

Dimensionado a flexión de vigas de madera según los criterios del DB SE-M del CTE

Apellidos, nombre	Guardiola Vllora Arianna (aguardio@mes.upv.es)
Departamento	M.M.C y Teoría de Estructuras
Centro	Escuela Técnica Superior de Arquitectura

1 Resumen de las ideas clave

El objeto de este artículo docente es mostrar al alumno el proceso de dimensionado a resistencia de las vigas de madera solicitadas a flexión siguiendo los criterios que establece el Documento Básico seguridad estructural, Madera, del Código Técnico de la Edificación (DB SE-M del CTE)

2 Introducción

En este artículo se presenta, al alumno que se enfrenta por primera vez a una asignatura de estructuras de edificación, los criterios básicos a aplicar en el caso del dimensionado de una viga de madera a flexión.

Para ello, además de introducir las peculiaridades y características de la madera como material estructural junto con el uso de la nomenclatura específica, con el objeto de estudiar un caso lo más real posible, se incide en la evaluación de acciones y el desarrollo de las distintas combinaciones de hipótesis de carga a considerar en un ejemplo de aplicación práctica.

Sin embargo, considerando que el lector al que va dirigido este documento posee un nivel básico de conocimientos relacionados con la resistencia de materiales, en el caso de las comprobaciones frente a estados límite últimos, éstas se han limitado a las comprobaciones de resistencia a flexión y cortante, omitiendo otras condiciones, tales como el pandeo lateral, por ser excesivamente complejas.

3 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento e intente desarrollar los ejercicios de aplicación práctica propuestos en el epígrafe 5, será capaz de:

- Reproducir el vocabulario específico relacionado con las propiedades de la madera estructural, en concreto la madera maciza y la madera laminada, así como la notación establecida por la norma.
- Reconocer los factores que afectan al comportamiento estructural de la madera, y determinar los coeficientes a utilizar para reflejar dicho comportamiento.
- Dado el esquema de carga correspondiente, dimensionar a resistencia una viga de madera siguiendo los criterios del DB SE-M del Código Técnico de la Edificación.
- Comprobar si el dimensionado realizado a partir de las condiciones de resistencia verifica las condiciones de deformación establecidas en el Documento Básico, seguridad estructural, del Código Técnico de la Edificación, estableciendo para ello las combinaciones de hipótesis de carga correspondientes.



4 Comprobaciones a realizar

4.1 Generalidades

Las expresiones contenidas en este apartado son de aplicación en la comprobación de solicitaciones en piezas de madera maciza o madera laminada de sección constante, con la dirección de las fibras sensiblemente paralela a su eje axial.

4.1.1 Tipos de madera estructural

La madera estructural objeto de este documento es la madera maciza y la madera laminada.

Dentro de la **madera maciza** se incluye la madera aserrada y la madera de rollizo, siendo las clases resistentes:

- a) Para coníferas y chopo: C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 y C50
- b) Para frondosas: D30, D35, D40, D50, D60, D70

La designación C hace referencia a coníferas y chopo, mientras que la letra D se refiere a las frondosas¹, indicando los números que siguen a continuación, el valor de la resistencia característica a flexión $f_{m,k}$, expresada en N/mm^2 .

En el epígrafe 4.2.1. figuran los valores de las propiedades de resistencia, rigidez y densidad asociados a cada una de las clases resistentes de madera maciza.

Las dimensiones de la madera aserrada no están normalizadas en el ámbito europeo, aunque parece que se van imponiendo las dimensiones con las que trabajan los países nórdicos debido a su gran cuota de mercado. En España la madera aserrada de pino silvestre y laricio para uso estructural generalmente se suministra en escuadrías superiores a 100x100 mm, siguiendo la gama de 100x150, 150x150, 150x200, 200x200 y 200x250. Las dimensiones para escuadrías superiores varían según la especie y deben consultarse a los aserraderos.

En cuanto a las clases resistentes de **madera laminada encolada**, para su uso en estructuras son:

- a) Madera laminada encolada homogénea: GL24h, GL28h, GL32h y GL36h.
- b) Madera laminada encolada combinada: GL24c, GL28c, GL32c y GL36c.

En las cuales las letras GL corresponden a madera laminada encolada (**G**lued **L**aminated timber), siendo el sufijo h para la homogénea y el c para la combinada. Finalmente, los números indican el valor de la resistencia característica a flexión $f_{m,g,k}$, expresada en N/mm^2 .

En el epígrafe 4.2.1 figuran los valores de las propiedades de resistencia, rigidez y densidad asociados a cada clase resistente de madera laminada encolada.

¹ La D corresponde a deciduous, que significa árbol de hoja caduca en Inglés

Respecto a las dimensiones de las piezas de madera laminada, al tratarse de un producto fabricado ex profeso sus dimensiones no están normalizadas.

Se debe tener en cuenta que la anchura de la pieza, b , depende de la anchura de las láminas que la conforman. Las más habituales son: 80, 100, 110, 130, 140, 160, 180, 200 y 220 mm, (siendo el máximo 280 mm) mientras que la altura es función del grueso de lámina empleado.

En la norma se indica un grueso de lámina máximo permitido de 45 mm para la clase de servicio 1 y 2; y de 35 mm (e inferior a 41) para la clase de servicio 3. La definición de clases de servicio se incluye en el epígrafe 4.2.2.

4.2 Bases de cálculo

4.2.1 Análisis estructural

El DB SE-M establece en su capítulo 5, dedicado al análisis estructural, que en el análisis de estructuras compuestas por barras (elementos en los que predomina una dirección sobre las otras con una relación mínima entre largo y canto de 6) y para el cálculo de solicitaciones globales (cortante, momento y axil), se considerará válida la hipótesis de que el material es isótropo, elástico y lineal.

Además, se indica que los valores a considerar para los módulos de elasticidad longitudinal E_d o transversal G_d para las comprobaciones de Estado Límite de Servicio y Estado Límite Último en régimen lineal (sin analizar la estabilidad global o local) son: $E_d = E_{medio}$ y $G_d = G_{medio}$

donde E_{medio} ; y G_{medio} son los valores medios según los datos del material, recogidos en las tablas 1,2, 3 y 4 del siguiente epígrafe.

4.2.2 Propiedades de los materiales:

- **Valor característico de la resistencia del material:** Como valores característicos de las propiedades de los materiales se tomarán los establecidos en las siguientes tablas (corresponden a las tablas E.1, E.2, E.3 y E.4 del anejo E del DB SE-M del CTE)

Tabla E.1 Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades			Clase de servicio					
Propiedades			C14	C16	C18	C20	C22	C24
Resistencia (característica) en N/mm^2								
- Flexión	$f_{m,k}$		14	16	18	20	22	24
- Tracción perpendicular.	$f_{t,90,k}$		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
- Compresión paralela	$f_{c,0,k}$		16	17	18	19	20	22
-Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$		2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5
- Cortante	$f_{v,k}$		3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
Rigidez, en kN/mm^2								
- Módulo de elasticidad	$E_{0,medio}$		7	8	9	9,5	10	11

Tabla 1. Propiedades de la madera aserrada, coníferas y chopos

Propiedades		D18	D24	D30	Clase Resistencia D35
Resistencia (característica), en N/mm²					
- Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	18	21	23	25
- Compresión perpendicular.	$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8,0	8,1
- Cortante	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0
Rigidez, kN/mm²					
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	10	11	12	12
- Módulo de elasticidad paralelo 5º percentil	$E_{0,k}$	8,4	9,2	10,1	10,1

Tabla 2. Propiedades de la madera aserrada, especies frondosas

Propiedades		GL24h	Clase Resistencia GL28h
Resistencia (característica), en N/mm²			
- Flexión	$f_{m,g,k}$	24	28
- Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5
- Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0
- Cortante	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2
Rigidez, en kN/mm²			
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,medio}$	11,6	12,6
- Módulo de elasticidad			

Tabla 3. Propiedades de la madera laminada encolada homogénea

Propiedades		GL24c	Clase Resistencia GL28c
Resistencia (característica), en N/mm²			
- Flexión	$f_{m,g,k}$	24	28
- Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	14	16,5
- Tracción perpendicular.	$f_{t,90,g,k}$	0,35	0,4
- Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	21	24
- Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,4	2,7
- Cortante	$f_{v,g,k}$	2,2	2,7
Rigidez, en kN/mm²			

Tabla 4. Propiedades de la madera laminada encolada combinada

• **Valor de cálculo de la resistencia del material:** Se define el valor de cálculo, X_d , de la resistencia del material como: $X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_M}$

Siendo X_k valor característico de la propiedad del material (tablas 1,2, 3 y 4)

k_{mod} factor de modificación de la resistencia (epígrafe siguiente)

γ_M coeficiente parcial de seguridad del material, de valor 1,3 para la madera maciza y 1,25 para la madera laminada encolada.

• **Factores que afectan el comportamiento estructural de la madera:**

Además, se deberá tener en cuenta que el comportamiento estructural de la madera se ve afectado tanto por la **duración de la carga** como por la clase de servicio. Para ello se definen las siguientes clases de duración de las acciones y clases de servicio:

1. Clases de duración de las acciones. Las acciones que solicitan al elemento considerado deben asignarse a una de las clases de duración de la carga establecidas en la tabla 5 (correspondiente a la tabla 2.2 del DB SE-M del CTE)

Clase de duración	Duración aproximada acumulada de la acción en valor característico	Acción
Permanente	más de 10 años	Permanente, peso propio
Larga	de 6 meses a 10 años	Apeos o estructuras provisionales no itinerantes
Media	de 1 semana a 6 meses	Sobrecarga de uso: nieve en localidades de > 1000 m
Corta	menos de una semana	Viento, nieve en localidades de < 1000 m
Instantánea	algunos segundos	Sismo

Tabla 5. Clases de duración de las acciones

2. Clases de servicio. Cada elemento considerado se debe asignar a una de las clases de servicio definidas en el artículo 2.2.2.2 del DB SE-M, en función de las condiciones ambientales previstas y recogidas en la tabla 6.

Clase de servicio 1	Se caracteriza por un contenido de humedad de la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ \text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 65% unas pocas semanas al año. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera expuestas a un ambiente interior.
Clase de servicio 2	Se caracteriza por un contenido de humedad de la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ \text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera a cubierto, pero abiertas y expuestas al ambiente húmedo, como es el caso de cobertizos y viseras, además de las piscinas cubiertas, debido a su ambiente húmedo.
Clase de servicio 3	Condiciones ambientales que conduzcan a contenido de humedad superior al de la clase 2. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera expuestas a un ambiente exterior sin cubrir.

Tabla 6. Clases de servicio de los elementos estructurales

La influencia de dichos factores (duración de las acciones y clase de servicio) se tiene en cuenta con un factor de modificación de la resistencia, k_{mod} .

Los valores correspondientes a la madera maciza y la madera laminada encolada, figuran en la tabla 7 (correspondiente a las dos primeras filas de la tabla 2.4 del DB SE-M del CTE), teniendo en cuenta que si una combinación de acciones incluye acciones pertenecientes a diferentes clases de duración, el factor k_{mod} , debe elegirse como el correspondiente a la acción de mas corta duración (artículo 2.3.3 DB SE-M del CTE)

Material	Clase servicio	Clase de duración de la carga				
		Permanente	Larga	Media	Corta	Instantánea
Madera maciza	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
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

Tabla 7. Valores del coeficiente K_{mod}

4.3 Estados límite últimos

Para el caso de piezas de sección constante, el paso de las solicitaciones de cálculo a tensiones de cálculo se podrá hacer según **las fórmulas clásicas de Resistencia de Materiales** salvo en las zonas en las que exista un cambio brusco de sección o, en general, un cambio brusco del estado tensional.

4.3.1 Fórmulas clásicas de Resistencia de Materiales

Considerando una sección rectangular, doblemente simétrica con los ejes centrados, como la de la figura 1, siendo el valor de las propiedades geométricas de la misma las siguientes:

$$A = b \cdot h; \quad I_{\max} = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

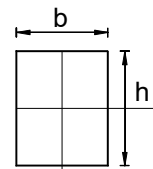


Figura 1. Sección (Guardiola A.)

Tensiones normales: Considerando que el sistema de referencia es principal de inercia, la distribución de tensiones normales responde a la expresión conocida como ley de Navier², siendo la tensión máxima correspondiente a la barra solicitada a flexión simple

igual a $\sigma_{m,d} = \frac{M_{Ed}}{W}$ donde M_{Ed} es el momento máximo de cálculo respecto del eje

horizontal de la figura 1 y $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$ es el módulo resistente elástico de la sección rectangular respecto al mismo eje.

Tensiones tangenciales: Considerando la sección rectangular de la figura 1, la distribución de tensiones se obtiene a partir del teorema de Collignon³, que para secciones rectangulares, admitiendo una distribución uniforme de las tensiones

tangenciales, es igual a: $\tau_d = \frac{3 \cdot V_{Ed}}{2 \cdot A}$

siendo V_{Ed} el máximo cortante solicitación de cálculo, paralelo al canto de la sección, y $A = b \cdot h$, el área de la sección rectangular.

² Ley de Navier: $\sigma = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{I_y} \cdot z + \frac{M_{z,Ed}}{I_z} \cdot y$

³ Teorema de Collignon: $\tau = \frac{3 \cdot S_y}{I_y \cdot b}$

4.3.2 Resistencia a flexión simple:

Según el artículo 6.1.6 del DB- SE M del CTE, se debe cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad \text{Ecuación 1. Condición de resistencia a flexión}$$

Siendo $\sigma_{m,d}$ la tensión normal debida a un momento flector de cálculo

$$f_{m,d} \quad \text{la resistencia de cálculo a flexión, igual a } f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M}$$

Nota: los valores de $f_{m,k}$ se pueden consultar en las tablas 1,2, 3 y 4; los de k_{mod} en la tabla 7 y los de γ_M en el epígrafe 4.2.1

4.3.3 Resistencia a cortante:

Según el artículo 6.1.8 del DB SE-M del CTE, para solicitaciones de cortante con una de las componentes paralela a la fibra (corte paralelo, como indica la figura 2) debe cumplirse la condición siguiente:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad \text{Ecuación 2. Condición de resistencia a cortante}$$

Siendo

τ_d tensión tangencial debida al cortante de cálculo.

$f_{v,d}$ resistencia de cálculo a cortante, igual a:

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

Resistencia de cálculo a cortante

Figura 2. Esfuerzo cortante paralelo (fig 6.5.a del DB SE-M)

Para la comprobación de cortante de piezas en flexión, debe tenerse en cuenta la influencia de las fendas utilizando un ancho eficaz de la pieza, $b_{ef} = k_{cr} \cdot b$ siendo k_{cr} igual 0,67 para madera maciza y madera encolada.

Nota: los valores de $f_{v,k}$ se pueden consultar en las tablas 1,2, 3 y 4; los de k_{mod} en la tabla 5 y los de γ_M en el epígrafe 4.2.1

4.4 Estados límite de servicio

Para el caso que nos ocupa, la comprobación del estado límite de servicio se limita a verificar que las máximas flechas verticales de los elementos solicitados a flexión no superan los límites establecidos en el Documento Básico, Seguridad Estructural del Código Técnico de la Edificación.

Flechas admisibles:

Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, para cualquier combinación de acciones característica, considerando sólo las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento (flecha instantánea), la flecha relativa es menor que:

- 1/500 en pisos con tabiques frágiles o pavimentos rígidos sin juntas
- 1/400 en pisos con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas
- 1/300 en el resto de los casos.

Siendo la expresión de la combinación de acciones característica para ELS igual a:

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

Las condiciones anteriores deben verificarse entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos.

Nota: Para la obtención de las flechas verticales se utiliza el módulo de deformación $E_d = E_{medio}$ tal y como indica el artículo 5.1 del DB SE-M del CTE.

4.5 Ejemplo de aplicación

Dada la viga de la figura 3, de sección rectangular de $200 \times 250 \text{ mm}$, considerando que forma parte de un forjado interior, y teniendo en cuenta las combinaciones de hipótesis de carga de la figura, se pide comprobar el predimensionado a resistencia y deformación considerando que se trata de madera aserrada de clase resistente D 60.

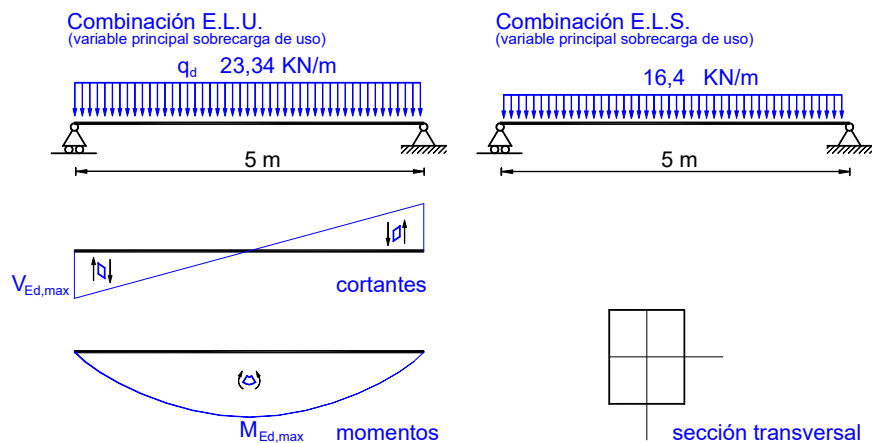


Figura 3. Combinaciones de hipótesis de carga y solicitaciones (Guardiola A.)

1. Cálculo de solicitaciones:

$$M_{Ed,max} = \frac{q_d \cdot L^2}{8} = \frac{23,34 \cdot 5^2}{8} = 72,94 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{Ed,max} = \frac{q_d \cdot L}{2} = \frac{23,34 \cdot 5}{2} = 58,35 \text{ kN}$$

2. Propiedades de la sección

$$A_{ef} = 0,67 \cdot 200 \cdot 250 = 33.500 \text{ mm}^2$$

Para tener en cuenta la influencia de las fendas, $b_{ef} = 0,67 \cdot b$ en madera maciza

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{200 \cdot 250^3}{12} = 260 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{200 \cdot 250^2}{6} = 2.083.333 \text{ mm}^3$$

3. Comprobaciones de resistencia.

- Resistencia a flexión:

Condición: $\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$

Siendo $\sigma_{m,d} = \sigma_{max} = \frac{M_{Ed,max}}{W} = \frac{72,94 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}}{2.083.333 \text{ mm}^3} = 35,01 \text{ N/mm}^2$

$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M}$ donde $k_{mod} = 0,8$ (clase de servicio 1) y teniendo en cuenta

que cuando una combinación de acciones incluye acciones pertenecientes a diferentes clases de duración, el factor k_{mod} , debe elegirse como el correspondiente a la acción de mas corta duración, siendo en este caso la sobrecarga de uso, de duración media y $k_{mod} = 0,80$

$\gamma_M = 1,30$ al ser madera aserrada

$f_{m,k} = 60 \text{ N/mm}^2$ para madera D60

Sustituyendo y operando $f_{m,d} = 0,80 \cdot \frac{60}{1,30} = 36,92 \text{ N/mm}^2$

Como $\sigma_{m,d} = 35,01 \text{ N/mm}^2 < f_{m,d} = 36,92 \text{ N/mm}^2$ cumple a resistencia a flexión.

- Resistencia a cortante

Condición: $\tau_d \leq f_{v,d}$

Siendo $\tau_d = \tau_{med} = \frac{3 \cdot V_{d,max}}{2 \cdot A_{ef}} = \frac{3 \cdot 58,35 \cdot 10^3 \text{ kN}}{2 \cdot 33.500 \text{ mm}^2} = 2,61 \text{ N/mm}^2$

$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M}$ donde $k_{mod} = 0,8$

$\gamma_M = 1,30$ al ser madera aserrada

$f_{v,k} = 4,5 \text{ kN/m}^2$ para madera D60

Sustituyendo y operando $f_{v,d} = 0,80 \cdot \frac{4,5}{1,30} = 2,76 \text{ N/mm}^2$

Como $\tau_d = 2,61 \text{ N/mm}^2 < f_{v,d} = 2,76 \text{ N/mm}^2$ cumple a resistencia a cortante

4. Comprobación de deformación.

Condición $\delta_{max} \leq \frac{L}{400} = \frac{5000}{400} = 12,5 \text{ mm}$

Siendo

$\delta_{max} = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot 16,4 \cdot 5000^4}{384 \cdot E \cdot I}$,

para una viga biarticulada con carga uniformemente repartida, donde $q = 16,4 \text{ kN/m} \equiv 16,4 \text{ N/mm}$ para ELS y $E_d = 17 \text{ kN/mm}^2$ (tabla 2)



$$\delta_{max} = \frac{5 \cdot 16,4 \text{ N/mm} \cdot 5000^4 \text{ mm}^4}{384 \cdot 17.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 260 \cdot 10^6 \text{ mm}^4} = 30 \text{ mm}$$

Como $\delta_{max} = 30 \text{ mm} > 12,5 \text{ mm}$ NO cumple la condición de deformación.

Habría que disponer una viga con una inercia al menos:

$$\frac{5 \cdot 16,4 \text{ N/mm} \cdot 5000^4 \text{ mm}^4}{384 \cdot 17.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 12,5} = 628.063.725 \leq I \text{ mm}^4 \text{ (por ejemplo 335x220)}$$

5 Conclusiones

A lo largo de este documento se han consultado las tablas de propiedades características de la madera maciza y laminada; se han obtenido los valores de resistencia de cálculo y se ha resuelto un ejemplo de aplicación práctica.

Con objeto de consolidar los conceptos aprendidos, se propone al alumno dimensionar las viguetas de madera del forjado analizado (forjado interior) con madera aserrada de clase resistente D 60, considerando que tienen 4 metros de luz, y que las cargas a considerar para la combinación de acciones de ELU y ELS son 3,5 kN/m y 2,46 kN/m respectivamente.

6 Bibliografía

6.1 Normativa:

[1] DB-SE "Documento Básico seguridad estructural" y DB SE-M "Documento Básico seguridad estructural, Maderas" del Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento. 2006. <http://www.codigotecnico.org/web/>

6.2 Referencias de fuentes electrónicas:

[2] Queipo de Llano Moya, J y otros . "Guía de construir con madera" Edita: construir con madera CcM. <http://www.confemadera.es/rs/99/d112d6ad-54ec-438b-9358-4483f9e98868/dc5/filename/conceptos-basicos.pdf>

[3] "Estandarización de medidas y clasificaciones de madera aserrada de coníferas" Edita Confemadera. <http://www.confemadera.es/rs/36/d112d6ad-54ec-438b-9358-4483f9e98868/dae/filename/estandarizacion-madera-aserrada.pdf>

6.3 Solución al problema propuesto

Por resistencia a flexión hace falta $W > 189.600 \text{ mm}^3$

Por resistencia a cortante hace falta $A_{ef} > 3.804 \text{ mm}^2$

Por condiciones de deformación hace falta una inercia $I > 48.235.294 \text{ mm}^4$