2.3.2 Norma australiana

A norma australiana referente ao projeto das estruturas de madeira – AS 1720.1 (*Timber Structures*) – foi publicada em 1997 pela *Standards Association of Australia* e é fundamentada no método dos estados limites, prevendo as verificações dos estados limites últimos, de estabilidade e de utilização.

A AS 1720.1/97 traz como alerta, em seus parágrafos preliminares, que toda a madeira empregada na estrutura deve concordar com as exigências das normas apropriadas daquele país, onde as espécies de madeira estrutural são classificadas em sete grupos de resistência – S1 a S7 – para a madeira verde e em oito grupos de resistência – SD1 a SD8 – para a madeira seca. Outras normas apropriadas complementam essas classes para outros tipos de materiais, tais como compensados e madeiras roliças.

2.3.2.1 Parâmetros para o dimensionamento

a) Parâmetros de resistência e rigidez

A norma australiana considera que a *capacidade característica*, R_k, é uma estimativa da habilidade de um elemento estrutural, completamente estável, em resistir a um modo particular de ruptura sem a aplicação de fatores de modificação. É obtida pelo produto da resistência característica do material apropriada a um dado modo de ruptura, f_k, pela propriedade geométrica seccional da peça, X, conforme segue:

$$R_k = f_k \cdot X \qquad [2.62]$$

Por outro lado, a *capacidade nominal* de um elemento estrutural, R, para um dado modo de ruptura, muitas vezes denominada simplesmente *resistência*, é expressa pela fórmula geral:

$$R = k \cdot R_k \qquad [2.63]$$

sendo k o produto dos fatores de modificação relevantes, comentados a seguir, e R_k a capacidade característica do elemento estrutural.

A AS 1720.1/97 fornece as resistências características para diferentes tipos de solicitações, assim como os módulos de elasticidade longitudinal e transversal, calculados através da aplicação de cargas de curta duração. Os valores característicos do módulo de elasticidade, apresentados pelo texto normativo, são determinados a partir da média dos resultados em ensaios cujo tempo de aplicação das forças é de cinco minutos. O módulo de elasticidade inclui uma compensação de aproximadamente 5% para deformação por cisalhamento.

b) Fatores de modificação

b.1) Fator de duração do carregamento, k_1

O efeito da duração do carregamento na resistência da peça estrutural é levado em conta através da aplicação do coeficiente de modificação, k_1, comparado ao $k_{mod,1}$ definido pela norma brasileira, e que é função do tipo de carregamento, de sua duração efetiva e do tipo de material empregado. Relativamente à rigidez, o efeito da duração do carregamento, provocando a fluência, é levado em conta calculando-se a deformação gerada pela aplicação do carregamento de curta duração e multiplicando-a pelo *fator de fluência*, j_2, apropriado às solicitações de compressão e flexo-compressão, provido pelo texto normativo.

b.2) Fator de condição de umidade, k_4

A capacidade característica da madeira é modificada pelo fator denotado por k_4, similar ao $k_{mod,2}$ da norma brasileira, que depende do teor de umidade inicial no instante do carregamento e do esperado ao longo de sua vida útil. A norma australiana considera a possibilidade de utilização da madeira seca ao ar e da madeira verde, indicando, para cada caso, os correspondentes valores do fator k_4.

b.3) Fator de temperatura, k_6

Para estruturas cobertas de madeira sob condições ambientais, segundo o texto normativo, não são necessárias modificações na resistência pelo efeito da temperatura, ou seja, $k_6 = 1,0$.

b.4) Fator de compartilhamento de carga, k_8

Quando um sistema estrutural é constituído por peças paralelas que atuam em conjunto para suportar a um dado carregamento, a capacidade característica pode ser aumentada pelo fator de compartilhamento de carga apropriado. Em sistemas estruturais compostos por dois ou mais elementos efetivamente conectados, tal que todos os elementos estão sujeitos às mesmas deformações, o *fator de compartilhamento de carga*, k_8, é obtido a partir das instruções normativas e aplicado à capacidade característica na flexão e na compressão.

b.5) Fator de estabilidade, k_{12}

Heaney & Kneen (1999) comentam que, agrupando-se os vários parâmetros relacionados com a instabilidade de uma peça comprimida em um único fator de redução de resistência, k_{12}, é possível simplificar demasiadamente o projeto, sendo definido por:

$$k_{12} = \frac{\text{capacidade reduzida da peça devido às instabilidades ou interações}}{\text{capacidade baseada na resistência do material (sem flambagem)}} \qquad [2.64]$$

Conforme esses mesmos autores, na determinação da capacidade de uma peça esbelta de madeira, a excentricidade inicial do carregamento e uma possível curvatura inicial, têm um efeito desprezível na carga de flambagem elástica, sendo seu comportamento descrito pelo modelo de Euler. Para essas peças, o numerador da Equação [2.64] é representado pela capacidade crítica de Euler incluindo-se os efeitos de fluência.

O fator de estabilidade, k_{12}, empregado para modificar as tensões básicas de serviço na compressão, é dado por:

(a) para $\rho\lambda_S \leq 10$ ....: $k_{12} = 1{,}0$ [2.65]

(b) para $10 < \rho\lambda_S \leq 20$ ....: $k_{12} = 1{,}5 - 0{,}05\rho\lambda_S$ [2.66]

(c) para $\rho\lambda_S > 20$ ....: $k_{12} = \dfrac{200}{(\rho\lambda_S)^2}$ [2.67] em que ρ é uma constante que depende do tipo de material empregado, suas condições de umidade e do tipo de carregamento atuante. O parâmetro λ_S nas Equações [2.65] a [2.67] representa o coeficiente de esbeltez – λ_{Sx} ou λ_{Sy} – dependendo da direção analisada. A norma australiana fornece, em seu anexo C, expressões que permitem o cálculo de valores precisos de ρ e também dos coeficientes de esbeltez de peças que não tenham seção transversal retangular, ou seja, casos mais gerais. Obviamente que $k_{12} \leq 1{,}0$.

Embora a AS 1720.1/97 não estabeleça um limite superior para a esbeltez das peças comprimidas, Heaney & Kneen (1999) afirmam que alguns projetistas preferem não usar peças comprimidas com esbeltez $(\rho\lambda_S)$ maior que 50.

c) Parâmetros geométricos

Para peças de madeira maciça com seção transversal retangular, os coeficientes de esbeltez são tomados como demonstrados a seguir, em lugar da formulação tradicional da Resistência dos Materiais:

c.1) *Peças que podem se curvar somente sobre seu eixo de maior inércia*: a norma afirma que, para o caso de sistemas de restrição discretos, o coeficiente de esbeltez denotado por λ_{Sx}, deve ser tomado como o menor dos seguintes:

$$\lambda_{Sx} = \frac{L_{ax}}{h} \qquad [2.68]$$

e

$$\lambda_{Sx} = \frac{K_e L}{h} \qquad [2.69]$$

sendo:

L_{ax} = distância entre pontos de restrição rígida efetiva contra movimento lateral na direção do eixo y, como mostrado na Figura 2.12 (a);

K_e = coeficiente tabelado pela norma australiana, que considera as condições de vinculação das extremidades das barras, conforme Tabela A.2 (Anexo A).

Para sistemas de restrição que impedem movimentos na direção do eixo y e são contínuos ao longo do comprimento da barra, $\lambda_{Sx} = 0{,}0$.

c.2) *Peças que podem se curvar somente sobre seu eixo de menor inércia*: para sistemas de restrição discretos, o coeficiente de esbeltez, denotado por λ_{Sy}, pode ser tomado como o menor dos seguintes:

$$\lambda_{Sy} = \frac{L_{ay}}{b} \qquad [2.70]$$

e

$$\lambda_{Sy} = \frac{K_e L}{b} \qquad [2.71]$$

em que:

L_{ay} = distância entre pontos de restrição rígida efetiva contra movimento lateral na direção do eixo x, como mostrado na Figura 2.12 (b);

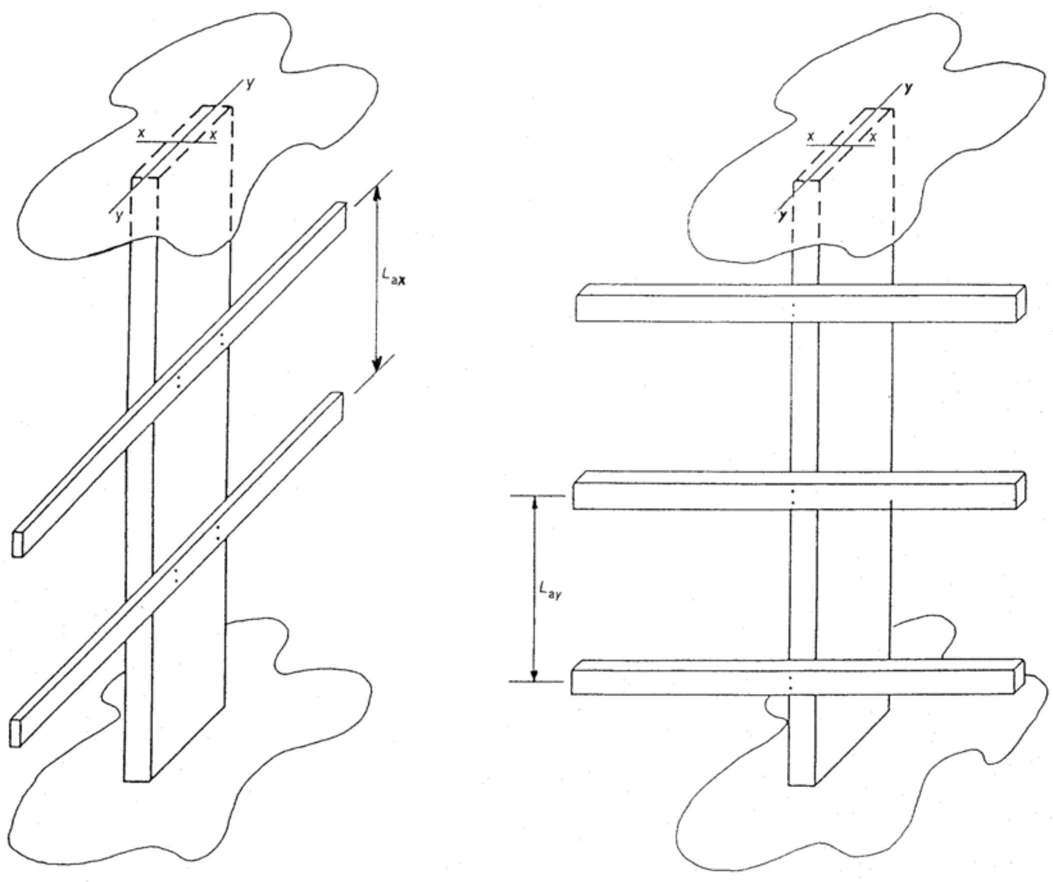
Para sistemas de travamento que atuam continuamente ao longo de uma face, restringindo o movimento na direção do eixo x, o coeficiente de esbeltez pode ser tomado, segundo a AS 1720.1/97, igual a $\lambda_{Sy} = 3{,}5\,h/b$.

c.3) *Peças que podem se curvar sobre ambos os eixos*: o projeto dessas barras, descrito no item (a.2) da seção 2.3.2.2, é baseado na interação de dois casos especiais de flexão somente sobre eixos únicos e, conseqüentemente, nenhuma definição especial de esbeltez é necessária.

A curvatura inicial previamente assumida pelo código australiano, para madeiras classificadas como verdes (teor de umidade da peça excede 25%), é baseada na expressão:

$$\Delta = \frac{L^2}{7500 \cdot h} \qquad [2.72]$$

Sendo Δ a deformação lateral relativa (em mm) e L o comprimento da barra (em mm). Para madeira seca (teor de umidade não excedendo 15%), a norma considera que a deformação lateral é 50% do valor calculado pela Equação [2.72].



(a) flambagem sobre o eixo de maior inércia (b) flambagem sobre o eixo de menor inércia

Figura 2.12 *– Notação para restrições em peças comprimidas. Fonte: AS 1720.1/97*

2.3.2.2 Peças comprimidas

a) Resistência à compressão paralela às fibras

A capacidade de projeto à compressão paralela às fibras de uma peça sem entalhes, ϕN_r, no estado limite de resistência, deve satisfazer à condição:

$$\phi N_r \geq N_{sd} \qquad [2.73]$$

em que:

$\phi =$ fator de capacidade ($\phi = 0{,}8$ para peças de madeira serrada);

N_r = capacidade nominal de uma peça comprimida referida ao eixo de flambagem seccional da peça, conforme itens (a.1) e (a.2) abaixo;

N_{sd} = solicitação de projeto resultante da ação das cargas de compressão.

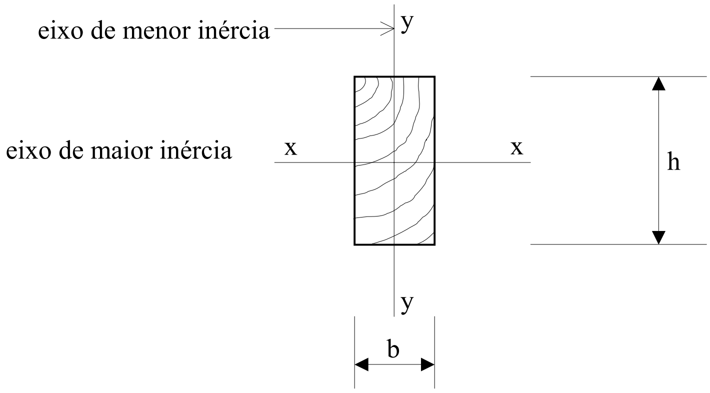


***Figura 2.13** – Notação para a seção transversal retangular. Fonte: AS 1720.1/97*

a.1) Capacidade nominal – Flambagem sobre apenas um eixo

A capacidade nominal à compressão paralela às fibras, N_r, de peças sem entalhes é dada por:

$$N_r = k_1 k_4 k_6 k_8 k_{12} [f_{c0,k} A] \qquad [2.74]$$

sendo:

k_1 a k_{12} = fatores de modificação;

$f_{c0,k}$ = resistência característica na compressão paralela às fibras (corresponde ao 5º quantil da distribuição normal de freqüência);

A = área da seção transversal.

a.2) Capacidade nominal – Flambagem sobre ambos os eixos

Quando uma peça comprimida pode flambar sobre ambos os eixos, sua resistência no estado limite deve satisfazer às equações:

$$\phi N_{rx} \geq N_{sd} \qquad [2.75]$$

e

$$\phi N_{ry} \geq N_{sd} \qquad [2.76]$$

em que:

ϕN_{rx} = capacidade de projeto à compressão paralela às fibras para flambagem sobre o eixo x, determinada conforme descreve a seção anterior;

ϕN_{ry} = idem, porém sobre o eixo y.

2.3.2.3 Peças flexocomprimidas

No projeto de uma peça de seção transversal retangular, como mostra a Figura 2.13, submetida à ação do esforço axial de compressão combinado com o momento fletor somente sobre o eixo x, devem ser satisfeitas as seguintes expressões:

$$\left(\frac{M_{sx,d}}{\phi M_{rx}}\right)^2 + \left(\frac{N_{sd}}{\phi N_{ry}}\right) \leq 1 \qquad [2.77]$$

$$\left(\frac{M_{sx,d}}{\phi M_{rx}}\right) + \left(\frac{N_{sd}}{\phi N_{rx}}\right) \leq 1 \qquad [2.78]$$

em que:

$M_{sx,d}$ = efeito da ação de projeto na flexão, produzido pelas ações de projeto atuando sobre o eixo de maior resistência à flexão;

M_{rx} = capacidade de projeto na flexão sobre o eixo de maior resistência.

O texto normativo afirma que as Equações [2.77] e [2.78] contêm uma compensação para o efeito de amplificação do momento fletor devido ao carregamento axial. Elas são obtidas a partir da consideração de $M_{sy,d} = 0$ nas Equações [2.79] e [2.80]. Para seções transversais não retangulares essas equações podem ser usadas, na ausência de outras informações mais precisas.

Para o caso, classificado como incomum pela AS 1720.1/97, de uma peça de seção transversal retangular sujeita, simultaneamente, a um carregamento axial de compressão e à flexão em ambos os eixos (x e y), um critério conservador para a resistência é dado pelas condições seguintes, na ausência de informações mais precisas:

$$\left(\frac{M_{sx,d}}{\phi M_{rx}}\right)^2 + \left(\frac{M_{sy,d}}{\phi M_{ry}}\right) + \left(\frac{N_{sd}}{\phi N_{ry}}\right) \leq 1 \qquad [2.79]$$

$$\left(\frac{M_{sx,d}}{\phi M_{rx}}\right) + \left(\frac{M_{sy,d}}{\phi M_{ry}}\right)^2 + \left(\frac{N_{sd}}{\phi N_{rx}}\right) \leq 1 \qquad [2.80]$$

Novamente, o texto normativo comenta que as expressões acima contêm uma compensação para o efeito de amplificação do momento fletor devido ao carregamento axial e tais expressões podem ser usadas para outras formas de seção transversal, na ausência de informações mais precisas.

Leicester[1], apud Madsen (1992), propôs a expressão de verificação das peças flexocomprimidas abaixo, que considera a possibilidade de flambagem sobre o eixo de menor inércia devido ao momento aplicado segundo o eixo de maior inércia. Nota-se a semelhança desta expressão com a condição proposta pela norma australiana, especialmente a Equação [2.77].

$$\frac{N}{N_{r,y}} + \left(\frac{M}{M_r}\right)^2 < 1{,}0 \qquad [2.81]$$

Na expressão anterior, $N_{r,y}$ é o esforço resistente à compressão axial da peça, considerando a flambagem sobre o eixo de menor inércia.

---

[1] LEICESTER, R. H. (1988). *Beam-column formulae for design codes*. Proceedings, CIB-WISA Timber Structures meeting, Parksville, B.C., Canada.