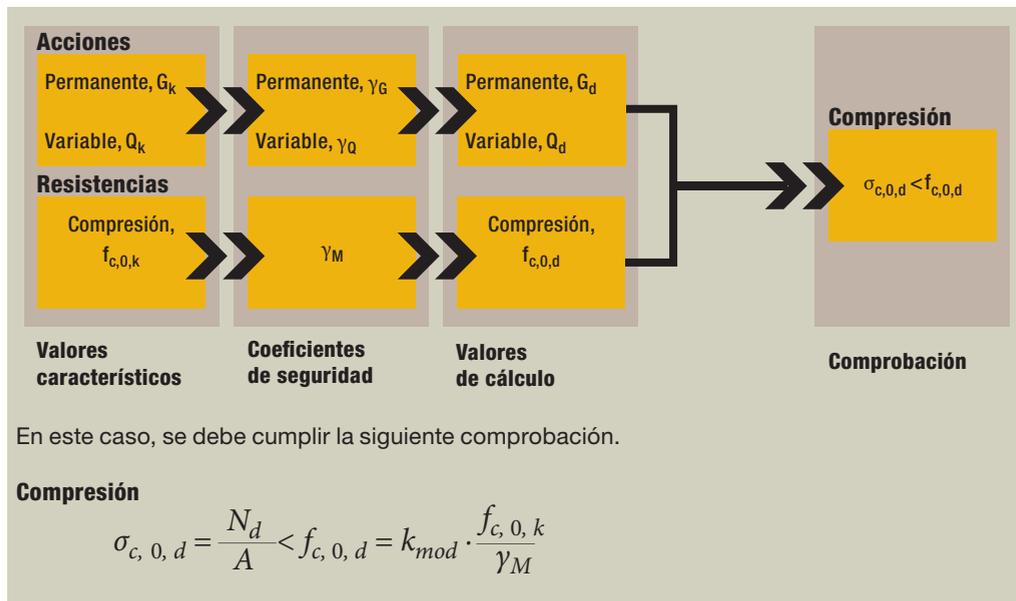
Elementos comprimidos (soportes)

5.2

Compresión simple

5.2.1

Para elementos comprimidos como suelen ser los soportes o pilares, se debe realizar la comprobación de los esfuerzos de compresión, en la dirección paralela a la fibra.



Solicitaciones combinadas

5.2.2

En relación a las solicitaciones combinadas, de flexotracción y flexocom-



presión en soportes, se deben realizar las mismas comprobaciones planteadas en el apartado 5.1.3.

5.2.3

Inestabilidad de soportes

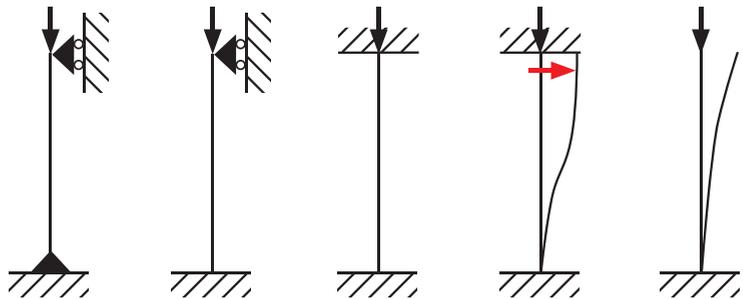
El fenómeno de pandeo de un elemento comprimido, viene originado por la esbeltez de la pieza, que añadido a las imperfecciones de rectitud de las mismas, la anisotropía del material, y otras posibles singularidades inherentes a la madera, pueden provocar el fallo bajo cargas muy inferiores a las previstas en función de la resistencia del material.

De cara a realizar el proceso de cálculo, se debe introducir un factor de minoración χ_c , que reduce la resistencia a compresión en función de la esbeltez de la pieza y la calidad de la madera.



Pasarela peatonal

$$L_k = \beta \cdot L$$



Valores recomendados	$\beta = 1,00$	$\beta = 0,85$	$\beta = 0,70$	$\beta = 1,50$	$\beta = 2,50$
Valores teóricos	$\beta = 1,00$	$\beta = 0,70$	$\beta = 0,50$	$\beta = 1,00$	$\beta = 2,00$

Inicialmente se debe definir la longitud de pandeo (L_k) en cada plano, siendo función de la longitud real del elemento considerado y de las restricciones existentes en sus extremos.

La esbeltez mecánica de la pieza, es función de la longitud de pandeo y del radio de giro de la sección. Partiendo de este valor se obtiene la esbeltez relativa.

$$\lambda = \frac{L_k}{i} \Rightarrow \lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,k}}}$$

Este valor de la esbeltez relativa plantea dos alternativas. Un primer caso, con un valor de la esbeltez inferior a 0,3 que implica que no resulta necesario seguir con la comprobación y un segundo caso, correspondiente a un resultado superior a 0,3 donde, se debe de obtener el factor k_v , mediante la siguiente expresión.

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

En la expresión del factor k_v los valores del coeficiente β_c son 0,2 para madera maciza y 0,1 para madera laminada encolada, debido a las excentricidades de las piezas.

Finalmente la obtención del coeficiente de pandeo (χ_c) se realiza en función de la esbeltez relativa y el factor k_v debiendo de realizar la comprobación de inestabilidad para compresión simple, en ambos planos principales de inercia.

$$\chi_c = \frac{1}{k_v + \sqrt{k_v^2 - \lambda_{rel}^2}}$$

$$\frac{\sigma_{c, 0, d}}{\chi_c \cdot f_{c, 0, d}} \leq 1$$

La tabla 5.2 recopila los valores del coeficiente de pandeo χ_c , en función de la clase resistente del material y la esbeltez mecánica λ para vigas de directriz recta y sección rectangular.

En situaciones de esfuerzos de flexocompresión, el índice de agotamiento aquí obtenido, se deberá sumar a los índices de flexión resultantes en uno o ambos planos, según sea el caso.

Tabla 5.2
Coeficientes de pandeo

Clase resistente	Esbeltez mecánica de la pieza, λ																		
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
C14	0,98	0,93	0,86	0,74	0,60	0,48	0,39	0,31	0,26	0,22	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,08	0,07
C16	0,99	0,94	0,87	0,77	0,64	0,51	0,41	0,34	0,28	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07
C18	0,99	0,94	0,88	0,78	0,65	0,53	0,43	0,35	0,29	0,24	0,21	0,18	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
C20	0,99	0,94	0,88	0,78	0,66	0,54	0,43	0,35	0,29	0,25	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
C22	0,99	0,94	0,88	0,78	0,66	0,53	0,43	0,35	0,29	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
C24	0,99	0,95	0,89	0,80	0,68	0,55	0,45	0,37	0,31	0,26	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08
C27	0,99	0,95	0,89	0,80	0,69	0,57	0,46	0,38	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08
C30	0,99	0,95	0,89	0,79	0,67	0,55	0,44	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
C35	0,99	0,95	0,89	0,79	0,67	0,55	0,45	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
C40	0,99	0,95	0,89	0,80	0,69	0,56	0,46	0,38	0,31	0,26	0,23	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08
C45	0,99	0,95	0,89	0,81	0,69	0,57	0,47	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09
C50	0,99	0,95	0,89	0,81	0,69	0,57	0,47	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,09
D30	0,99	0,95	0,88	0,79	0,67	0,55	0,44	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
D35	0,99	0,95	0,88	0,79	0,67	0,55	0,45	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
D40	0,99	0,95	0,89	0,80	0,69	0,56	0,46	0,38	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08
D50	1,00	0,96	0,91	0,83	0,73	0,61	0,50	0,42	0,35	0,29	0,25	0,21	0,19	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09
D60	1,00	0,96	0,92	0,85	0,76	0,65	0,54	0,45	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10
D70	1,00	0,97	0,93	0,87	0,79	0,69	0,58	0,49	0,41	0,35	0,30	0,26	0,22	0,20	0,17	0,16	0,14	0,13	0,11
GL24h	1,00	0,98	0,95	0,89	0,80	0,66	0,54	0,44	0,36	0,30	0,25	0,22	0,19	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09
GL28h	1,00	0,98	0,95	0,89	0,79	0,65	0,53	0,43	0,35	0,29	0,25	0,21	0,19	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09
GL32h	1,00	0,98	0,94	0,89	0,79	0,65	0,52	0,43	0,35	0,29	0,25	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09
GL36h	1,00	0,98	0,94	0,89	0,79	0,65	0,53	0,43	0,35	0,29	0,25	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09
GL24c	1,00	0,98	0,96	0,91	0,84	0,72	0,60	0,49	0,41	0,34	0,29	0,25	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11
GL28c	1,00	0,98	0,95	0,91	0,82	0,70	0,57	0,47	0,39	0,32	0,27	0,24	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10
GL32c	1,00	0,98	0,95	0,90	0,82	0,69	0,57	0,46	0,38	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10
GL36c	1,00	0,98	0,95	0,90	0,81	0,68	0,56	0,45	0,37	0,31	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10

5.2.4

Ejemplo de aplicación

A modo de ejemplo de aplicación, se realiza la comprobación de un pilar de un soportal que sustenta una elevada carga de fachada, fabricado en madera laminada encolada de pino radiata.

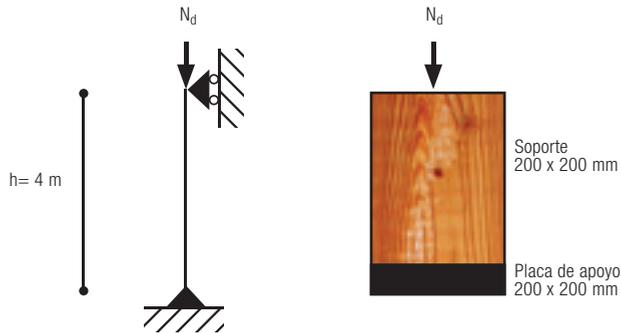
Datos de partida:

Clase resistente del soporte de pino radiata → GL24h

Clase de servicio → 3

Longitud de cálculo → 4 metros (soporte biarticulado)

Carga axial en servicio → Carga permanente $N_p = 175 \text{ KN}$ (inc. p.p. del soporte)
 Cargas variables $N_v = 40 \text{ KN}$



Compresión:

Sólo carga permanente:

$$\sigma_{c, 0, d} = \frac{N_d}{A} = \frac{1,35 \cdot 175.000}{200 \cdot 200} = 5,91 \text{ MPa}$$

$$f_{c, 0, d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c, 0, k}}{\lambda_M} = 0,50 \cdot \frac{24}{1,25} = 9,6 \text{ MPa}$$

Carga total:

$$\sigma_{c, 0, d} = \frac{N_d}{A} = \frac{1,35 \cdot 175.000 + 1,50 \cdot 40.000}{200 \cdot 200} = 7,40 \text{ MPa}$$

$$f_{c, 0, d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c, 0, k}}{\gamma_M} = 0,65 \cdot \frac{24}{1,25} = 12,48 \text{ MPa}$$

Los índices de agotamiento obtenidos son de 0,62 y 0,59 para las dos combinaciones de carga consideradas, por lo que las sollicitaciones son del 62% y del 59% de la resistencia del material, respectivamente. En este caso, la primera situación es más desfavorable aunque se considere una carga menor.

La comprobación de inestabilidad por pandeo, se debe realizar para el caso pésimo. Dada la simetría de la pieza y tratarse de un caso de compresión

sión simple, solamente se realizará la comprobación para una de las direcciones principales.

La longitud eficaz de pandeo se considera igual a la longitud de la pieza, puesto que el factor β_v para un pilar biarticulado es igual a la unidad.

$$\lambda = \frac{L_k}{i} = \frac{\beta_v \cdot L}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{1,00 \cdot 4.000}{\sqrt{\frac{1}{12} \cdot 200 \cdot 200^3}} = 69,28$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,k}}} = \frac{69,28}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{24}{9.400}} = 1,11$$

El valor de la esbeltez relativa supera el valor crítico definido (1,11 > 0,3), por tanto, será necesaria la comprobación de inestabilidad de pandeo por flexión.

$$k_v = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,11 - 0,3) + 1,11^2) = 1,16$$

La reducción por parte de este factor de la resistencia a compresión del material, aumenta el índice de agotamiento de la pieza.

$$\chi_c = \frac{1}{k_v + \sqrt{k_v^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{1,16 + \sqrt{1,16^2 - 1,11^2}} = 0,67$$

La sección más solicitada trabaja a un 92% de su capacidad portante máxima, cumpliendo por lo tanto, con las exigencias marcadas.

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_c \cdot f_{c,0,d}} = \frac{5,91}{0,67 \cdot 9,60} = 0,92$$

La utilización de madera aserrada sería en este caso desfavorable, no en lo referente a aspectos resistentes, para los que cumpliría con creces, si no debido a los efectos de inestabilidad.

Material	Clase resistente	Coeficiente de seguridad	Índice de agotamiento (carga permanente)	Pandeo	
			Compresión simple	χ_c	%
Madera laminada encolada	GL24h	$\gamma_M = 1,25$	0,62	0,67	92
Madera aserrada	C24	$\gamma_M = 1,30$	0,70	0,54	130

La madera aserrada presenta mayor probabilidad de imperfecciones en la rectitud de las piezas, frente a la madera laminada encolada, que al tratarse de un elemento prefabricado tiene un mayor control sobre sus características dimensionales y sus propiedades. ■

Comprobación de los

estados

límites de

servicio | ELS

6

Comprobación de los estados límites de servicio | ELS

Los estados límites de servicio, se encargan de establecer unos valores que aseguren el confort de los usuarios y la integridad de los elementos constructivos durante el periodo de uso de la estructura.

Deformaciones

El comportamiento de la estructura frente a las deformaciones, se comprueba con el fin de determinar si la estructura es lo suficientemente rígida para soportar las cargas a las que será sometida, sin que por ello se vea afectada su funcionalidad.

La deformación total de un elemento se compone de dos términos, la deformación instantánea δ_{ini} y la deformación diferida δ_{dif} . Respecto a la instantánea, se encuentra relacionada con una determinada disposición de una carga y su estimación se realiza en base a la formulación habitual de resistencia de materiales. Ejemplos habituales de esta formulación se recogen en el apartado 7 de la presente guía. A esta deformación, se debe sumar un segundo término denominado deformación diferida y que es debido a la fluencia del material en función de la duración de la carga aplicada.

$$\delta_{dif} = \delta_{ini} \cdot \Psi_2 \cdot k_{def}$$

$\Psi_2=1$
para cargas permanentes y según Tabla 4.9 para el resto.
En caso de combinación casi-permanente, el factor sólo se aplicará una vez

Para determinar la deformación a lo largo del tiempo, debido a este comportamiento reológico de la madera, se define un factor de fluencia k_{def} , cuyos valores aparecen reflejados en la tabla 6.1 y que tiene en cuenta el contenido de humedad de la madera y la existencia de cargas permanentes.

Material	Clases de servicio		
	1	2	3
Madera maciza	0,60	0,80	2,00
Madera laminada encolada	0,60	0,80	2,00

La estimación de la flecha de cargas concomitantes, se realiza sumando el resultado de cada acción, e incluyendo la deformación diferida en caso de cargas permanentes.

I Para garantizar la integridad de los elementos constructivos, cualquier pieza debe cumplir que la flecha obtenida una vez puesto en obra el elemento dañable, de acuerdo a cualquier combinación de acciones característica será:

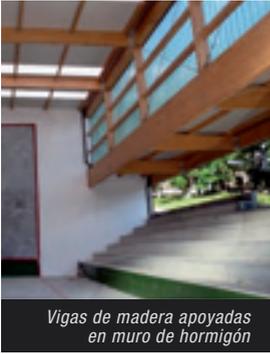
| L/500 para elementos que soporten tabiques frágiles (gran formato, rasillones, placas) o pavimentos rígidos sin juntas.

6.1



Vigas curvadas

Tabla 6.1
Factor de fluencia k_{def}



| L/400 para elementos que soporten tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas.

| L/300 para el resto de los casos.

I Para asegurar el confort de los usuarios, cualquier pieza deberá cumplir que la flecha obtenida debido a cargas de corta duración, de acuerdo a cualquier combinación de acciones característica será menor de L/350.

I La apariencia de la obra se considerará adecuada cuando cualquier pieza cumpla que la flecha obtenida, de acuerdo a cualquier combinación de acciones casi permanente sea menor de L/300.

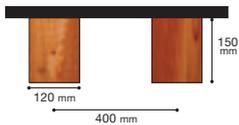
Estas limitaciones no eximen de la correcta disposición y ejecución de los elementos dañables.

A fin de simplificar la exposición de las deformaciones de elementos estructurales de madera, se ha obviado la debida al deslizamiento de los medios de unión.

6.1.1

Ejemplo de aplicación

Como aplicación práctica, se retomará el caso expuesto en el apartado 5.1.5, y se realizará la comprobación de las deformaciones.



Datos de partida:

Clase resistente de la vigueta de pino radiata, correspondiente con una calidad ME-2 → C18

Clase de servicio → 1

Longitud de cálculo → 4 metros (viguetas biapoyadas)

Tabiques ordinarios y pavimentos con juntas

Cargas → Cargas permanentes = 0,51 kN/m

Cargas variables = 0,80 kN/m

Para comprobar la integridad de los elementos constructivos, se considera la flecha activa originada por la carga variable y la derivada de la fluencia de la carga permanente.

$$\delta_1 = \frac{5 \cdot q_G \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \cdot (\Psi_2 \cdot k_{def}) + \frac{5 \cdot q_Q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \cdot (1 + \Psi_2 \cdot k_{def}) = \frac{5 \cdot 0,51 \cdot 4.000^4}{384 \cdot 9.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 150^3} \cdot 1 \cdot 0,60 + \frac{5 \cdot 0,80 \cdot 4.000^4}{384 \cdot 9.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 150^3} \cdot (1 + 0,30 \cdot 0,60) = 13,71 \text{ mm}$$

$$\delta_1 = 13,71 \text{ mm} \Rightarrow L / 292 > L / 400$$



No existen cargas de corta duración como pudieran ser las de nieve, pero se empleará la sobrecarga de uso como tal.

$$\delta_2 = \frac{5 \cdot q_Q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot 0,80 \cdot 4.000^4}{384 \cdot 9.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 150^3} = 8,78 \text{ mm} \Rightarrow L / 455 < L / 350$$





La deformación total obtenida, englobará el total de las cargas y las deformaciones diferidas que de ellas se deriven.

$$\delta_3 = \frac{5 \cdot q_G \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \cdot (1 + \Psi_2 \cdot k_{def}) + \frac{5 \cdot \Psi_2 \cdot q_Q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \cdot (1 + \Psi_2 \cdot k_{def}) = \frac{5 \cdot 0,51 \cdot 4.000^4}{384 \cdot 9.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 150^3} \cdot (1 + 1 \cdot 0,60) + \frac{5 \cdot 0,30 \cdot 0,80 \cdot 4.000^4}{384 \cdot 9.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 150^3} \cdot (1 + 1 \cdot 0,60) = 13,17 \text{ mm}$$

$$\delta_3 = 13,17 \text{ mm} \Rightarrow L / 304 < L / 300 \quad \checkmark$$

No se cumple la primera condición por lo que la sección no es correcta. Se deberían aumentar las dimensiones de la sección para proporcionar mayor inercia.

Despreciando el incremento de peso propio de la pieza, bastaría con aumentar 20 mm el canto de la viga, pasando de 150 a 170 mm, para reducir la deformación hasta límites admisibles.

$$\delta_1 = \frac{5 \cdot q_G \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \cdot (\Psi_2 \cdot k_{def}) + \frac{5 \cdot q_Q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \cdot (1 + \Psi_2 \cdot k_{def}) = \frac{5 \cdot 0,51 \cdot 4.000^4}{384 \cdot 9.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 170^3} \cdot 1 \cdot 0,60 + \frac{5 \cdot 0,80 \cdot 4.000^4}{384 \cdot 9.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 170^3} \cdot (1 + 0,30 \cdot 0,60) = 9,42 \text{ mm}$$

$$\delta_1 = 9,42 \text{ mm} \Rightarrow L / 424 < L / 400 \quad \checkmark$$

Casos de **flexión**
en vigas
de sección
constante

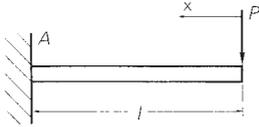
7

Vanos aislados

Momentos

Reacciones

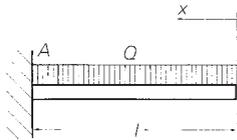
Deformación



Para AC
 $M_x = -P \cdot x$
 $M_{m\acute{a}x} = -P \cdot l$

$$A = P$$

$$f = \frac{Pl^3}{3EI_z}$$



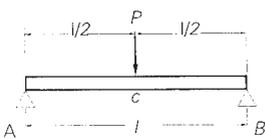
$$M_x = -\frac{Qx^2}{2l}$$

$$M_{m\acute{a}x} = -\frac{Q \cdot l}{2l}$$

$$A = Q$$

$$f = \frac{Ql^3}{8EI_z}$$

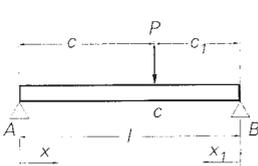
Q = carga total = q · l
 q = carga uniformemente repartida



Para AC
 $M_x = \frac{P \cdot x}{2}$
 $M_{m\acute{a}x} = \frac{P \cdot l}{4}$ en C.

$$A = B = \frac{P}{2}$$

$$f = \frac{Pl^3}{48EI_z}$$



En AC = $M_x = \frac{Pc_1x}{l}$
 En BC = $M_{x1} = \frac{Pcx_1}{l}$
 En C = $M_{m\acute{a}x} = \frac{Pcc_1}{l}$

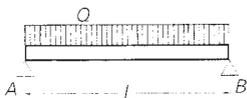
$$A = \frac{Pc_1}{l}$$

$$A = \frac{Pc}{l}$$

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{P \cdot c_1}{27E \cdot I_z \cdot l} \sqrt{3(l^2 - c_1^2)^3}$$

(c > c₁)

$$f = \frac{P \cdot c^2c_1^2}{3E \cdot I_z \cdot l} \text{ en C}$$



$$M_x = \frac{Qx}{2} \left(1 - \frac{x}{l}\right)$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{Ql}{8}$$

$$A = B = \frac{Q}{2}$$

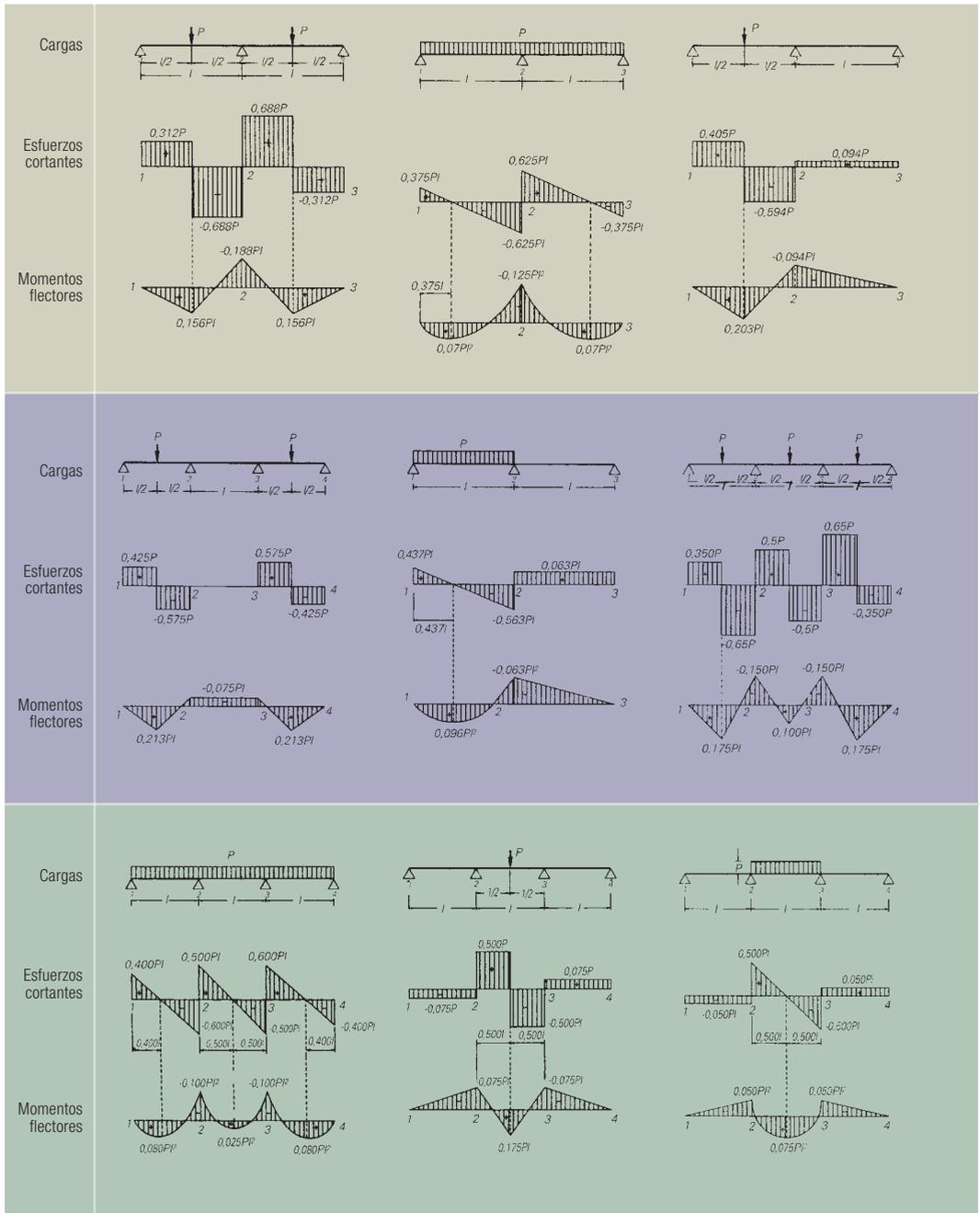
$$f = \frac{5}{384} \frac{Ql^3}{EI_z}$$

Vanos aislados

	Momentos	Reacciones	Deformación
	$M_{m\acute{a}x} = \frac{Q}{2} a \left(1 - \frac{a}{2l}\right)^2$ <p>Para $x = a \left(1 - \frac{a}{2l}\right)$</p>	$A = Q = \frac{2l - a}{2l}$ $B = Q = \frac{a}{2l}$ $Q = q \cdot a$	$f_{m\acute{a}x} = \frac{Ql^4}{10^3 El_z} \left(\frac{13,5734}{l} - \frac{0,5526}{a} \right)$
	$M_{m\acute{a}x} = \frac{Pl}{3}$	$A = B = P$	$f_{m\acute{a}x} = \frac{23}{648} \frac{Pl^3}{El_z}$
	$M_{m\acute{a}x} = \frac{Pl}{2}$	$A = B = \frac{3P}{2}$	$f_{m\acute{a}x} = \frac{19 Pl^3}{384 El_z}$
	$M_x = -\frac{Qx}{2} \left(\frac{3}{4} - \frac{x}{l} \right)$ $M_{m\acute{a}x} = M_A = -\frac{Ql}{8}$ $M_{m\acute{a}x} = M_C = \frac{9}{128} Ql$ $x_c = \frac{3}{8} l$	$A = \frac{5}{8} Q$ $B = \frac{3}{8} Q$	$f_{m\acute{a}x} = \frac{Q \cdot l^3}{185 El_z}$ $x = 0,4215 l$
	$M_a = -\frac{Pb(l^2 - b^2)}{2l^2}$ $M_c = \frac{Pa^2 b(2l + b)}{2l^3}$	$A = \frac{Pb^3}{2l^3} (3l^2 - b^2)$ $B = \frac{Pa^2}{2l^3} (3l - a)$	$f_c = \frac{P \cdot b^2 \cdot a^3}{12 El_z \cdot l^3} (4l - a)$
	$M_x = -\frac{Ql}{2} \left(\frac{1}{6} - \frac{x}{l} + \frac{x^2}{l^2} \right)$ $M_A = M_B = -\frac{Ql}{12}$ $M_C = +\frac{Ql}{24}$	$A = B = \frac{Q}{2}$	$f_{m\acute{a}x} = \frac{Ql^3}{384 El_z}$

Q = carga total = q · l
 q = carga uniformemente repartida

Vigas continuas



Pórticos con apoyos empotrados

Reacciones:

$$V_A = V_D = \frac{pl}{2}; H_A = H_D = \frac{pl^2}{4h(k+2)}$$

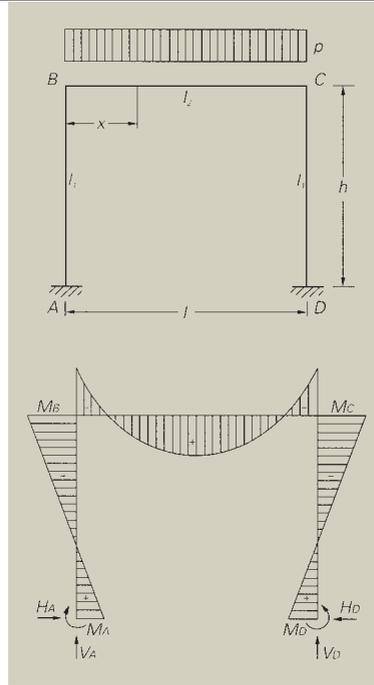
Momentos:

$$M_A = M_D = \frac{pl^2}{12(k+2)}; M_B = M_C = -\frac{pl^2}{6(k+2)}$$

En BC

$$M_x = \frac{px(l-x)}{2} - \frac{pl^2}{6(k+2)}$$

$$M_{máx+} = \frac{pl^2}{24} \cdot \frac{3k+2}{k+2} \text{ para } x = \frac{l}{2}$$



Pórticos con apoyos articulados

Reacciones

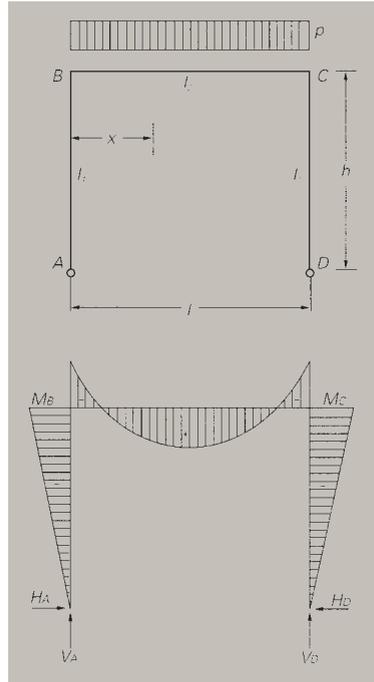
$$V_A = V_D = \frac{pl}{2}; H_A = H_D = \frac{pl^2}{2hN}$$

Momentos

$$M_B = M_C = -\frac{pl^2}{4N}$$

$$M_x = \frac{px(l-x)}{2} - \frac{pl^2}{4N}$$

$$M_{máx+} = \frac{pl^2}{8} - \frac{pl^2}{4N} \text{ para } x = \frac{l}{2}$$



$$k = \frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{h}{l} \quad (I_2 \text{ e } I_1 \text{ son momentos de inercia})$$

$$N = 3 + 2 \cdot k$$

Pórticos con apoyos empotrados

Reacciones:

$$V_A = V_B = \frac{p \cdot l}{2}$$

$$H_A = H_B = \frac{p \cdot l^2}{8} \cdot \frac{k(4h + 5f) + f}{k(h + f)^2 + 4k(h^2 + hf + f^2)}$$

Momentos:

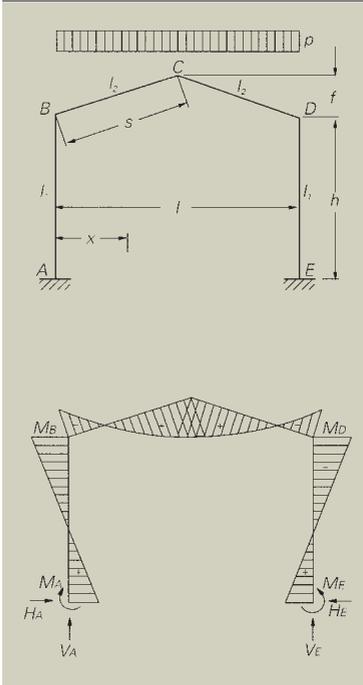
$$M_A = M_B = \frac{p \cdot l^2}{48} \cdot \frac{kh(8h + 15f) + f(6h - f)}{(kh + f)^2 + 4k(h^2 + hf + f^2)}$$

$$M_B = M_D = -\frac{p \cdot l^2}{48} \cdot \frac{kh(16h + 15f) + f^2}{(kh + f)^2 + 4k(h^2 + hf + f^2)}$$

$$M_C = \frac{p \cdot l^2}{8} + M_A - H_A(h + f)$$

En BC

$$M_X = M_A + V_A \cdot x - H_A \left(h + \frac{2xf}{l} \right) - \frac{px^2}{2}$$



Pórticos con apoyos articulados

Reacciones:

$$V_A = V_B = \frac{p \cdot l}{2}$$

$$H_A = H_B = \frac{p \cdot l^2}{32} \cdot \frac{8h + 5f}{h^2(3 + k) + f(3h + f)}$$

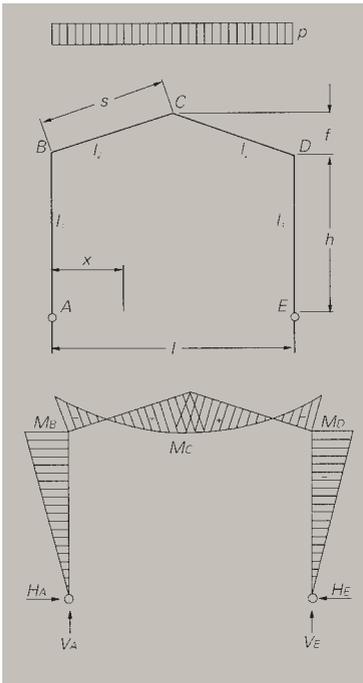
Momentos:

$$M_B = M_D = -\frac{p \cdot l^2 h}{32} \cdot \frac{8h + 5f}{h^2(3 + k) + f(3h + f)}$$

$$M_C = \frac{p \cdot l^2}{8} + \frac{f + h}{h} M_B$$

En BC y DC

$$M_X = p \frac{x(l - x)}{2} + \frac{M_B}{h} \left(h + \frac{2fx}{l} \right)$$



$$k = \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{h}{s}$$

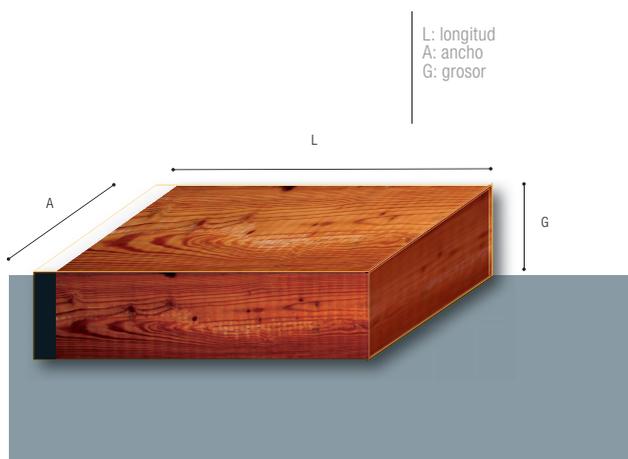
Secciones habituales

8

Secciones habituales

El empleo de medidas estándar en elementos estructurales de madera, mejora el rendimiento productivo y aumenta la competitividad en el mercado. Es por ello, que adaptarse a medidas fuera de los estándares establecidos, origina una pérdida de productividad, al aumentar el coste y tiempo de transformación.

Las dimensiones y longitudes de la madera aserrada, están condicionadas por las características del tronco que se emplea como materia prima. Estas dimensiones están por tanto limitadas, por las dimensiones del árbol originario.



Para elementos de estructuras comunes o singulares que requieran de longitudes o secciones de escuadría superiores, se deberá emplear la madera laminada encolada.

El grosor de las piezas realizadas mediante madera laminada encolada, depende obviamente del espesor de las láminas empleadas para conformar la sección.

En la tabla 8.1 se recogen las medidas de los anchos y grosores habitualmente más empleados para las piezas de madera aserrada y madera laminada encolada

Tabla 8.1
Anchos y grosores de piezas de madera

Material	Grosor total (mm)	Grosor láminas (mm)	Ancho total (mm)
Madera aserrada	150 - 200 - 250 - 300 - 350 - 400		150 - 200 - 250 - 300 - 350 - 400
Madera laminada encolada		21 - 27 - 33 - 34 - 40	80 - 100 - 120 - 140 - 160 - 180 - 200 - 220 - 240

En madera laminada encolada, se pueden alcanzar cantos de hasta 2 m y luces de 40 metros sin juntas. Para dimensiones mayores, se pueden realizar celosías y piezas compuestas. ■

Elementos auxiliares

9

Elementos auxiliares

En edificación, la madera, además de su uso estructural presenta un amplio abanico de posibilidades, con múltiples aplicaciones, desde las tradicionales carpinterías, o entarimados hasta sistemas de cerramiento de fachadas y cubiertas.

Los sistemas sándwich utilizados como cerramiento de cubiertas inclinadas, son una solución muy utilizada, ya que aportan frente a otras soluciones tradicionales los aislamientos térmicos y acústicos exigidos por el Código Técnico de la Edificación, mediante una solución fácil de montar que es capaz de proporcionar por otro lado, una amplia gama de acabados estéticos en su interior.

Esta solución consiste en un panel sándwich, formado por dos tableros (de madera, cemento, yeso...) que se encuentran unidos a un núcleo aislante, formando piezas que son fácilmente manejables y que se pueden unir a una estructura secundaria de correas de madera, mediante fijaciones sencillas, lo que aporta grandes ventajas desde el punto de vista técnico y económico.

Con este sistema se crea una superficie continua, que permite colocar sobre la misma, una amplia gama de materiales de acabado, desde láminas de impermeabilización, hasta rastreles para fijar las tejas.



Montaje de paneles sandwich en cubierta



Otras posibles aplicaciones de la madera son los cerramientos de fachada

Para cubiertas inclinadas según la zona climática

ZONA A:
Coeficiente de conductividad térmica: 0,50 W / m² K
Espesor del panel: 6 cm

ZONA B:
Coeficiente de conductividad térmica: 0,45 W / m² K
Espesor del panel: 6 cm

ZONA C:
Coeficiente de conductividad térmica: 0,41 W / m² K
Espesor del panel: 7 cm

ZONA D:
Coeficiente de conductividad térmica: 0,38 W / m² K
Espesor del panel: 8 cm

ZONA E:
Coeficiente de conductividad térmica: 0,35 W / m² K
Espesor del panel: 9 cm

NOTA: Los valores climáticos están referidos a la capital de provincia. Para poblaciones situadas a más de 200 m de diferencia de altura respecto a la capital de provincia debe consultarse la tabla de la página siguiente.



- A** Almería, Cádiz, Málaga, Las Palmas y Santa Cruz de Tenerife
- B** Tarragona, Castellón, Valencia, Alicante, Murcia, Palma de Mallorca, Córdoba, Sevilla y Huelva
- C** Ourense, Pontevedra, A Coruña, Oviedo, Santander, Bilbao, San Sebastián, Girona, Barcelona, Toledo, Cáceres, Badajoz, Jaén y Granada
- D** Lugo, Zamora, Salamanca, Palencia, Valladolid, Segovia, Guadalajara, Madrid, Cuenca, Ciudad Real, Albacete, Teruel, Zaragoza, Logroño, Vitoria-Gasteiz, Pamplona, Huesca y Lleida
- E** León, Ávila, Burgos y Soria

Zonas climáticas según severidades

SC (verano)

A4	B4	C4		E1
		C3	D3	
A3	B3	C2	D2	
		C1	D1	

SC (invierno)

Zonas climáticas tabuladas

Desnivel entre las localidades
y la capital de provincia

Zona CTE	< 200	200 a 400	400 a 600	600 a 800	800 a 1000	> 1000	Air Ref.
Albacete	D3	D2	E1	E1	E1	E1	677
Alicante	B4	C3	C1	D1	D1	E1	7
Almería	A4	B3	B3	C1	C1	D1	0
Ávila	E1	E1	E1	E1	E1	E1	1054
Badajoz	C4	C3	D1	D1	E1	E1	168
Barcelona	C2	C1	D1	D1	E1	E1	1
Bilbao	C1	D1	D1	E1	E1	E1	214
Burgos	E1	E1	E1	E1	E1	E1	861
Cádiz	A3	B3	B3	C1	C1	D1	0
Castellón	B3	C2	C1	D1	D1	E1	18
Ciudad Real	D3	D2	E1	E1	E1	E1	630
Córdoba	B4	C3	C2	D1	D1	E1	113
Cuenca	D2	E1	E1	E1	E1	E1	975
Girona	C2	D1	D1	E1	E1	E1	
Granada	C3	D2	D1	E1	E1	E1	754
Guadalajara	D3	D1	E1	E1	E1	E1	708
Huelva	B4	B3	C1	C1	D1	D1	50
Huesca	D2	E1	E1	E1	E1	E1	432
Jalón	C4	C3	D2	D1	E1	E1	436
La Coruña	C1	C1	D1	D1	E1	E1	0
Las Palmas	A3	A3	A3	A3	B3	B3	114
León	E1	E1	E1	E1	E1	E1	348
Lleida	D3	D2	E1	E1	E1	E1	131
Logroño	D2	D1	E1	E1	E1	E1	379
Lugo	D1	E1	E1	E1	E1	E1	412
Madrid	D3	D1	E1	E1	E1	E1	589
Málaga	A3	B3	C1	C1	D1	D1	0
Murcia	B3	C2	C1	D1	D1	D1	25
Ourense	C2	D1	E1	E1	E1	E1	327
Oviedo	C1	D1	D1	E1	E1	E1	214
Palencia	D1	E1	E1	E1	E1	E1	722
Palma Mallorca	B3	B3	C1	C1	D1	D1	1
Pamplona	D1	E1	E1	E1	E1	E1	456
Pontevedra	C1	C1	D1	D1	E1	E1	77
Salamanca	D2	E1	E1	E1	E1	E1	770
San Sebastián	C1	D1	D1	E1	E1	E1	5
Santa Cruz	A3	A3	A3	A3	B3	B3	0
Santander	C1	C1	D1	D1	E1	E1	1
Segovia	D2	E1	E1	E1	E1	E1	1013
Sevilla	B4	B3	C2	C1	D1	E1	9
Soria	E1	E1	E1	E1	E1	E1	984
Tarragona	B3	C2	C1	D1	D1	E1	1
Teruel	D2	E1	E1	E1	E1	E1	995
Toledo	C4	D3	D2	E1	E1	E1	445
Valencia	B3	C2	C1	D1	D1	E1	8
Valladolid	D2	E1	E1	E1	E1	E1	704
Vitoria	D1	E1	E1	E1	E1	E1	512
Zamora	D2	E1	E1	E1	E1	E1	617
Zaragoza	D3	D2	D2	E1	E1	E1	207



Aislamiento térmico aportado
por los paneles sandwich

Referencias

10

INVENTARIO FORESTAL CAE 2005

Departamento de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno Vasco

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LA MADERA DE PINUS RADIATA D. DON del País Vasco (España) acorde a las Modificaciones Normativas.

Hermoso, E.

Carballo, J.

Fernández-Golfín, J.I.

CONÍFERAS ESPAÑOLAS DE USO ESTRUCTURAL. PROPIEDADES DE LA MADERA ASERRADA

Fernández-Golfín, J.I.

Diez, M.R.

Revista AITIM 200 (pag. 72-75)

MADERA ASERRADA ESTRUCTURAL

AITIM

TABLEROS DE MADERA DE USO ESTRUCTURAL

AITIM

ESTRUCTURAS DE MADERA. DISEÑO Y CÁLCULO

AITIM

APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA MADERA DE PINO PINASTER

AA.VV. Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e o Desenvolvemento Tecnolóxico de Galicia (CIS Madeira)

CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE)

- DOCUMENTO BÁSICO DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL (DB SE)

Ministerio de Fomento (abril 2009)

CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE) - DOCUMENTO BÁSICO DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL, ACCIONES (DB SE-A)

Ministerio de Fomento (abril 2009)

CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE) - DOCUMENTO BÁSICO DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL, ESTRUCTURAS DE MADERA (DB SE-M)

Ministerio de Fomento (abril 2009)

EUROCÓDIGO 5

Proyecto de Estructuras de Madera. Parte 1-1. Reglas Generales y Reglas para la Edificación. Norma Experimental UNE-ENV.1995-0-1:1999

AENOR

UNE 56.544:2007, Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas

AENOR

UNE EN 338:2003, Madera estructural. Clases resistentes

AENOR

UNE EN 384:2004, Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad

AENOR

UNE EN 408:2004, Madera estructural. Madera estructural y madera laminada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas

AENOR

UNE EN 1912:2004, Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de especies y calidades visuales. Madera de coníferas AENOR

