

# COMPROBACIÓNS A REALIZAR NO CÁLCULO DUN FORXADO

## 1. CÁLCULO DA DEFORMACIÓN

Ecuación simplificada (sen considerar a influencia do esforzo cortante para estimar o valor da frecha inicial para cargas uniformes:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I}$$

Ecuación simplificada (sen considerar a influencia do esforzo cortante) para estimar o valor da frecha inicial para unha carga puntual P actuando no centro do vano:

$$f = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

q: valor da carga permanente.

P: valor da carga puntual.

l: lonxitude da peza.

E: módulo de elasticidade,  $E_{0,m}$

I: momento de inercia da sección media. Para unha sección rectangular:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$W_1$ : frecha da viga debida ás accións permanentes.

$$W_1 = f_p$$

$W_2$ : frecha da viga debida aos efectos de longa duración das accións permanentes.

$$W_2 = f_p \cdot k_{def}$$

$k_{def}$ : factor de deformación (SE-M Táboa 5.1).

$W_3$ : frecha debida ás cargas variables.

$$W_3 = f_v$$

$W_{act}$ : frecha activa, deformación que considera a deformación causada pola fluencia do permanente ( $W_2$ ) e a causada polas cargas variables ( $W_3$ ).

$$W_{act} = W_2 + W_3$$

$W_{max}$ : frecha máxima, deformación que considera a deformación debida ás cargas permanentes considerando a súa fluencia e a deformación debida ás cargas variables considerando a súa fluencia en combinación case permanente.

$$W_{max} = f_p(1 + k_{def}) + f_v \psi_2(1 + k_{def})$$

$\psi_2$ : coeficiente de simultaneidade (SE táboa 4.2)

$k_{def}$ : factor de deformación (SE-M táboa 5.1).

Limitacións en canto a deformación establecidas no CTE (SE apartado 4.3.3.1).

Integridade: para a combinación de accións características considerando só as deformacións que se producen despois da posta en obra do elemento, a frecha relativa é menor que:

1/500 en pisos con tabiques fráxiles ou pavimentos ríxidos sen xuntas.

1/400 en pisos con tabiques ordinarios ou pavimentos ríxidos con xuntas.

1/300 no resto dos casos.

Confort dos usuarios: para combinación de accións característica, considerando soamente as accións de corta duración, a frecha relativa é menor que 1/350.

Aparencia da obra: para combinación de accións case permanente, a frecha relativa é menor que 1/300.

## 2. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN CON ENVORCO LATERAL

Comprobación a flexión con envorco lateral segundo CTE, SE-M apartado 6.3.3.

Comprobación de flexión respecto ao eixo forte y-y, con momento  $M_{y,d}$ .

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \leq 1$$

Tensión de cálculo a flexión:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W}$$

$M_d$ : momento de cálculo para a combinación máis desfavorable.

$W$ : módulo resistente. Para unha sección rectangular:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Resistencia de cálculo a flexión:

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

$k_{mod}$ : factor de modificación (SE-M, táboa 2.4)

$f_{m,k}$ : valor característico de resistencia a flexión (SE-M anexo E).

$\gamma_M$ : coeficiente parcial de seguridade para a propiedade do material (SE-M táboa 2.3)

Estimación de  $k_{crit}$ :

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

$$\sigma_{m,crit} = 0,78 \cdot \frac{E_{0,05} \cdot b^2}{L_{ef} \cdot h}$$

$E_{0,05}$  ó  $E_k$ : módulo de elasticidade lonxitudinal característico.

$b$ : anchura da sección

$h$ : altura da sección

$L_{ef}$ : lonxitude eficaz de envorco lateral:  $L \cdot \beta_v$  (SE-M táboa 6.2)

Si  $\lambda_{rel,m} \leq 0,75$  non é preciso realizar comprobación a envorco lateral.

En caso contrario:

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

Os valores do coeficiente de envorco lateral,  $k_{crit}$  para vigas de directriz recta e sección rectangular constante, poden extraerse tamén da táboa 6.3. (SE-M) segundo a clase resistente da madeira e o valor do coeficiente  $C_e$  definido segundo a seguinte expresión:

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

(SE-M ecuación 6.46)

$l_{ef}$ : lonxitude eficaz de envorco da viga

$h$ : altura, canto da sección

$b$ : anchura da sección

### 3. COMPROBACIÓN A CORTANTE

Comprobación a cortante segundo CTE (SE-M apartado 6.1.8).

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1$$

$\tau_d$ : tensión de cálculo de cortante.

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

Tensión de cálculo a esfuerzo cortante:

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V_d}{b \cdot h}$$

$V_d$ : esfuerzo cortante

Resistencia de cálculo a cortante:

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

$k_{mod}$ : factor de modificación (SE-M táboa 2.4)

$f_{v,k}$ : valor característico de resistencia a cortante

$\gamma_M$ : coeficiente parcial de seguridade para a propiedade do material (SE-M táboa 2.3)

### 4. COMPROBACIÓN A LUME

Comprobación a lume segundo CTE (SI anexo E)

Para asegurar o correcto funcionamento da estrutura fronte ao lume, é preciso comprobar a resistencia da estrutura en canto a estado límite último, para unha determinada duración de lume (segundo táboa 3.1. SI6-2). O método proposto no CTE é o método da sección reducida descrito a continuación.

A sección reducida obtense eliminando da sección inicial a profundidade eficaz de carbonización,  $d_{ef}$ , alcanzada durante o período de tempo considerado, nas caras expostas.

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0$$

$d_{char,n}$ : profundidade carbonizada nominal de cálculo.

$d_0$ : 7 mm

$k_0$ : - 1 si  $t \geq 20$  min  
 -  $t/20$  se  $t < 20$  min, superficies non protexidas ou superficies protexidas si  $t_{ch} \leq 20$  min

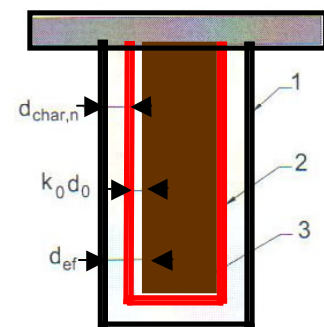
Se  $t_{ch} > 20$  min se considerará que varía linealmente dende 0 ata 1 entre 0 e  $t_{ch}$ , sendo constante e igual a 1 a partir deste punto.

$t_{ch}$ : tempo no que inicia a carbonización do elemento protexido.

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t$$

$\beta_n$ : velocidade de carbonización nominal (SI anexo E, táboa E.1)

$t$ : duración de exposición a lume



- 1 Superficie inicial del elemento
- 2 Límite de la sección residual
- 3 Límite de la sección eficaz

## VALOR DE CÁLCULO DAS PROPIEDADES DO MATERIAL

$$X_d = k_{mod,f} \cdot k_f \cdot \frac{X_k}{\gamma_M}$$

$k_{mod,f}$ : factor de modificación (SE M táboa 2.4).

$k_f$ : coeficiente que permite transformar un valor característico nun valor medio.

$k_f$ : 1,25 para madeira maciza

$k_f$ : 1,15 para madeira laminada e derivados da madeira.

$\gamma_M$ : coeficiente de seguridade do material, neste caso para situacións extraordinarias (SE M táboa 2.3).

## VALOR DE CÁLCULO DAS ACCIÓNS

O valor de cálculo das accións para unha situación extraordinaria en estruturas de madeira pódese simplificar segundo a seguinte expresión (SE apartado 2.2):

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

$G_{k,j}$ : cargas permanentes

$G_{k,j}$ : cargas variables

$\psi_{1,1}$   $\psi_{2,1}$ : coeficientes de simultaneidade (SE táboa 4.2)

## EXEMPLO CÁLCULO DE VIGUETAS E VIGAS DE FORXADO

Cálculo de estrutura de forxado composta por vigas principais de madeira laminada e viguetas de madeira maciza. A formulación inicial e os datos precisos para o cálculo, defínense a continuación.

O esquema desenvolvido para o cálculo tanto no caso da vigueta coma no da viga é o seguinte:

1. Definición das hipóteses de cálculo
2. Definición das combinacións das hipóteses de cálculo
3. Estados límite de servizo. Cálculo da deformación
4. Estados límite últimos:
  - 4.1. Comprobación a flexión simple con envorco lateral
  - 4.2. Comprobación a cortante
5. Comprobación a lume. Estados límite últimos.
  - 5.1. Comprobación a flexión simple con envorco lateral

### CÁLCULO VIGUETAS

- Datos de partida

Luz de cálculo: 2,5 m

Intereixo: 0,60 m

Material: madeira maciza de clase resistente C18 (propiedades segundo DB SE-M, anexo E, táboa E.1).

Clase de servizo: 1 (interior) (definida en DB SE-M, apartado 2.2.2.2).

Uso do forxado: vivanda en edificio con altura de evacuación inferior a 15 m.

Resistencia esixida a lume: 60 minutos (DB SE-SI, Táboa 3.1). Considérase que as viguetas están protexidas polo falso teito durante 30 minutos, polo tanto será preciso comprobar que resisten durante outros 30 minutos.

Velocidade de carbonización nominal de cálculo para madeira maciza de conífera cunha densidade característica superior a 290 kg/m<sup>3</sup>: 0,80 mm/min (DB SE-SI, Anexo E, Táboa E.1).

- Predimensionado

No caso das viguetas, por ser seccións pequenas, o cálculo que vai resultar limitante é o referente á comprobación fronte ao lume. Tendo en conta a velocidade de carbonización (0,8 mm/min) e o tempo de resistencia a lume esixido para as viguetas (30 minutos), propónse como sección de partida 100x150 mm.

### 1. Hipóteses de cálculo (CTE, DB SE-AE)

Hipótese 1. Carga permanente: 1,819 kN/m<sup>2</sup>

A carga permanente estímase considerando o peso propio dos materiais do forxado, incluído o peso propio da vigueta predimensionada.

Hipótese 2. Sobrecarga de uso uniforme: 2 kN/m<sup>2</sup>. Categoría A. Subcategoría A1. (DB SE-AE Táboa 3.1.).

Hipótese 3. Sobrecarga de uso puntual: 2 kN. Categoría A. Subcategoría A1. (DB SE-AE Táboa 3.1.).

### 2. Combinación de hipóteses (DB SE, apartado 4.2.2.)

Combinación 1: 1,35·H<sub>1</sub>

Combinación 2: 1,35·H<sub>1</sub> + 1,5·H<sub>2</sub>

Combinación 3: 1,35·H<sub>1</sub> + 1,5·H<sub>3</sub>

### 3. Estados límite de servizo. Cálculo da deformación

A expresión de cálculo simplificada da deformación para vigas biapoiadas con carga uniforme é a seguinte:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q_p \cdot l^4}{E_{0,m} \cdot I_y}$$

q<sub>p</sub>: valor lineal da carga permanente

l: luz da viga que se calcula: 2,5 m

Onde:

E<sub>0,m</sub>: módulo de elasticidade medio paralelo á fibra: 9.000.000 kN/m

I<sub>y</sub>: momento de inercia da sección respecto ao eixo y:

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,10 \cdot 0,15^3}{12} = 0,00002813 \text{ m}^4$$

Para o caso de cargas puntuais sobre vigas biapoiadas, a expresión é a seguinte:

$$f = \frac{p \cdot l^3}{48 \cdot E_{0,m} \cdot I_y}$$

p: valor da carga puntual

l: luz da viga que se calcula: 2,5 m

Onde:

E<sub>0,m</sub>: módulo de elasticidade medio paralelo á fibra: 9.000.000 kN/m

I<sub>y</sub>: momento de inercia da sección respecto ó eixo y:

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,10 \cdot 0,15^3}{12} = 0,00002813 \text{ m}^4$$

Segundo as expresións de cálculo para deformación en vigas biapoiadas con carga uniforme e en vigas biapoiadas con carga, o resultado dos valores de deformación son os seguintes:

Deformación debida ás cargas permanentes (H<sub>1</sub>): 2,2 mm.

Deformación debida á sobrecarga de uso uniforme (H<sub>2</sub>): 2,4 mm.

Deformación debida á sobrecarga de uso puntual (H<sub>3</sub>): 2,6 mm.

Frecha activa ( $W_{act}$ ) estimada como a deformación causada pola fluencia do permanente e a causada polas cargas variables: 3,9 mm.

Frecha máxima ( $W_{max}$ ) estimada como a deformación debida ás cargas permanentes considerando a súa fluencia e a deformación debida ás cargas variables tendo en conta a súa fluencia en combinación case permanente (DB SE, ecuación 4.8): 4,8 mm.

As limitacións en canto a deformación establecidas no CTE, DB SE, apartado 4.3.3.1 son as seguintes:

Integridade dos elementos construtivos: para a combinación de accións característica considerando soamente as deformacións que se producen despois da posta en obra do elemento, a frecha relativa é menor que  $luz/300$ .

$$L/300 = 2,5/300 = 0,0083 \text{ m}$$

$$W_{act} = 0,0039 \text{ m}$$

$0,0039 < 0,0083$  Cumpre a condición de integridade dos elementos construtivos (47 %).

Confort dos usuarios: para combinación de accións característica, considerando soamente as accións de curta duración. A frecha relativa debe ser menor que  $luz/350$ .

$$L/350 = 2,5/350 = 0,0071 \text{ m}$$

$$\text{Deformación debida ás cargas variables: } 0,0026 \text{ m}$$

$0,0026 < 0,0071$  Cumpre o confort dos usuarios (36,6 %)

Aparencia da obra: para combinación de accións case permanente, a frecha relativa é menor que  $luz/300$ .

$$L/300 = 2,5/300 = 0,0083 \text{ m}$$

$$W_{max} = 0,0048 \text{ m}$$

$0,0048 < 0,0083$  Cumpre a aparencia da obra (57,8 %)

## 4. Estado límite último

### 4.1. Comprobación a flexión simple con envorco lateral (DB SE-M, apartado 6.3.3.3)

No caso de vigas biapoiadas sometidas a esforzos de flexión simple é preciso ter en conta a posibilidade de envorco lateral.

A combinación máis desfavorable é a Combinación 3:  $1,35 \cdot H_1 + 1,5 \cdot H_3$ , para a cal se obtén o seguinte índice de esgotamento a flexión:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} = \frac{8,06}{1 \cdot 13,71} = 0,59 \leq 1$$

### 4.2. Comprobación a cortante (DB SE-M, apartado 6.1.8)

A combinación máis desfavorable é a Combinación 2:  $1,35 \cdot H_1 + 1,5 \cdot H_2$  para a cal se obtén o seguinte índice de esgotamento:

$$\frac{\sigma_d}{f_{v,d}} = \frac{0,41}{1,23} = 0,33 \leq 1$$

## 5. Comprobación a lume

O cálculo da sección reducida realizarase segundo DB SI Anexo E.

Tempo de exposición ao lume das viguetas: 30 minutos.

Velocidade de carbonización para madeira maciza de conífera con densidade característica superior a 290 kg/m<sup>3</sup> (C18) é de 0,8 mm/min.

Profundidade carbonizada nominal: 24 mm

Profundidade eficaz de carbonización: 31 mm

Sección reducida: 38x119 mm

### 5.1. Comprobación a flexión simple con envorco lateral (CTE, DB SE-M, apartado 6.3.3.3)

A combinación máis desfavorable é  $1 \cdot H_1 + \psi 1,1 \cdot H_2 = 1 \cdot H_1 + 0,5 \cdot H_2$  para a cal se obtén o seguinte índice de esgotamento a flexión:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} = \frac{14,70}{0,98 \cdot 22,5} = 0,67 \leq 1$$

En situación de incendio, segundo o anexo E do DB SI apartado E.3, para seccións macizas rectangulares e circulares, pode desprezarse o efecto do cortante.

## CÁLCULO VIGA PRINCIPAL DE FORXADO

### • Datos de partida

Luz de cálculo: 7 m

Intereixo: 2,5 m

Material: madeira laminada, clase resistente Gl24h (propiedades segundo CTE, DB-SE-M, anexo E, táboa E.3).

Clase de servizo: 1 (interior) (definida en CTE, DB-SE-M, apartado 2.2.2.2).

Uso do forxado: vivenda en edificio con altura de evacuación inferior a 15 m.

Resistencia esixida a lume: 60 minutos (CTE, DB-SE-SI, Táboa 3.1). Considérase que as vigas principais van deixarse á vista.

Velocidade de carbonización nominal de cálculo para madeira laminada de conífera cunha densidade característica superior a 290 kg/m<sup>3</sup>: 0,70 mm/min (CTE, DB SI, Anexo E, táboa E.1).

### • Predimensionado

Tendo en conta a velocidade de carbonización (0,7 mm/min) e o tempo de resistencia ao lume esixido para as vigas (60 minutos), propónse como ancho da viga 160 mm.

No caso de vigas biapoiadas de madeira laminada de grandes luces (máis de 10 m) é de aplicación unha aproximación segundo a cal, o canto é a luz da viga dividido entre un factor que toma como valor 17. Tomando como referencia esta relación e aproximando a seccións comerciais con espesor de lámina 40 mm, propónse un canto inicial de 440 mm.

Esta sección é aproximada e válida para a realización dun primeiro tenteo. Neste caso mostraranse os resultados para a sección definitiva obtida mediante cálculo que resulta ser de 190x480 mm.

## 1. Hipóteses de cálculo (CTE, DB SE-AE)

Hipótese 1. Carga permanente: 2,38 kN/m<sup>2</sup>

A carga permanente estímase considerando o peso propio dos materiais do forxado, peso achegado polas viguetas e peso propio da viga.

Hipótese 2. Sobrecarga de uso uniforme: 2 kN/m<sup>2</sup>. Categoría A. Subcategoría A1. (CTE, DB SE-AE Táboa 3.1.).

## 2. Combinación de hipóteses (CTE, DB SE, apartado 4.2.2.)

Combinación 1:  $1,35 \cdot H_1$

Combinación 2:  $1,35 \cdot H_1 + 1,5 \cdot H_2$

### 3.Estado límite de servizo. Cálculo da deformación

Segundo as expresións de cálculo para deformación en vigas biapoiadas con carga uniforme e en vigas biapoiadas con carga, o resultado dos valores de deformación son os seguintes:

Deformación debida ás cargas permanentes ( $H_1$ ): 9,2 mm.

Deformación debida á sobrecarga de uso uniforme ( $H_2$ ): 7,7 mm.

Frecha activa ( $W_{act}$ ) estimada como a deformación causada pola fluencia do permanente e a causada polas cargas variables: 13,2 mm.

Frecha máxima ( $W_{max}$ ) estimada como a deformación debida ás cargas permanentes considerando a súa fluencia e a deformación debida ás cargas variables tendo en conta a súa fluencia en combinación case permanente (DB SE, ecuación 4.8): 18,4 mm.

As limitacións en canto a deformación establecidas no CTE, DB SE, apartado 4.3.3.1 son as seguintes:

Integridade dos elementos construtivos: para a combinación de accións característica considerando soamente as deformacións que se producen despois da posta en obra do elemento, a frecha relativa é menor que  $luz/300$ .

$$L/300 = 7/300 = 0,0233 \text{ m}$$

$$W_{act} = 0,0132 \text{ m}$$

$0,0132 < 0,0233$  Cumpre a condición de integridade dos elementos construtivos (56,7 %).

Confort dos usuarios: para combinación de accións característica, considerando soamente as accións de corta duración. A frecha relativa debe ser menor que  $luz/350$ .

$$L/350 = 7/350 = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{Deformación debida ás cargas variables: } 0,0077 \text{ m}$$

$0,0077 < 0,02$  Cumpre a confort dos usuarios (38,5 %)

Aparencia da obra: para combinación de accións case permanente, a frecha relativa é menor que  $luz/300$ .

$$L/300 = 7/300 = 0,0233 \text{ m}$$

$$W_{max} = 0,0184 \text{ m}$$

$0,0184 < 0,0233$  Cumpre a aparencia da obra (0,79 %)

### 4.Estado límite último

#### 4.1. Comprobación a flexión simple con envorco lateral (DB SE-M, apartado 6.3.3.3)

No caso de vigas biapoiadas sometidas a esforzos de flexión simple é preciso ter en conta a posibilidade de envorco lateral.

A combinación máis desfavorable é a Combinación 2:  $1,35 \cdot H_1 + 1,5 \cdot H_2$ , para a cal se obtén o seguinte índice de esgotamento a flexión:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{K_{crit} \cdot f_{m,d}} = \frac{13,04}{1 \cdot 17,23} = 0,76 \leq 1$$

#### 4.2. Comprobación a cortante (DB SE-M, apartado 6.1.8)

A combinación máis desfavorable é a Combinación 2:  $1,35 \cdot H_1 + 1,5 \cdot H_2$  para a cal se obtén o seguinte índice de esgotamento:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{0,894}{1,73} = 0,52 \leq 1$$

## 5. Comprobación a lume

O cálculo da sección reducida realizarase segundo DB SI Anexo E.

Tempo de exposición ao lume das vigas: 60 minutos.

Velocidade de carbonización para madeira laminada de conífera con densidade característica superior a 290 kg/m<sup>3</sup> (GI24h) é de 0,7 mm/min.

Profundidade carbonizada nominal: 42 mm

Profundidade eficaz de carbonización: 49 mm

Sección reducida: 92x431 mm

### 5.1. Comprobación a flexión simple con envorco lateral (CTE, DB SE-M, apartado 6.3.3.3)

A combinación máis desfavorable é  $1 \cdot H_1 + \psi 1,1 \cdot H_2 = 1 \cdot H_1 + 0,5 \cdot H_2$  para a cal se obtén o seguinte índice de esgotamento a flexión:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} = \frac{18,17}{0,82 \cdot 27,6} = 0,80 \leq 1$$

En situación de incendio, segundo o anexo E do DB SI apartado E.3, para seccións macizas rectangulares e circulares, pode desprezarse o efecto do cortante.