

ESTRUTURAS EM MADEIRA

03 – ELU - Axial

(6) Estados-limite últimos

(6.1) Esforços atuantes em estados-limite últimos

Os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação para a determinação dos valores de cálculo das ações, e as combinações de ações em estados-limite últimos estão definidas na ABNT NBR 8681.

... deve ser considerada a influência da duração do carregamento na resistência da madeira, como especificado em 5.8.4.1. Alternativamente, é permitido considerar os carregamentos como sendo de longa duração. Nesse caso, as ações consideradas como principais na combinação e que tenham um tempo de atuação muito reduzido (vento ou a parcela das cargas móveis devida ao impacto) devem ser multiplicadas por 0,75.

No caso de ações permanentes diretas consideradas separadamente, para elementos estruturais de madeira, são recomendados os seguintes valores para os coeficientes de ponderação (γ_g) para as combinações últimas normais, para as combinações desfavoráveis especiais ou de construção e para as combinações excepcionais, respectivamente.

- a) $\gamma_g = 1,3$; $\gamma_g = 1,2$; $\gamma_g = 1,15$; para elementos estruturais de madeira em geral;
- b) $\gamma_g = 1,25$; $\gamma_g = 1,15$; $\gamma_g = 1,10$; para elementos estruturais industrializados de madeira.



(6.2) Esforços resistentes em estados-limite últimos

(6.2.2) Tração paralela às fibras

O valor de cálculo da resistência à tração paralela às fibras pode ser considerado igual ao valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras.

$$f_{t0,d} = f_{c0,d}$$

(6.2.2) Tração perpendicular às fibras

Fórmula de Hankinson na tração inclinada em relação às fibras.

$$f_{t90,d} = 0,06 \cdot f_{t0,d}$$

(6.2.6) Valores de cálculo da resistência

O cálculo da resistência é realizado conforme a seguinte equação:

$$f_{wd} = k_{mod} \frac{f_{wk}}{\gamma_w}$$



(6.2) Esforços resistentes em estados-limite últimos

(6.2.2) Tração paralela às fibras

O valor de cálculo da resistência à tração paralela às fibras pode ser considerado igual ao valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras.

$$f_{t0,d} = f_{c0,d}$$

(6.2.3) Tração perpendicular às fibras

Fórmula de Hankinson na tração inclinada em relação às fibras.

$$f_{t90,d} = 0,06 \cdot f_{t0,d}$$

(6.2.6) Valores de cálculo da resistência

O cálculo da resistência é realizado conforme a seguinte equação:

$$f_{wd} = k_{mod} \frac{f_{wk}}{\gamma_w}$$



(6.3) Solicitações normais

(6.3.2) Tração

Nas barras tracionadas axialmente, a condição de segurança é calculada conforme a seguinte equação:

$$\sigma_{Nt,d} = \frac{N_{t,d}}{A} \leq f_{t0,d}$$

onde:

$\sigma_{Nt,d}$ é o valor de cálculo da tensão de tração normal à seção transversal;

$N_{t,d}$ é o valor de cálculo da força normal de tração;

A é a área líquida da seção transversal;

$f_{t0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à tração paralela às fibras.



(6.3.3) Compressão

A condição de segurança relativa à resistência à compressão axial é calculada conforme a seguinte equação

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{c0,d}$$

onde:

$\sigma_{Nc,d}$ é o valor de cálculo da tensão de compressão normal à seção transversal;

$N_{c,d}$ é o valor de cálculo da força normal de compressão;

A é a área líquida da seção transversal;

$f_{c0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras.



(6.5) Estabilidade

(6.5.2) Condições de alinhamento das peças

Para peças que compõem pórticos, treliças, pilares ou vigas em que a instabilidade lateral pode ocorrer, o desvio no alinhamento axial da peça, medido na metade da distância entre os apoios, deve ser limitado em:

- a) L/300 para peças de madeira serrada ou roliça;
- b) L/500 para peças de madeira laminada colada.

(6.5.3) Esbeltez

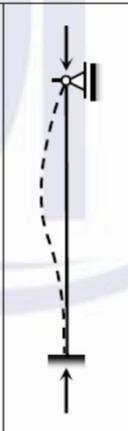
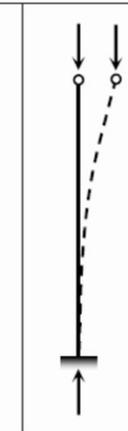
Os requisitos de dimensionamento dependem da esbeltez da peça, definida pelo seu índice de esbeltez, calculado conforme seguir:

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{I/A}}$$

$$L_0 = K_E \cdot L$$



O índice de esbeltez das peças sujeitas à compressão axial ou à flexocompressão não pode ser maior que 140.

Modos de flambagem						
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Código das condições de extremidade		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre				
		Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida				
		Rotação livre e translações impedidas				
		Rotação impedida e translações livres				
		Rotação e translações livres				



(6.5.4) Esbeltez relativa

Os requisitos de dimensionamento dependem da esbeltez da peça, definida pelo seu índice de esbeltez, calculado conforme seguir:

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$$

(6.5.5) Condição de estabilidade de peças comprimidas e flexocomprimidas

Para $\lambda_{rel,x} \leq 0,3$ e $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$ as tensões devem satisfazer apenas às condições da compressão, apresentadas em 6.3.3, ou da flexocompressão, apresentadas em 6.3.7, não sendo necessária a verificação da estabilidade.



No caso de índice de esbeltez relativa superior a 0,3, em qualquer direção, além das condições estabelecidas em 6.3.7 devem ser atendidas as condições de estabilidade dadas pelas inequações.

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$$

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}}$$

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

$$k_x = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2 \right]$$

$$k_x = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2 \right]$$

- a) para madeira maciça serrada e peças roliças: $\beta_c = 0,2$;
 b) para madeira lamelada (MLC e MLCC) e madeira laminada (LVL): $\beta_c = 0,1$.

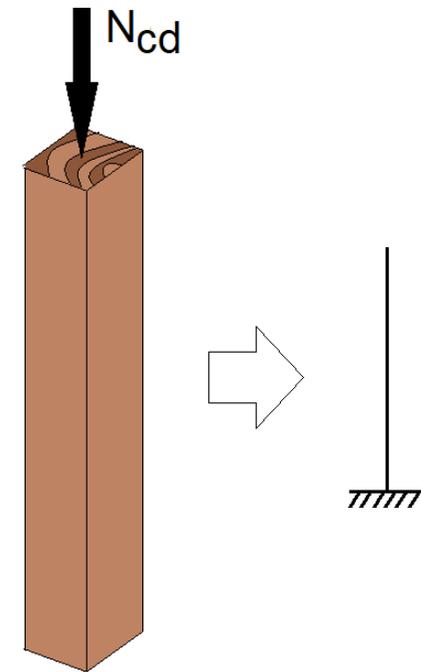


Exemplo - 3.1: Uma coluna de madeira engastada na base e livre no topo deve suportar uma carga de compressão de cálculo (N_{cd}) de 247,5 kN. Considerando este carregamento de longa duração, determine:

- (a) as dimensões mínimas da seção transversal quadrada;
- (b) a altura máxima da coluna para que não seja necessária a verificação da estabilidade.

Dados:

- Carregamento de longa duração.
- Material: Madeira serrada de espécie conífera;
Origem: floresta plantada;
Classe de resistência C20.
- Umidade relativa do ambiente: 75%.



Tensão resistente de cálculo (Tabela 3):

$$f_{c0,k} = 19 \text{ MPa}$$

$$E_{0,05} = 6,4 \text{ GPa}$$

$$K_{\text{mod}} = K_{\text{mod},1} \cdot K_{\text{mod},2} = 0,70 \cdot 0,90 = 0,63$$

$$f_{c0,d} = K_{\text{mod}} \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w} = 0,63 \frac{19 \text{ MPa}}{1,4} = 8,55 \text{ MPa}$$

Dimensões mínimas da seção transversal:

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{c0,d} \rightarrow \frac{247,5 \text{ kN}}{a^2} \leq 8,55 \text{ MPa}$$

$$a \geq \sqrt{\frac{247500 \text{ N}}{8,55 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}} \rightarrow a \geq 170,14 \text{ mm} \rightarrow a = 200 \text{ mm}$$

Altura máxima da coluna:

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{L_0}{\sqrt{I/A}} = \frac{L_0}{a/\sqrt{12}} = \frac{L_0}{200\text{mm}/\sqrt{12}} = \frac{L_0}{57,74\text{mm}}$$

$$\lambda_{\text{rel}} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \leq 0,3 \rightarrow \frac{L_0}{57,74\text{mm} \cdot \pi} \sqrt{\frac{19 \text{ MPa}}{6400 \text{ MPa}}} \leq 0,3 \rightarrow L_0 \leq 998,76 \text{ mm}$$

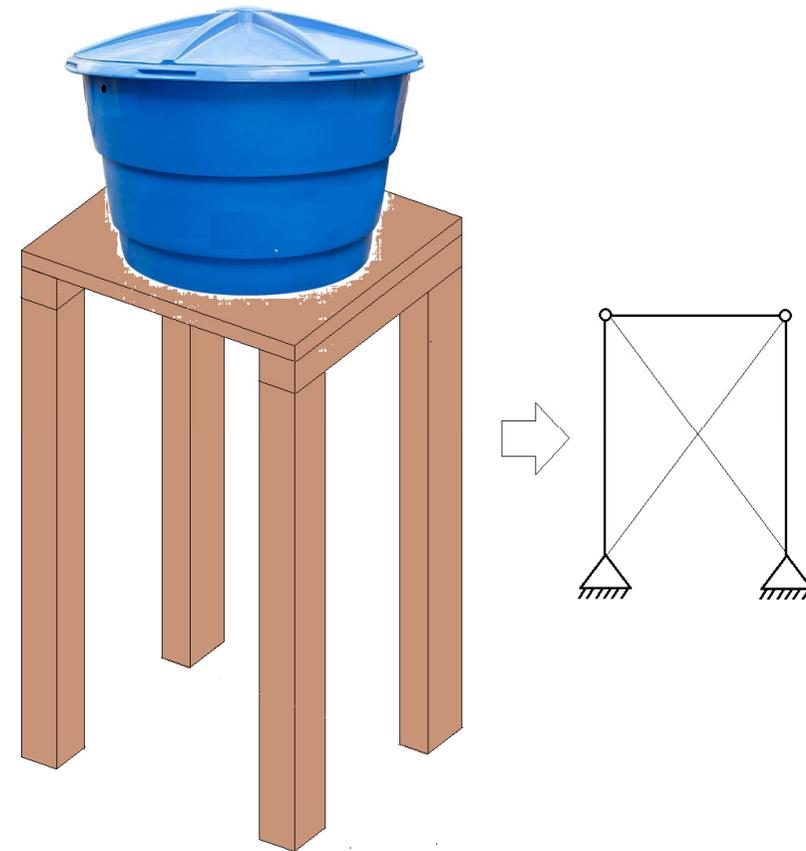
$$L_0 = K_E \cdot L \rightarrow L = \frac{L_0}{K_E} = \frac{998,76}{2,1} = 475 \text{ mm}$$



Exemplo - 3.2: Você engenheiro(a) foi contratado(a) para projetar a estrutura em madeira de um reservatório de água. Após realizadas as combinações das cargas atuantes, foi determinado o valor máximo da carga axial de compressão de cálculo (N_{cd}). Verifique se o material disponível pode ser empregado nas colunas.

Dados:

- Carregamento de longa duração: $N_{cd} = 41,6$ kN.
- Material: Madeira serrada de *eucalyptus urophylla*;
Origem: floresta plantada;
Classe de resistência D30;
Seção transversal: 15 x 15 cm;
Comprimento: 5 metros.
- Umidade relativa do ambiente: 70%.



Tensão resistente de cálculo (Tabela 3):

$$f_{c0,k} = 23 \text{ MPa}$$

$$E_{0,05} = 9,2 \text{ GPa}$$

$$K_{\text{mod}} = K_{\text{mod},1} \cdot K_{\text{mod},2} = 0,70 \cdot 0,90 = 0,63$$

$$f_{c0,d} = K_{\text{mod}} \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w} = 0,63 \frac{23 \text{ MPa}}{1,4} = 10,35 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{c0,d} \rightarrow \frac{41600 \text{ N}}{(150 \cdot 150) \text{ mm}^2} \leq 10,35 \text{ MPa} \rightarrow 1,85 \text{ MPa} \leq 10,35 \text{ MPa} \rightarrow \text{ok!}$$

Estabilidade:

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{L_0}{\sqrt{I/A}} = \frac{(5000 \cdot 1,0)}{150/\sqrt{12}} = 115,47$$

$$\lambda_{rel,xy} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \leq 0,3 \rightarrow \frac{115,47}{\pi} \sqrt{\frac{23 \text{ MPa}}{9200 \text{ MPa}}} \leq 0,3 \rightarrow 1,84 \geq 0,3 \rightarrow \text{ver estabilidade.}$$

$$k_{xy} = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,xy} - 0,3) + (\lambda_{rel,xy})^2 \right] = 0,5 [1 + 0,2(1,84 - 0,3) + (1,84)^2] = 2,35$$

$$k_{cxy} = \frac{1}{k_{xy} + \sqrt{(k_{xy})^2 - (\lambda_{rel,xy})^2}} = \frac{1}{2,35 + \sqrt{(2,35)^2 - (1,84)^2}} = 0,26$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cxy} \cdot f_{c0,d}} \leq 1,0 \rightarrow \frac{1,85 \text{ MPa}}{0,26 \cdot 10,35 \text{ MPa}} \leq 1,0 \rightarrow 0,69 \leq 1,0 \rightarrow \text{ok!}$$



Exemplo - 3.3: Uma peça em madeira serrada de eucalipto, classe de resistência D35 será comprimida por uma carga axial de cálculo (N_{cd}) de 80,56 kN, considerada de longa duração. Verifique se o material disponível pode ser empregado com segurança. [4,0]

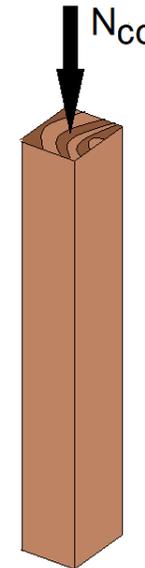
Dados: Seção transversal: 18 x 18 cm;

$f_{co,k}$: 25 MPa;

$E_{0,05}$: 10 GPa;

Comprimento de flambagem (L_0): 4,8 metros.

U_{amb} : 70%.





EDUCAÇÃO
PÚBLICA
100%
GRATUITA

MUITO OBRIGADO

Prof. Rodrigo Bordignon
Engenheiro Civil, Dr.

*www.ifsul.edu.br
rodrigobordignon@ifsul.edu.br*