

2.3.6 Norma norte-americana – AF&PA/ASCE 16-95/96

A *American Forest & Paper Association* (AF&PA) uniu-se à *American Society of Civil Engineers* (ASCE) para elaborar a primeira norma norte-americana de projeto de estruturas de madeira fundamentada no método dos estados limites: *Standard for Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Engineered Wood Construction – AF&PA/ASCE 16-95*, publicada em 1996 pela *American Forest & Paper Association*.

2.3.6.1 Condições de referência e fatores de ajuste

A resistência de referência de uma determinada peça a um dado tipo de esforço, R , é determinada adotando-se como padrão as seguintes condições:

- O material é usado em estado seco, cujo teor de umidade de equilíbrio é definido no texto normativo;
- As condições de exposição contínua da madeira não ultrapassam a temperatura de 32 °C e, ocasionalmente, podendo atingir temperaturas de até 65 °C;
- Os produtos de madeira não são tratados, exceto postes e estacas;
- Os materiais são novos, isto é, não estão sendo reutilizados;
- As peças são simples, sem compartilhamento de carregamento ou ação composta.

A AF&PA/ASCE 16-95/96 afirma que, onde não há a indicação para o cálculo dos fatores de ajuste, os correspondentes coeficientes para madeira serrada, madeira laminada e colada, estacas de madeira ou conexões devem ser tomados a partir da *National Design Specification for Wood Construction – NDS/91*, estando previstos a aplicação de **fatores de ajuste ao uso final**: C_M (fator de condição de umidade de serviço), C_t (fator de temperatura), C_{pt} (fator de tratamento preservativo), C_{rt} (fator de tratamento retardante da ação do fogo); **fatores de ajuste devidos à configuração das peças**: C_E (fator de composição de peças), C_r (fator de compartilhamento de carga), C_F (fator de dimensão), C_P (fator de estabilidade de pilares), C_f (fator de forma); e **fatores de ajuste adicionais para a madeira estrutural**: C_H (fator de cisalhamento), C_T (fator de rigidez à flambagem) e C_{fu} (fator de uso).

Para os estados limites de resistência ou de estabilidade, as equações de projeto exigem o uso do valor ajustado correspondente ao 5º quantil, E'_{05} , ao invés de E' (módulo de elasticidade médio – valor ajustado), sendo calculado através das expressões:

$$E'_{05} = 0,84E' \quad \text{expressão válida para madeira serrada (classificação tipo MSR)} \quad [2.128]$$

$$E'_{05} = 0,78E' \quad \text{expressão válida para madeira serrada (classificação tipo MEL)} \quad [2.129]$$

Todavia, o módulo de elasticidade é assumido como independente do tempo sob carregamento, não devendo-se ajustá-lo pelo fator de efeito de tempo, λ_t .

2.3.6.2 Valores das resistências de projeto (ou ajustadas)

A *resistência de projeto*, R_d , é genericamente determinada pela expressão:

$$R_d = R \cdot C_n \quad [2.130]$$

em que R é a resistência de referência (tabelada) e C_n representa o produto de todos os fatores de ajuste aplicáveis, tabelados pela AF&PA/ASCE 16-95/96.

2.3.6.3 Peças comprimidas

Os procedimentos normativos, aqui apresentados, aplicam-se ao projeto de peças sujeitas à compressão centrada, devendo satisfazer à condição:

$$N_{sd} \leq \lambda_t \phi_c N_{rd} \quad [2.131]$$

em que:

N_{sd} = solicitação de compressão devida às ações combinadas;

λ_t = fator de efeito de tempo correspondente (tabelado);

ϕ_c = fator de resistência para compressão paralela às fibras ($\phi_c = 0,90$);

N_{rd} = resistência de projeto à compressão paralela às fibras, obtida pela Equação [2.132].

O índice de esbeltez do pilar não deve exceder 175, sendo calculado, para efeito de aplicação nesta norma, pela forma tradicional ($K_e L/i$). Seu módulo é função dos coeficientes de comprimento de flambagem, K_e , apresentados na Tabela A.4 (idênticos aos da NDS/91).

Como no critério das tensões admissíveis, alguns dos estados limites relacionados para o comportamento das peças comprimidas são uma combinação de considerações de resistência e rigidez. Isso apresenta uma dificuldade no método dos estados limites porque, nesse critério, o fator de efeito de tempo é aplicado depois que a resistência da peça é calculada, ao contrário do método das tensões admissíveis, em que os efeitos de duração de carregamento são fatorados dentro das equações de comportamento. Essa dificuldade foi solucionada pela inserção do parâmetro E/λ_t nas equações de resistência da peça e que se verifica na Equação [2.135]. O λ_t no denominador, então, cancela o λ_t no termo $\lambda_t \phi_c N_{rd}$, resultando num estado limite de flambagem independente do tempo.

A resistência de cálculo de uma peça comprimida de madeira serrada é, deste modo, determinada a partir do comportamento da peça segundo a direção de esbeltez mais crítica, sendo computada por:

$$N_{rd} = C_p \cdot A \cdot f_{c0,d}^* \quad [2.132]$$

que também pode ser escrita como:

$$N_{rd} = C_p \cdot N_d^* \quad [2.133]$$

e o fator de estabilidade de peças comprimidas, C_p , calculado por:

$$C_p = \frac{1 + \alpha_c}{2c} - \sqrt{\left(\frac{1 + \alpha_c}{2c}\right)^2 - \frac{\alpha_c}{c}} \quad [2.134]$$

em que:

$$\alpha_c = \frac{\phi_s N_E}{\lambda_t \phi_c N_d^*} \quad [2.135]$$

e

$$N_E = \frac{\pi^2 E'_{05} I}{(K_e L)^2} = \frac{\pi^2 E'_{05} A}{(K_e L/i)^2} \quad [2.136]$$

sendo:

A = área bruta;

$f_{c0,d}^*$ = resistência à compressão paralela às fibras multiplicada por todos os fatores de ajuste aplicáveis, exceto C_p ;

E'_{05} = módulo de elasticidade ajustado ao 5º quantil, segundo a direção considerada;

N_E = esforço crítico de flambagem (Euler) sobre o eixo sendo considerado;

N_d^* = resistência de cálculo de uma peça sujeita à força axial, paralela às fibras, com comprimento igual a zero, isto é, o limite obtido com comprimento aproximando-se de zero;

$c = 0,80$ para peças de madeira serrada;

ϕ_s = fator de resistência para estabilidade ($\phi_s = 0,85$).

A AF&PA/ASCE 16-95/96 afirma que a equação de projeto de peças comprimidas – Equação [2.134] – tem a mesma base que a similar encontrada na NDS/91. Essa equação é escrita como um fator de correção, relacionado à estabilidade, aplicado à resistência de cálculo de peças curtas, N_d^* . O fator C_p é uma função da razão entre o esforço de flambagem de Euler e a resistência de peças curtas.

Para fornecer a correta inclusão do fator de efeito de tempo e dos fatores de estabilidade e resistência à compressão, o parâmetro α tem sido definido como $\phi_s / \lambda_c \phi_c$ multiplicado pelo valor original de α , que é igual à força de flambagem de Euler dividido pela resistência de peças muito curtas, conforme Equação [2.135].

Elevados valores de esbeltez conduzem à valores de C_p muito baixos, tornando a resistência ajustada à compressão axial sensivelmente pequena. Por outro lado, para peças muito curtas, C_p aproxima-se da unidade para todos os valores de “c” e a definição de α não tem efeito. Assim, a peça muito curta é sujeita ao fator de efeito de tempo e ao fator de solicitação para compressão axial. A maioria dos pilares estão entre esses extremos e são, assim, parcialmente sujeitos aos três fatores: ϕ_s , ϕ_c e λ_c .

Segundo o documento normativo, o fator de estabilidade, ϕ_s , considera as incertezas, tais como a variação na rigidez de projeto do material, pequenas excentricidades acidentais e efeitos da fluência, que é muito menos dominante que a curvatura inicial para os pilares típicos, parcialmente porque as ações máximas de projeto são de curta duração. O efeito da fluência pode ser modelado pela diminuição no valor de E_{05} .

2.3.6.4 Peças flexocomprimidas

As recomendações normativas, contidas nesta seção, são válidas para peças sujeitas à flexão sobre os dois eixos principais e/ou flexão combinada com forças axiais de compressão e para aquelas submetidas à compressão excêntrica. A verificação para esse tipo de sollicitação, de modo similar ao contido na NDS/91, representa um modelo de interação entre os casos de flexão e compressão axial, devendo ser satisfeita a seguinte condição:

$$\left(\frac{N_{sd}}{\lambda_t \phi_c N_{rd}} \right)^2 + \frac{M_{mx}}{\lambda_t \phi_b M_{rd,x}} + \frac{M_{my}}{\lambda_t \phi_b M_{rd,y}} \leq 1,0 \quad [2.137]$$

Nessa expressão, tem-se:

N_{sd} = força de compressão axial devida às combinações de ações;

N_{rd} = esforço resistente de cálculo à compressão axial pura (sem momentos), correspondente ao eixo de flambagem que gera o menor valor de N_{rd} – Equação [2.132];

M_{mx} = valor de projeto do momento fletor solicitante, relativo ao eixo x, incluindo qualquer amplificação gerada pelos efeitos de segunda ordem – Equação [2.142];

M_{my} = idem, relativo ao eixo y – Equação [2.143];

$M_{rd,x}$ = valor de projeto do momento fletor resistente, segundo o eixo x, calculado a partir da Equação [2.138], com $c_b = 1,00$;

$M_{rd,y}$ = idem, segundo o eixo y.

Todos os termos da Equação [2.137] devem ser tomados como positivos. O fator de efeito de tempo, λ_t , que aparece em todos os termos da equação de interação, deve ter o mesmo valor

em todos eles. Isto é consistente com a filosofia do método dos estados limites, que considera muitas combinações de ações, cada qual com um carregamento dominante diferente. O fator de resistência na flexão é igual a $\phi_b = 0,85$. Muitos dos parâmetros contidos na equação de interação variam ao longo do comprimento da peça; para tais casos, o projeto da peça deve ser baseado na situação mais crítica, diz a AF&PA/ASCE 16-95/96.

O momento fletor resistente, $M_{rd,x}$, quando a seção transversal tem a forma retangular, é calculado pela expressão abaixo, com sua forma similar para o cálculo de $M_{rd,y}$:

$$M_{rd,x} = C_L W_x f_{bx}^* \quad [2.138]$$

em que:

C_L = fator de estabilidade lateral, calculado pela Expressão [2.139];

W_x = módulo de resistência, segundo o eixo x;

f_{bx}^* = valor de projeto da resistência à flexão, válida para o eixo de flexão x, multiplicada por todos os fatores de ajuste, exceto o C_L .

O fator de estabilidade lateral, C_L , é determinado a partir da expressão abaixo, com $c_b = 1,00$:

$$C_L = \frac{1 + \alpha_b}{2c_b} - \sqrt{\left(\frac{1 + \alpha_b}{2c_b}\right)^2 - \frac{\alpha_b}{c_b}} \quad [2.139]$$

em que:

$$\alpha_b = \frac{\phi_s M_e}{\lambda_t \phi_b M_x^*} \quad [2.140]$$

sendo:

M_e = momento de flambagem lateral elástica, conforme Equação [2.141];

M_x^* = momento resistente, segundo o eixo de flexão x, multiplicado por todos os fatores de ajuste aplicáveis, exceto C_{fu} e C_L .

Quando são satisfeitas as providências exigidas pela norma para determinação do comprimento efetivo, L_e , o momento de flambagem lateral elástica para seções retangulares é calculado pela expressão:

$$M_e = 2,40 \cdot E'_{y,05} \cdot \frac{I_y}{L_e} \quad [2.141]$$

em que:

$E'_{y,05}$ = módulo de elasticidade ajustado ao 5º quantil, para flexão ocorrendo segundo o eixo y;

I_y = momento de inércia em relação ao eixo y.

No caso de seções transversais circulares ou quadradas sendo flexionadas sobre sua diagonal, a AF&PA/ASCE 16-95/96 indica os fatores de forma, C_f , que devem multiplicar o segundo membro da Equação [2.138].

A forma geral da Equação [2.137], incluindo o quadrado do termo da compressão axial, é derivada dos estudos de Zahn (1986 e 1988). Como afirma o documento normativo, o quadrado do termo das forças axiais resulta em um critério de interação menos conservador que para uma combinação linear deles.

Os momentos ampliados, M_{mx} e M_{my} , devem ser determinados usando-se as Equações [2.142] e [2.143], as quais incluem multiplicadores separados para os momentos de primeira ordem gerados pelas forças que não resultam em apreciável deslocamento lateral, chamados M_{bx} e M_{by} , e para os momentos de primeira ordem gerados por quaisquer forças atuando em uma estrutura rígida ou peça engastada que resulta em apreciável deslocamento lateral, denominados M_{sx} e M_{sy} :

$$M_{mx} = B_{bx} M_{bx} + B_{sx} M_{sx} \quad [2.142]$$

$$M_{my} = B_{by} M_{by} + B_{sy} M_{sy} \quad [2.143]$$

Nessas expressões, têm-se:

M_{bx} = momento fatorado de primeira ordem, gerado pelas ações que não resultam em apreciável deslocamento lateral (sem translação lateral) da peça, calculado por uma análise convencional de primeira ordem, na direção do eixo x. Incluem as cargas gravitacionais sobre um reticulado não contraventado e todos os tipos de ações em um reticulado contraventado. O índice “b” é originado do termo *braced* do idioma inglês;

M_{by} = idem, na direção do eixo y;

M_{sx} = momento fatorado de primeira ordem, gerado pelas ações que resultam em apreciável deslocamento lateral (translação lateral), calculado por uma análise convencional de primeira ordem, na direção do eixo x. É resultado da aplicação de ações tais como o vento ou outras ações laterais atuando em um reticulado rígido. O índice “s” é originado do termo *sway* do idioma inglês;

M_{sy} = idem, na direção do eixo y.

Para as peças estruturais não travadas contra deslocamentos laterais, os parâmetros B_{bx} , B_{by} , B_{sx} e B_{sy} são considerados e determinados pelas Equações [2.144] a [2.147]. Já para peças travadas contra apreciáveis deslocamentos laterais, permite-se que os termos B_{sx} e B_{sy} sejam tomados como zero.

$$B_{bx} = \frac{C_{mx}}{\left(1 - \frac{N_{sd}}{\phi_c N_{ex}}\right)} \geq 1,0 \quad [2.144]$$

$$B_{by} = \frac{C_{my}}{\left[1 - \frac{N_{sd}}{\phi_c N_{ey}} - \left(\frac{M_x}{\phi_b M_e}\right)^2\right]} \geq 1,0 \quad [2.145]$$

$$B_{sx} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\sum N_{sd}}{\phi_c \sum N_{ex}}\right)} \geq 1,0 \quad [2.146]$$

$$B_{sy} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\sum N_{sd}}{\phi_c \sum N_{ey}}\right)} \geq 1,0 \quad [2.147]$$

sendo:

N_{ex} = esforço crítico de flambagem sobre o eixo x;

N_{ey} = idem, sobre o eixo y;

M_x = momento fletor devido às ações combinadas, na direção do eixo x;

$\sum N_{sd}$ = somatória das forças axiais de compressão devidas às ações combinadas, para peças envolvidas no modo de deslocamento lateral que está sendo considerado;

$\sum N_{ex}$ = somatória da resistência crítica de flambagem para peças envolvidas no modo de deslocamento lateral que está sendo considerado, com todas as peças movendo-se na direção do deslocamento lateral que flexiona o elemento que está sendo investigado, sobre seu eixo x;

$\sum N_{ey}$ = idem, sobre seu eixo y.

Para uma peça engastada, somente as quantidades axiais para a peça simples devem ser incluídas nessas somas. As Equações [2.144] a [2.147] representam as porções de momento que refletem os efeitos de segunda ordem e, assim, são identificadas como termos amplificadores do momento fletor.

Os fatores C_{mx} e C_{my} podem ser entendidos como parâmetros que relacionam a forma do diagrama de momentos real a um diagrama de momento uniforme equivalente, sendo calculados conforme segue:

- (a) para peças comprimidas travadas contra translação lateral dos nós, com extremidades restringidas contra rotação e não sujeitas a carregamento transversal entre seus suportes e no plano de flexão sendo considerado:

$$C_m = 0,60 - 0,40 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \quad [2.148]$$

em que M_1/M_2 é a relação do momento de extremidade de menor magnitude ao momento de maior magnitude daquela porção da peça sem travamento no plano de flexão em consideração, com M_1/M_2 negativo para curvatura simples;

(b) para peças comprimidas travadas contra translação dos nós, no plano de carregamento em consideração, sujeitas a carregamentos transversais entre esses nós, C_m deve ser determinado por uma análise racional. Como uma alternativa para tal análise, os seguintes valores podem ser usados:

- para peças cujas extremidades são restringidas contra rotação, $C_m = 0,85$;
- para peças cujas extremidades não são restringidas contra a rotação, $C_m = 1,00$.

Assim como faz a NDS/91, a AF&PA/ASCE 16-95/96 considera a possibilidade de um pilar ser carregado lateralmente, desde que isto ocorra na quarta parte superior da peça, por meio de dispositivos como braços ou cantoneiras. Neste caso, a carga axial excêntrica deve ser adicionada às demais cargas axiais e, na metade do comprimento do pilar, aplica-se uma força lateral na mesma direção do momento devido à excentricidade do carregamento. O texto normativo fornece a expressão para o cálculo desta força lateral a ser aplicada.