

Índice

Capítulo 1: El material	13
1.1 Introducción	13
1.2 Nomenclatura y terminología de la madera	13
1.3 Especies de madera utilizadas en estructuras	15
Capítulo 2: Dimensiones y tolerancias	19
2.1 Introducción	19
2.2 Dimensiones comerciales	20
2.3 Dimensiones nominales y tolerancias	21
Capítulo 3: Contenido de humedad	23
3.1 Introducción	23
3.2 Contenido de humedad	23
3.3 Humedad de equilibrio higroscópico	25
3.4 Hinchazón y merma	27
3.5 Relación entre el contenido de humedad y las propiedades mecánicas	30
3.6 Relación entre el contenido de humedad y la degradación de la madera	30
3.7 Resumen	31
Capítulo 4: Clasificación	33
4.1 Introducción	33
4.2 Clasificación por aspecto	33
4.3 Clasificación estructural	34
4.4 Clasificación visual estructural	35
4.4.1 Singularidades de la madera (defectos)	35
4.4.2 Normas de clasificación visual estructural	36
4.4.3 Norma española de clasificación visual	37
4.5 Clasificación mecánica	44
Capítulo 5: Clases resistentes	47
5.1 Sistema de clases resistentes	47
5.2 Asignación de especie y calidad a clase resistente	49
Capítulo 6: Cálculo de la estructura	53
6.1 Normativa de cálculo	53
6.2 Bases de cálculo	53
6.2.1 Propiedades mecánicas de la madera. Valores característicos	53
6.2.2 Valores de cálculo de las propiedades mecánicas de la madera	53

6.2.3 Valores de cálculo de los efectos de las acciones	56
6.2.4 Inestabilidad por pandeo y vuelco lateral	57
6.2.5 La deformación y la fluencia	59
6.3 Comprobación de elementos estructurales	80
6.3.1 Vigas y viguetas	60
6.3.2 Correas	63
6.3.3 Piezas traccionadas	69
6.3.4 Piezas comprimidas	73

Capítulo 7: Comportamiento al fuego 79

7.1 Introducción	79
7.2 Reacción, resistencia y estabilidad al fuego	80
7.3 Especificaciones de la normativa	82
7.3.1 Estabilidad al fuego exigida a los elementos estructurales	82
7.3.2 Resistencia al fuego exigida	84
7.3.3 Clase de reacción al fuego exigida en la normativa	84
7.4 Tratamientos de protección contra el fuego	85
7.5 Cálculo de la estabilidad al fuego	86
7.5.1 Velocidad de carbonización	87
7.5.2 Sección reducida	87
7.5.3 Bases de cálculo	87
7.5.4 Comportamiento de las uniones	88
7.5.5 Ejemplo	88

Capítulo 8: Protección preventiva 93

8.1 Introducción	93
8.2 Clases de riesgo	93
8.3 Protección pasiva	94
8.4 Durabilidad natural e impregnabilidad	95
8.5 Productos protectores	96
8.6 Métodos de tratamiento	98
8.7 Elección del tipo de protección	100

Capítulo 9: Certificación y marcas de calidad 105

9.1 Introducción	105
9.2 Sello de calidad AITIM para madera aserrada de uso estructural	105
9.3 CTB Sawn Timber	107
9.4 Madera de coníferas procedente de los Estados Unidos de América	107
9.4.1 Western Wood Products Association (WWPA)	108
9.4.2 Southern Pine Inspection Bureau	109
9.5 Maderas de coníferas procedentes de Canadá	110
9.6 Madera de conífera procedente de los países nórdicos	111
9.7 Marcado CE	112

Anexos:

Anexo A: Especies de madera habituales en estructuras	115
Anexo B: Normas de clasificación extranjeras	141
Anexo C: Documentación del proyecto de una estructura de madera	157

Capítulo 5:

Clases resistentes

5.1 Sistema de clases resistentes

Con el fin de simplificar el proceso de cálculo se ha establecido en Europa un sistema de clases resistentes en el que se pueden encuadrar todas las especies de madera y calidades. El sistema de clases resistentes adoptado es el definido en la norma UNE EN 338 «Madera estructural. Clases resistentes». Este sistema distingue las siguientes clases:

Coníferas y chopo: se diferencian doce clases resistentes denominadas *C14*, *C16*, *C18*, *C20*, *C22*, *C24*, *C27*, *C30*, *C35*, *C40*, *C45* y *C50*.

Fronzosas: se diferencian seis clases resistentes denominadas *D30*, *D35*, *D40*, *D50*, *D60* y *D70*.

La letra *C* o *D* hace referencia a la inicial del término en inglés para denominar el grupo de especies (*C*: «coniferous» y *D*: «deciduous»).

El número que acompaña a la letra *C* o *D* es la resistencia característica a flexión expresada en N/mm^2 . El valor característico de una propiedad se define como el percentil 5º de la distribución. Este valor separa los datos de la muestra ensayada dejando sólo un 5 % de las piezas con valores menores y el resto, el 95 %, por encima. Es decir, la probabilidad de encontrar piezas con resistencia inferior al valor característico es el 5 %.

Así por ejemplo, una clase resistente *C18* tiene una resistencia característica a flexión de $18 N/mm^2$ (obtenida en ensayo normalizado), y de 100 piezas sólo 5 tendrían resistencias inferiores. Esta forma para definir la resistencia del material es común con otros productos estructurales como el hormigón y el acero.

En un segundo bloque se establecen las propiedades de rigidez, es decir los módulos de elasticidad. En estas propiedades se dan dos valores: el valor medio, que se utiliza para la determinación de las deformaciones de la estructura, y el valor característico asociado al igual que las resistencias al 5º percentil, que se utiliza para el cálculo de la inestabilidad de la estructura (pandeo y vuelco lateral).

Finalmente, se incluyen los valores de la densidad con un criterio similar al anterior. El valor medio, para el cálculo del peso propio de las piezas, y el valor característico definido como 5º percentil, para la determinación de la resistencia al aplastamiento en el cálculo de la capacidad de carga de los medios de unión. En la tabla 5.1 se recogen los valores de las propiedades mecánicas de cada clase resistente.

Especies coníferas y chopo

Especies frondosas

	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
Propiedades resistentes en N/mm²																			
Flexión	f_{rk}	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
Tracción paralela	f_{t0k}	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
Tracción perpendicular	f_{t90k}	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compresión paralela	f_{c0k}	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
Compresión perpendicular	f_{c90k}	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Cortante	f_{vk}	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²																			
Mód. elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20
Mód. elasticidad paralelo 5º percentil	$E_{0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Mód. elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Módulo de cortante medio	G	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Densidad en Kg/m³																			
Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900
Densidad media	ρ_{media}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080

Tabla 5.1. Clases resistentes de madera aserrada. Valores característicos.

5.2 Asignación de especie y calidad a clase resistente

La relación entre las calidades visuales y las clases resistentes queda recogida en la norma UNE EN 1912 «Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades y especies». En esa norma se establece la correspondencia entre las especies habituales en estructuras y su clase resistente. En la tabla 5.2 se recoge un resumen para las especies y procedencias más comunes.

Las normas de uso más frecuente en España y la denominación de sus calidades se relacionan a continuación:

• Alemania, DIN 4074, parte I (2001):	S13, S10 y S7
• Francia, NFB 52.001 (1996):	ST-I, ST-II y ST-III
• Países Nórdicos, INSTA 142 (1994):	T3, T2, T1 y T0
• EEUU, NGRDL (1996):	J&P (Sel, N°1, N°2 y N°3), SLF (Sel, N°1, N°2 y N°3), LF Const, LF Std y Stud
• Canadá, NLGA (1996):	J&P (Sel, N°1 y N°2), SLF (Sel, N°1 y N°2), LF Const, LF Std y Stud
• España, UNE 56.544 (2003):	ME-1 y ME-2

Las especies más habituales con sus nombres comerciales y botánicos se relacionan a continuación:

- abeto: *Abies alba* Mill.
- falso abeto: *Picea abies* Karst.
- pino silvestre: *Pinus sylvestris* L.
- pino pinaster: *Pinus pinaster* Ait.
- pino insignis: *Pinus radiata* D.Don.
- pino laricio: *Pinus nigra* Arnold.
- pino oregón (Douglas fir): *Pseudotsuga menziesii* Franco.
- pinos del sur (Southern pine): agrupa varias especies:
 - *Pinus echinata* Mill.
 - *Pinus elliotii* Engelm.
 - *Pinus palustris* Mill.
 - *Pinus taeda* L.
- SPF (Spruce-Pine-Fir): agrupa varias especies:
 - *Abies balsamea* Mill.
 - *Abies lasiocarpa* Nutt.
 - *Picea engelmannii* Engelm.
 - *Picea glauca* Voss.
 - *Pinus banksiana* Dougl., etc.
- abeto sitka: *Picea sitchensis*

NORMA Y PROCEDENCIA	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30
DIN 4074 abeto, falso abeto, pino silvestre (CNE)		S7			S10		S13
NFB 52.001 abeto, falso abeto (Francia)			ST-III		ST-II		ST-I
pino oregón, pino pinaster (Francia)			ST-III		ST-II		
INSTA 142 abeto, falso abeto, pino silvestre (NNE)	T0		T1		T2		T3
NGRDL pinos del sur (USA)	LF Std	J&P Nº3, SLF Nº3, Stud	LF Const	J&P Nº1 y Nº2, SLFNº1 y Nº2			J&P Sel, SLF Sel.
NLGA abeto sitka (Canadá)	J&P Nº1 y Nº2, SLF Nº1 y Nº2		J&P Sel, SLF Sel.				
NGRDL y NLGA pino oregón, SPF (USA y Canadá)	LF Const, Stud	J&P Nº1 y Nº2, SLFNº1 y Nº2			J&P Sel, SLF Sel		
UNE 56 544 pino silvestre (España)			ME-2			ME-I	
pino radiata, pino pinaster (España)			ME-2		ME-I		
pino laricio (España)			ME-2				ME-I

CNE: Europa Central, del Norte y del Este.

NNE: Europa Norte y Nordeste.

Tabla 5.2. Correspondencia entre clases resistentes y calidades para los casos más frecuentes.

Un ejemplo del esquema general para conocer la clase resistente de una determinada especie procedente de un país es el siguiente:

Especie	Procedencia	Norma	Calidad	Clase resistente
P. silvestre	España	UNE 56.544	ME 2	C 18
P. silvestre	Finlandia	INSTA 142	T I	C 18

Referencias bibliográficas:

Argüelles, R., Arriaga, F. y Martínez, J.J. (2000). Estructuras de madera. Diseño y cálculo. Editorial AITIM, Madrid.

Fernández-Golfín, J.I. y otros. (2003). Normas aplicables a las estructuras de madera maciza. Revista AITIM n° 221, págs. 40-43, Madrid.

Normativa:

Canadian Standard NLGA (1996). The National Grading Rules for Dimension Lumber.

DIN 4074 (2002). Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit. Nadelschnittholz.

French Standard NF B B 52001 (1996). Règles d'utilisation du bois dans les constructions: Classement visuel pour emploi en structure pour les principales essences résineuses et feuilles.

Nordic Grading Rules - INSTA 142 (1994). Nordic visual stress grading rules for timber.

UNE EN 338. Madera estructural. Clases resistentes.

UNE EN 1912. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades y especies.

UNE 56544 (2003). Clasificación visual de la madera para uso estructural: madera de coníferas.

USA Standard NGRDL (1996). The National Grading Rules for softwood Dimension Lumber.

Capítulo 4: Clasificación

4.1 Introducción

La clasificación de la madera y de sus productos derivados se realiza según diversos procedimientos en función del uso al que se destinan; hay reglas para la clasificación de la madera para pavimentos, para perfiles utilizados en la fabricación de ventanas y puertas y para revestimiento de paredes y techos.

En el caso de la madera aserrada existen normas y reglas de clasificación de la madera por su aspecto (para uso no estructural) y otras específicas para la madera con uso estructural. Aunque ambos sistemas se basan en la presencia y cuantía de las singularidades propias de la madera (nudos, gemas, anillos de crecimiento, desviación de la fibra, etc.), la interpretación y valoración de dichas singularidades es diferente. Por ejemplo, un nudo superficial puede tener una gran relevancia estética pero para un uso estructural podría ser despreciable. Este hecho pone de manifiesto que no es posible equiparar una determinada clase correspondiente a una clasificación decorativa con las clases definidas en la clasificación estructural.

Dentro de la clasificación estructural de la madera aserrada existen, básicamente, dos procedimientos. El más extendido es el constituido por las normas de clasificación visual; éstas se basan en la medición de los defectos de la madera (o singularidades) como los nudos, fendas, desviación de la fibra asignando la calidad de la pieza de acuerdo con las especificaciones de una norma. El otro procedimiento se denomina clasificación mecánica y se basa en un ensayo no destructivo y rápido con el que se obtiene el módulo de elasticidad de la pieza a partir del que se asigna a una clase resistente. En este texto se tratará, principalmente, el procedimiento visual.

4.2 Clasificación por aspecto (decorativa)

La madera aserrada destinada a la carpintería y el mueble se comercializa generalmente clasificada por su aspecto. Los criterios de clasificación están basados en la apariencia estética y los defectos de la madera se penalizan atendiendo al grado de apariencia en la superficie en lugar de por su influencia en la resistencia.

Con frecuencia estas reglas de clasificación varían con la especie y la procedencia. Por ejemplo en España se emplean reglas de clasificación para las siguientes especies:

- Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.): reglas con especificaciones que pueden variar ligeramente dependiendo de la procedencia o aserradero, con las siguientes calidades: especial, primera, segunda, tercera y cuarta (a veces llamada construcción).
- Pino Gallego (*Pinus pinaster* Ait.): reglas con las siguientes calidades: limpia, semilimpia, corriente (o normal) y encofrado (o segunda).

Para la madera aserrada de coníferas (pino silvestre y abeto) procedentes de los países nórdicos, se aplican unas reglas de clasificación que diferencian hasta seis calidades (I a VI) (revista AITIM nº 172, 1994). Generalmente, su comercialización se efectúa con las denominaciones siguientes que agrupan las calidades anteriores:

Comocae (o *UIS*): comprende las cuatro calidades superiores (I a IV). La denominación, tan poco afortunada, «comocae» responde al proceso de clasificación en el que se separan las calidades inferiores (V y VI) dejando «caer» de la sierra el resto de la madera. Sus aplicaciones típicas son los perfiles para ventanas, puertas, molduras y muebles.

Quintas (V): madera utilizada en revestimientos exteriores, muebles, tarima y en elementos estructurales.

Sawfaling, No clasificada o Quintas y mejor: bajo estas denominaciones se comercializan juntas las calidades Comocae y Quintas.

Sextas (VI): es la calidad inferior en la que el tamaño de los nudos ya no se limita y únicamente se exige una solidez general de la pieza. Su aplicación característica es el encofrado y usos auxiliares en la construcción.

Estas reglas de clasificación por el aspecto, con una terminología confusa, ha sido renovada y simplificada en una versión en la que sólo distingue cuatro calidades: A (con 4 subclases), B, C y D (Nordic timber - Grading rules, 1994). Las equivalencias con la versión antigua son las siguientes:

Calidad A = Comocae (I a IV)

Calidad B = Quintas

Calidad C = Sextas (calidad para exportación)

Calidad D = Sextas (calidad para consumo interno)

Sin embargo, todavía estas nuevas denominaciones no se han impuesto en el mercado.

Es cierto que la madera que se emplea en estructuras, corresponde en su mayoría a una determinada calidad por aspecto; por ejemplo para la madera de los países nórdicos la calidad Quintas y en algún caso Comocae; en la madera de pino silvestre, procedente de España, las calidades segundas y terceras. Pero en ningún caso esta correspondencia es garantizable ya que parte de criterios de clasificación diferentes.

En Europa se han elaborado las siguientes normas para la clasificación de la madera por el aspecto:

Coníferas: Piceas, abetos, pinos y pino oregón (UNE EN 1611-1).

Fronosas: Haya y roble (UNE EN 975-1), Chopos (prEN 975-2).

4.3 Clasificación estructural

La madera aserrada para uso estructural se clasifica mediante métodos visuales o mediante la

clasificación mecánica. En la clasificación visual se relaciona la resistencia con la existencia de defectos tales como nudos, desviación de la fibra, etc. En la mecánica se determina el módulo de elasticidad en flexión, que se relaciona con las propiedades resistentes.

El sistema de clasificación visual es el más extendido en los países europeos y en Norteamérica. Como se verá más adelante, cada país emplea una norma de clasificación diferente y adaptada de forma especial a las especies que le son propias. Con el fin de conseguir que todas las normas de clasificación tengan unas bases comunes se elaboró una norma marco europea, UNE EN 518, en la que se establecen los criterios comunes que deben reunir.

La clasificación mecánica requiere la utilización de una máquina de coste elevado pero tiene la ventaja de evitar la posible subjetividad a la hora de evaluar visualmente los defectos con lo que se obtienen mejores resultados. Las especificaciones de las máquinas de clasificación y planteamientos generales de la clasificación mecánica se establecen en la norma UNE EN 519.

Actualmente se está redactando un proyecto de norma, prEN 14081, en la que se refunden las dos normas citadas anteriormente.

4.4 Clasificación visual estructural

4.4.1 Singularidades de la madera (defectos)

Se denominan singularidades de la madera a las características naturales asociadas, por lo general, al crecimiento del árbol (nudos, fendas, gemas, desviación de la fibra, etc.); a veces, también se les denomina, con un carácter más peyorativo, defectos de la madera. Implican una disminución de las propiedades mecánicas debido a que suponen una falta de regularidad en la constitución anatómica de la madera.

Las principales singularidades que se tienen en cuenta a la hora de evaluar la calidad estructural son las siguientes:

Nudos: Están originados por las ramas del árbol y constituyen el defecto de mayor importancia. La pérdida de resistencia de la pieza se debe a la disminución de sección que representa el nudo (la dirección de la fibra en el nudo es sensiblemente perpendicular a la dirección de la fibra en la pieza) y a la desviación local de las fibras para sortear el nudo. Su influencia es mayor en la resistencia a la tracción que en la compresión.

Desviación de la fibra: La desviación se mide por la pendiente de la dirección de la fibra con respecto al eje de la pieza. Suele diferenciarse entre desviación general y desviación local (cuando afecta a una zona de longitud reducida). Su origen se encuentra en la conicidad del fuste del árbol y las distorsiones locales de la dirección de la fibra debidas generalmente a la presencia de nudos. Generalmente, la desviación local no se considera en la evaluación de la calidad de la madera.

Fendas: Son agrietamientos longitudinales que cortan perpendicularmente a los anillos de crecimiento, manifestándose habitualmente tanto en las caras como en las testas de las piezas. La mayoría

de las fendas se producen durante el secado de la pieza. En las piezas de grandes escuadrías pueden llegar a tener tamaños considerables.

Acebolladuras: Son separaciones entre anillo de crecimiento contiguos. Se originan por falta de adherencia entre capas de madera debidas a irregularidades en el crecimiento del árbol, como por ejemplo una helada o un incendio.

Anillos de crecimiento: La tasa de crecimiento de la madera se evalúa en la sección transversal de la pieza midiendo el espesor medio de los anillos. En algunos casos este valor se sustituye por una medición de la densidad de la madera. En ocasiones se suele hablar de la anchura máxima de anillos determinada en la parte más cercana a la médula, con el fin de detectar la presencia de la madera juvenil.

Gemas: Se denomina gema a la falta de madera que se puede presentar en las aristas de la pieza. Este defecto se produce cuando el aserrado intercepta la superficie del tronco del árbol.

Otras singularidades: Las normas de clasificación consideran otras singularidades como las bolsas de resina, la madera de reacción, la madera juvenil y la acción producida por ataques de origen biótico (hongos e insectos xilófagos).

También se consideran como singularidades las deformaciones que presentan las piezas, aunque no se suelen limitar de manera general en la clasificación. Estas deformaciones pueden ser las curvaturas de cara o de canto, el alabeo y el abarquillado. En algunas situaciones estas deformaciones pueden corregirse al fijarse al resto de la estructura, por lo que suele dejarse al acuerdo entre suministrador y comprador.

4.4.2 Normas de clasificación visual estructural

Como se ha comentado anteriormente, existe una gran diversidad de normas de clasificación visual de la madera. Prácticamente, cada país tiene su propia norma que establece un determinado número de calidades (normalmente varían entre 1 y 4 clases), y la forma de medir y evaluar los defectos.

Así, pueden citarse como ejemplos las siguientes normas de clasificación con sus correspondientes calidades:

Alemania:	DIN 4074 Parte I (1989):	S13, S10 y S7
Canadá:	NLGA (1996):	J&P (Select, N°1 y N°2), SLF (Sel., N°1 y N°2), LF Const., Stud.
España:	UNE 56544 (2003):	ME-I y ME-2
EEUU:	NLGRA (1996):	J&P (Select, N°1, N°2 y N°3), SLF (Sel., N°1, N°2 y N°3), LF (Const., Std), Stud.
Francia:	NF-B 52001 (1996):	ST-I, ST-II y ST-III
Países Nórdicos:	INSTA 142 (1994):	T3, T2, T1 y T0

En el proceso de unificación de la normativa europea no se consideró adecuado el establecimiento de una norma única de clasificación debido a que no parecía posible cubrir la gran variedad de

especies y dimensiones, además de la dificultad añadida de vencer la inercia de cada país.

Por este motivo, simplemente se redactó una norma «marco», que especifica los requisitos mínimos que deben cumplir las normas de clasificación particulares de cada país. Esta norma es la UNE EN 518 «Madera con uso estructural. Clasificación. Requisitos para las normas de clasificación visual». Esta norma será sustituida por la norma UNE-EN 14081-1.

En la práctica la clasificación visual exige el examen visual de las cuatro caras de cada pieza a clasificar. En un aserradero el tiempo destinado a la clasificación de una pieza de madera es del orden de 2 a 4 segundos. Evidentemente, no es posible un examen detallado y con precisión. Dado que el proceso queda garantizado por unas inspecciones externas del producto clasificado y marcado, el criterio del operario tiende a una asignación con un margen de seguridad de cierta entidad. De hecho, los clasificadores son operarios cualificados que requieren un periodo de formación previo y son muy valorados por las empresas.

Puede concluirse que la clasificación visual es un método sencillo que no requiere un equipo costoso y que resulta muy eficaz si se aplica correctamente. Sus inconvenientes radican en la posible pérdida de objetividad del operario que se mejora con el adiestramiento y control externo necesarios.

4.4.3 Norma española de clasificación visual

4.4.3.1 Generalidades

La norma de clasificación española es la UNE 56544. En ella se establece un sistema de clasificación visual aplicable a la madera aserrada de uso estructural de las principales especies de coníferas españolas y se asigna una clase resistente a cada una de las combinaciones de especie y calidad.

Esta norma es de aplicación a la madera aserrada de procedencia española de las siguientes especies:

- Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.)
- Pino laricio (*Pinus nigra* Arn.var. *Saltzmanii*)
- Pino gallego y pino pinaster de la meseta (*Pinus pinaster* Ait.)
- Pino insigne (*Pinus radiata* D. Don)

La clasificación se realiza atendiendo a los siguientes aspectos:

- a) Singularidades ligadas a la anatomía de la madera: nudos, fendas, desviación de la fibra, bolsas de resina, entrecasco, madera de reacción y juvenil y anillos de crecimiento.
- b) Singularidades ligadas al aserrado de las piezas: gemas y médula.
- c) Alteraciones de tipo biológico: hongos, muérdago e insectos xilófagos.
- d) Deformación de las piezas: curvatura de cara y de canto, abarquillado y alabeo.

La norma establece dos calidades: ME-1 y ME-2 (ME = Madera Estructural).

4.4.3.2 Contenido de humedad (madera húmeda y seca)

El contenido de humedad de la madera en el momento de la clasificación se expresará mediante

las siguientes clases de humedad:

- Madera húmeda: cuando la humedad media sea superior al 20% (25% para piezas de sección mayor que 200 cm²). La marca será WET GRADED.
- Madera seca: cuando la humedad media sea inferior o igual al 20% (25% para piezas de sección mayor que 200 cm²), pero sin que ninguna lectura individual exceda del 24% (29% para piezas de sección mayor que 200 cm²). La marca será DRY GRADED.

La humedad de la madera deberá quedar claramente establecida y marcada con las denominaciones anteriores por las razones que se indican a continuación.

En la madera clasificada en húmedo (marcada WET GRADED) pueden producirse, con posterioridad a la clasificación, fendas, deformaciones y cambios dimensionales que aparecerán gradualmente durante el proceso del secado.

De acuerdo con esto, cuando la madera se clasifica en húmedo, al no haber hecho aún acto de presencia, o al menos no en su total cuantía, tanto las fendas como las deformaciones, el comprador que adquiera madera marcada como madera húmeda deberá tener en cuenta que el clasificador no ha incorporado ni las especificaciones por fendas ni las exigencias de deformación máxima. Esto no ocurrirá si la madera se clasifica en seco (marcada DRY GRADED).

La evaluación de las fendas, deformaciones y, en su caso, densidad deberá efectuarse con un contenido de humedad menor o igual al 20 % (25 % en gran escuadría).

Es necesario tener también en cuenta que las especificaciones por tamaño de fendas se refieren a un contenido de humedad máximo del 20 %, motivo por lo cual una madera con contenido de humedad inferior a este valor podrá presentar fendas de tamaño ligeramente superior al especificado, sin que por ello deba ser considerada de calidad inferior.

Para evitar que el comprador de madera clasificada en húmedo tenga grandes pérdidas por deformaciones excesivas, la norma establece una forma indirecta de limitarlas en la primera calidad (ME-1). Para ello el clasificador deberá aplicar las especificaciones por tamaño máximo del anillo de crecimiento, con lo que se limitará la cantidad de madera juvenil presente en las piezas, causa principal de gran parte de las deformaciones durante el secado.

De acuerdo con todo lo anterior, las especificaciones por tamaño máximo de anillo sólo se tendrán en cuenta si se clasifica madera en húmedo y las de fendas y deformaciones si se efectúa dicha clasificación en seco.

4.4.3.3 Especificaciones

En este apartado se recogen las especificaciones de cada calidad estructural ordenadas por tipo de defecto incluyendo la forma de medición.

agotamiento un 3,6 %. Para rebajar este índice, que por otro lado supera la unidad en muy poco, podrían disponerse cordales o tirantillas que redujeran la flexión en el plano débil de la sección. En todo caso, puede observarse que la carga puntual puede dar lugar a situaciones más desfavorables que las cargas de nieve o de mantenimiento uniformemente repartidas.

6.3.3 Piezas traccionadas

6.3.3.1 Tracción simple (Pendolón)

Hay pocas piezas que trabajen simplemente a tracción axial. Un ejemplo típico es el pendolón. Esta pieza forma parte de las cerchas y sirve para realizar el encuentro entre los pares y las tornapuntas, figura 6.3. Equilibra la resultante vertical de los empujes de los pares con los de las tornapuntas, de tal forma que queda sometida exclusivamente a tracción.

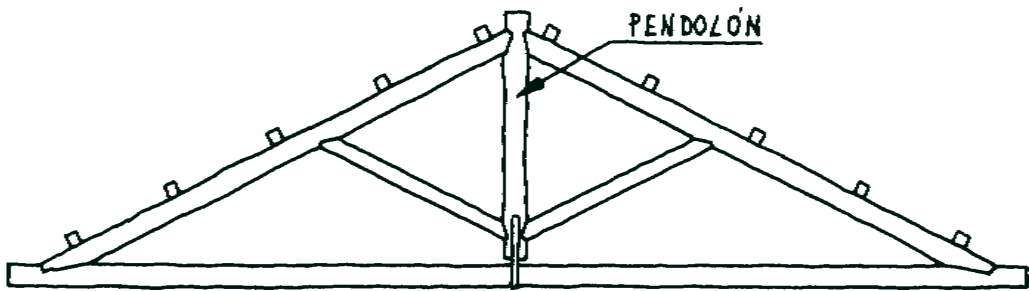


Figura 6.3. Pendolón de una cercha.

Por lo general está sobredimensionada por razones constructivas. El aspecto más crítico suele encontrarse en la capacidad de resistencia a cortadura en los cogotes de los extremos de la pieza. Los datos de este ejemplo son los siguientes:

Clase resistente: C22

Resistencia característica a tracción, $f_{t,0,k} = 13 \text{ N/mm}^2$

Resistencia característica a cortante, $f_{v,k} = 2,4 \text{ N/mm}^2$

Clase de servicio: 2

Sección del pendolón: $160 \times 220 \text{ mm}$ (sección neta: $160 \times 120 \text{ mm}$, figura 6.4)

El axil de tracción que resulta más desfavorable después del análisis de las situaciones de cálculo es $N_d = 26,24 \text{ kN}$ y corresponde a una combinación en la que la acción de duración más breve es de corta duración.

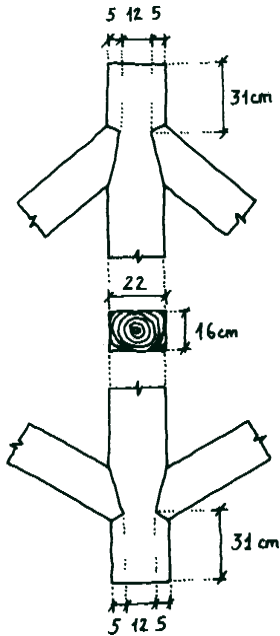


Figura 6.4 Detalle del encuentro del pendolón con los pares y las tornapuntas.

Las resistencias de cálculo a tracción y a cortante son las siguientes:

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \cdot f_{t,0,k} / \gamma_M = 0,90 \cdot 13 / 1,3 = 9,00 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot f_{v,k} / \gamma_M = 0,90 \cdot 2,4 / 1,3 = 1,66 \text{ N/mm}^2$$

La tensión de tracción axial debe obtenerse con el área neta de la sección, es decir, descontando los rebajes realizados,

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_{neta}} = \frac{26.240}{160 \cdot 120} = 1,36 \text{ N/mm}^2$$

Luego la comprobación será,

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{1,36}{9} = 0,15 < 1$$

La tensión de cortante sobre el plano de rotura por deslizamiento del cogote se obtiene repartiendo el axil entre las dos superficies,

$$\tau_d = \frac{26.240}{2 \cdot 160 \cdot 310} = 0,68 \text{ N/mm}^2$$

El índice de agotamiento por cortante será,

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{0,68}{1,66} = 0,41 < 1$$

Como puede observarse el agotamiento de la pieza es mayor por el cortante en el cogote que por la tracción.

6.3.3.2 Flexotracción (Tirantes de un sistema de par y nudillo)

Se trata de analizar el estado de agotamiento de un tirante de madera que equilibra los empujes horizontales de unas formas de par y nudillo, además de soportar un falso techo y la posibilidad de una carga de uso concentrada de 1,50 kN, figura 6.5.

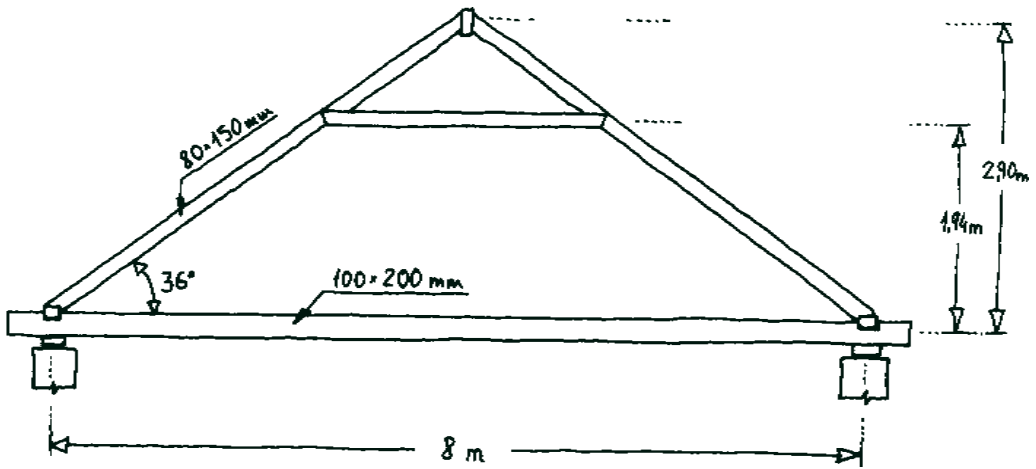


Figura 6.5. Tirantes de un sistema de formas de par y nudillo.

Clase resistente: C18

Clase de servicio: I

Sección del tirante: 100 x 200 mm

Se supone que la situación de cálculo más desfavorable tiene como carga de menor duración una acción de corta duración. Por tanto, las resistencias de cálculo a tracción axial, flexión y cortante, serán respectivamente,

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \cdot f_{t,0,k} / \gamma_M = 0,90 \cdot 11 / 1,3 = 7,61 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot f_{m,k} / \gamma_M = 0,90 \cdot 18 / 1,3 = 12,46 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot f_{v,k} / \gamma_M = 0,90 \cdot 2,0 / 1,3 = 1,38 \text{ N/mm}^2$$

Cada forma de par y nudillo provoca un empuje horizontal en el apoyo cuyo valor de cálculo es $H_d = 6 \text{ kN}$. Este empuje es resistido por el estribo que queda anclado en su encuentro con los tirantes, figura 6.6. Existe un tirante por cada tres formas, luego a cada tirante le corresponde un axil de tracción igual a 3 veces el empuje de una forma, $N_d = 18 \text{ kN}$.

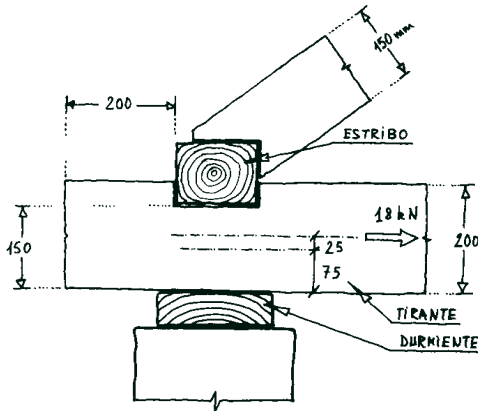


Figura 6.6. Encuentro entre el estribo y el tirante.

Este axil produce una tensión de tracción axial de valor,

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{18.000}{100 \cdot 200} = 0,90 \quad N / mm^2$$

El peso propio del tirante produce una flexión del mismo que alcanza un momento máximo en el centro del vano, cuyo valor de cálculo es $M_d = 0,90 \text{ kN}\cdot\text{m}$. La tensión de flexión que origina es la siguiente,

$$\sigma_{m,d} = \frac{0,90 \cdot 10^6}{100 \cdot 200^2 / 6} = 1,35 \quad N / mm^2$$

La comprobación del agotamiento en flexotracción en el centro del vano del tirante, se realiza mediante la siguiente expresión,

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,90}{7,61} + \frac{1,35}{12,46} = 0,22 < 1$$

En el apoyo la sección del tirante queda rebajada en una profundidad de 50 mm para alojar y trabar el estribo, figura 6.6. Por tanto, la sección neta será menor (100 x 150 mm) y el axil de tracción de 18 kN quedará desviado del centro de la sección neta una distancia de 25 mm.

El axil provocará una tensión de tracción de valor,

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{18.000}{100 \cdot 150} = 1,20 \quad N / mm^2$$

El descentramiento del axil produce un momento flector $M_d = 0,025 \text{ m} \cdot 18 \text{ kN} = 0,45 \text{ kN}\cdot\text{m}$, que provoca una tensión de flexión en la sección neta de valor,

$$\sigma_{m,d} = \frac{0,45 \cdot 10^6}{100 \cdot 150^2 / 6} = 1,20 \quad N / mm^2$$

Por tanto, la comprobación en esta sección de apoyo será,

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{1,20}{7,61} + \frac{1,20}{12,46} = 0,25 < 1$$

Se observa que se alcanza un agotamiento ligeramente superior al obtenido en el centro del vano del tirante.

Finalmente, se puede comprobar la resistencia a cortante del cogote que tiene una longitud de 200 mm. La tensión de cortante sobre el plano de rotura por deslizamiento del cogote se obtiene repartiendo el axil entre la superficie,

$$\tau_d = \frac{18.000}{100 \cdot 200} = 0,90 \quad N / mm^2$$

El índice de agotamiento por cortante será,

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{0,90}{1,38} = 0,65 < 1$$

Como puede observarse el agotamiento de la pieza es mayor por el cortante en el cogote que por la flexotracción.

6.3.4 Piezas comprimidas

6.3.4.1 Compresión simple (Pie derecho aislado)

Pie derecho de un soportal de una edificación de dos plantas, figura 6.7. Los datos son los siguientes,