

2.3.4 Norma da comunidade econômica européia

A norma da comunidade européia para o projeto de estruturas de madeira – o chamado EUROCODE 5 – foi editada em 1993, fazendo parte de um grupo de códigos para o projeto estrutural e geotécnico, que envolve desde as ações nas estruturas (EUROCODE 1) até as normalizações para o projeto de estruturas que empregam os mais diferentes tipos de materiais. A avaliação da segurança estrutural, no EUROCODE 5/93, é fundamentada no método dos estados limites.

2.3.4.1 Parâmetros para o dimensionamento

a) Parâmetros de resistência e rigidez

Os *valores característicos* das propriedades de resistência e de rigidez da madeira, X_k , são estimados como os quantis inferiores de 5% da distribuição de frequências dos valores obtidos em ensaios padronizados. A partir desses valores se estabelecem os *valores de projeto*, X_d , calculados pela expressão:

$$X_d = k_{\text{mod}} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad [2.91]$$

em que:

γ_M = coeficiente de ponderação ($\gamma_M = 1,3$ para a verificação dos estados limites últimos da madeira sujeita a combinações fundamentais de ações);

k_{mod} = fator de modificação, que leva em conta o efeito da duração do carregamento e do teor de umidade nos parâmetros de resistência (ver item (d) adiante).

Desde que os valores característicos são determinados sob a hipótese de um comportamento linear até a ruptura, a verificação de resistência de peças individuais também é feita com base na mesma relação linear, levando-se em conta a influência da umidade e da duração do carregamento nas constantes elásticas, segundo o EUROCODE 5/93. Para peças sujeitas à ação simultânea da flexão e da compressão, todavia, uma relação não linear (elástico-plástica) pode ser usada na verificação dos estados limites últimos.

b) Classes de umidade

São definidas, pelo código normativo, três classes de umidade sob as quais o projeto estrutural, obrigatoriamente, é desenvolvido: classes de serviço 1, 2 e 3. Nelas são definidos os teores de umidade de equilíbrio máximos que se esperam alcançar em serviço.

c) Classes de duração das ações

As ações são designadas por uma das classes de duração de carregamento para efeito de realização dos cálculos de resistência e rigidez, sendo classificadas em: permanentes, de longa duração, média duração, curta duração e instantâneas.

d) Coeficientes de modificação

Os valores característicos devem ser corrigidos pelos coeficientes de modificação, k_{mod} , que associam simultaneamente as condições influentes (umidade e tempo de duração de aplicação das cargas), com valores variando de 0,5 a 1,1. Similarmente à norma brasileira, o EUROCODE 5/93 afirma que, se uma combinação de carregamento consiste de ações que são peculiares a classes de duração diferentes, um valor de k_{mod} deve ser escolhido de forma que corresponda à uma ação com a duração mais curta.

Recentemente, Eggen¹ apud Bell & Eggen (2001) desenvolveu um programa computacional, denominado *Cfem*, que vem sendo testado e se mostra como uma ferramenta flexível para o projeto das estruturas de madeira, sem a necessidade de recorrência a qualquer tipo de coeficiente de correção.

e) Especificidades da madeira serrada

Para o EUROCODE 5/93 é desejável que a madeira estrutural seja classificada, de forma que sejam asseguradas propriedades de resistência e de rigidez satisfatórias para uso pretendido. As regras de classificação são baseadas em inspeções visuais ou mecânicas, tratadas em documentos especiais referenciados.

¹ EGGEN, T.E. (2000). *Buckling and geometrical nonlinear beam-type analyses of timber structures*. Dr.ing dissertation – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Para peças de madeira serrada sujeitas à flexão, com largura menor que 150 mm, o valor característico de $f_{m,k}$ pode ser aumentado pelo fator k_h , em que h é a altura da peça flexionada (em milímetros), conforme segue:

$$k_h = \min \begin{cases} (150/h)^{0,2} \\ 1,3 \end{cases} \quad [2.92]$$

2.3.4.2 Estados limites últimos

a) Compressão paralela às fibras

Peças de madeira sujeitas à compressão paralela às fibras devem satisfazer à seguinte condição:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad [2.93]$$

em que:

$\sigma_{c,0,d}$ = tensão de compressão paralela às fibras – valor de projeto;

$f_{c,0,d}$ = resistência à compressão paralela às fibras – valor de projeto.

Pressupõe-se, nessas condições, que a flambagem não ocorre.

b) Flexo-compressão

As peças submetidas à flexo-compressão devem verificar as expressões:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad [2.94]$$

e

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad [2.95]$$

A verificação simultânea das expressões anteriores pressupõe que a peça estrutural está submetida à flexo-compressão oblíqua, caso que não é muito freqüente nas estruturas de madeira. Havendo a flexão somente em uma das direções (y ou z), considera-se apenas a expressão correspondente.

O valor de k_m nas Equações [2.94] e [2.95] deve ser considerado como:

- $k_m = 0,7 \Rightarrow$ para seções transversais retangulares;
- $k_m = 1,0 \Rightarrow$ para as demais seções transversais.

2.3.4.3 Instabilidade das peças

No projeto de peças comprimidas e flexocomprimidas, além da verificação da resistência da peça, o EUROCODE 5/93 exige o exame das suas condições de instabilidade, afirmando que as tensões de flexão devidas à curvatura inicial, excentricidades e deflexões induzidas devem ser levadas em conta, além daquelas devidas a qualquer carga lateral.

Para a análise da estabilidade do elemento estrutural é definido o *índice de esbeltez relativa*, calculado pela expressão:

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}} \quad [2.96]$$

que também é válida para o cálculo de $\lambda_{rel,z}$ com a simples substituição dos respectivos índices. O valor de $\sigma_{c,crit,y}$ é determinado por:

$$\sigma_{c,crit,y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0,05}}{\lambda_y^2} \quad [2.97]$$

que também é válida para o cálculo de $\sigma_{c,crit,z}$ com a substituição dos respectivos índices. O EUROCODE 5/93 usa o valor do módulo de elasticidade longitudinal ajustado ao 5º quantil da distribuição de freqüências, $E_{0,05}$, para considerar as reduções relativas à fluência da madeira.

Os índices de esbeltez λ_y e $\lambda_{rel,y}$ correspondem à flexão sobre o eixo y (isto é, a deflexão ocorrendo na direção z) e os índices λ_z e $\lambda_{rel,z}$ correspondem à flexão sobre o eixo z (deflexão ocorrendo na direção y), conforme Figura 2.15.

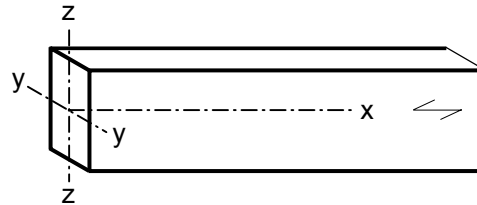


Figura 2.15 – Indicação dos eixos de flexão. Fonte: EUROCODE 5/93

Conexões completamente rígidas são quase impossíveis nas estruturas de madeira. Logo, as rotações nas juntas semi-rígidas devem ser levadas em conta na determinação dos comprimentos de flambagem. Blass (1995a) apresenta em seu trabalho importante contribuição para a determinação de uma rigidez rotacional, K_r , que influi diretamente no comprimento de flambagem. Comentando que as rotações em conexões semi-rígidas geralmente reduzem a força crítica de flambagem elástica da peça comprimida, o autor apresenta soluções aproximadas para diversas situações práticas de projeto.

Retornando à verificação da instabilidade das peças, se $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$ e $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$ as tensões devem satisfazer às condições representadas pelas Expressões [2.94] e [2.95]. Em todos os outros casos, as tensões devem verificar as seguintes condições:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad [2.98]$$

e

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad [2.99]$$

com:

σ_m = tensão normal de flexão (momento fletor de primeira ordem) devida a ações laterais ou excentricidades na aplicação das ações, como observa Gehri (2000);

k_m = fator cujos valores são os mesmos definidos na seção 2.3.4.2.

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad [2.100]$$

e

$$k_y = 0,5 \cdot \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) \quad [2.101]$$

As equações acima possuem as suas similares para $k_{c,z}$ e k_z , obtidas pela simples permutação dos respectivos índices. O termo β_c representa um fator para peças comprimidas, dentro dos limites de divergência de alinhamento permitidos pelo EUROCODE 5/93, sendo $\beta_c = 0,2$ para madeira serrada.

Blass (1995b) comenta que as imperfeições geométricas mais importantes em peças comprimidas de madeira são a curvatura inicial, a inclinação do eixo da peça e as divergências das dimensões da seção transversal relativamente a seus valores nominais. O EUROCODE 5/93 limita as divergências no alinhamento dos eixos das peças de madeira estrutural em 1/300 do seu comprimento.

Bell & Eggen (2001) comparando os critérios normativos do EUROCODE 5/93 com os da norma norueguesa, concluíram ser muito conservadora a proposta dessa última norma para o caso de solicitação à flexo-compressão. No entanto, segundo esses autores, de forma surpreendente, o EUROCODE 5/93 superestima em mais de 30% a capacidade nominal das peças para certas combinações de esforço normal com esforço de flexão.

A norma norueguesa NS 3470-1 – *Design of timber structures*, editada em 1999, citada por Bell & Eggen (2001), considera para o caso de compressão centrada e paralela às fibras, a seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_\lambda \cdot f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad [2.102]$$

Na equação anterior, $\sigma_{c,0,d}$ e $f_{c,0,d}$ têm os mesmos significados do EUROCODE 5/93 e o termo k_λ é o fator de correção considerando a flambagem, baseado em certas imperfeições e

que depende, principalmente, do índice de esbeltez, λ , adotado segundo a direção de maior esbeltez.

Fazendo-se $\sigma_{m,y,d} = 0$ e $\sigma_{m,z,d} = 0$ nas Equações [2.98] e [2.99], nota-se que passam a ser equivalentes à Equação [2.102]. Os fatores $k_{c,y}$ e $k_{c,z}$ são similares ao fator k_λ , mas não idênticos.

Peças sujeitas à flexo-compressão, segundo a NS 3470-1, requerem que a seguinte condição seja satisfeita:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_\lambda \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{hy} \cdot k_{vipp} \cdot f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{k_{hz} \cdot f_{m,d}} \right) \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{k_\lambda \cdot \sigma_{c,0,d}}{k_{eu} \cdot f_{c,0,d}} \right)} \leq 1,0 \quad [2.103]$$

sendo:

$$k_{eu} = \frac{\sigma_{eu}}{f_{c,0,k}} \quad [2.104]$$

e

$$\sigma_{eu} = \frac{\pi^2 E_{0,k}}{\lambda^2} \quad [2.105]$$

A Equação [2.103] assume que o eixo y é o de maior inércia da seção transversal e nela se reconhece claramente a interação entre a compressão e a flexão. Os demais termos que nela aparecem representam, respectivamente:

k_h = fator de altura, determinado para as direções y e z;

k_{vipp} = fator de flambagem, que depende da esbeltez relativa à flexão, $\lambda_m = \sqrt{f_{m,k} / \sigma_{m,c}}$ em que $\sigma_{m,c}$ é a tensão crítica à flexão, calculada de acordo com a teoria clássica de estabilidade. O valor de k_{vipp} é equivalente ao k_{crit} , cujos critérios para cálculo estão contidos nas Equações [2.108] a [2.110].

Baseando-se em resultados numéricos, Bell & Eggen (2001) propõem condições de verificação alternativas para o código europeu, substituindo as Equações [2.98] e [2.99] da seguinte forma:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \quad [2.106]$$

e

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \quad [2.107]$$

Nessas equações, k_{crit} é um fator que leva em conta a resistência reduzida devida à flambagem lateral. Segundo a norma europeia, para vigas com um desvio lateral inicial situado dentro de limites estabelecidos em seu texto, k_{crit} pode ser determinado a partir das expressões:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1,0 & \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 & [2.108] \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,40 & [2.109] \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{para } 1,40 < \lambda_{rel,m} & [2.110] \end{cases}$$

O fator k_{crit} pode ser tomado igual a 1,0 para vigas em que o deslocamento lateral da região comprimida é prevenido ao longo de seu comprimento e a rotação torsional é prevenida em seus suportes.