

2.2 Dimensionamento segundo a norma brasileira

A norma brasileira para o projeto das estruturas de madeira em vigor, "NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira", tem como base o método semiprobabilístico dos estados limites para verificação da segurança estrutural. Substituiu a "NBR 7190/82 - Cálculo e execução de estruturas de madeira", que se fundamentava no método determinístico das tensões admissíveis, sendo idêntica à "NB 11/51 - Cálculo e execução de estruturas de madeira", primeira norma brasileira para o cálculo das estruturas de madeira.

Fusco (1992) descreve de forma objetiva e precisa o processo de transição do método das tensões admissíveis para o seu sucessor, afirmando que a partir da década de 60 iniciou-se o processo generalizado de considerar as variáveis estruturais como sendo aleatórias e, no início da década de 70, consolidou-se o método probabilístico dos estados limites. A resistência do material foi a principal variável tratada como aleatória. Por questões de operacionalização de uma aplicação generalizada do método probabilístico, comenta esse autor, a teoria de segurança adotada pela NBR 7190/97 é tratada no nível I, na qual a aleatoriedade das variáveis se faz individualmente, para cada uma das variáveis básicas de solicitação e de resistência. Contudo, considerando os aspectos determinísticos envolvidos nesses conceitos, Lahr (2000) comenta que a aplicabilidade de tais condições é viável apenas se o método for adequadamente calibrado em função da prática profissional admitida como satisfatória.

2.2.1 Parâmetros para o dimensionamento

2.2.1.1 Parâmetros de resistência

Os esforços resistentes dos elementos estruturais de madeira são determinados a partir da hipótese simplificadora de comportamento elasto-frágil do material. Para a aplicação prática do método probabilista ao nível I, relata Fusco (1992), é preciso estabelecer os valores extremos de solicitação e de resistência, que são chamados *valores de cálculo* ou *de projeto (design)*. Ainda, segundo Fusco (1992 e 1995a), estudos mostram que há a necessidade de introdução de coeficientes de modificação, k_{mod} , para considerar as influências que não são levadas em conta pelos coeficientes de minoração. Assim, o valor de projeto da resistência à compressão paralela às fibras é, então, calculado pela expressão:

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w} \quad [2.14]$$

na qual:

γ_w = coeficiente de minoração das propriedades da madeira. A NBR 7190/97 adota o valor de $\gamma_w = 1,4$ para a compressão paralela às fibras.

Os valores de k_{mod} são obtidos pela combinação de três parcelas: uma delas que considera a classe de carregamento da estrutura ($k_{mod,1}$), outra que leva em conta a classe de umidade admitida ($k_{mod,2}$) e outra que avalia o emprego de madeira não classificada ($k_{mod,3}$), resultando em:

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \quad [2.15]$$

Tabela 2.1 – Valores do coeficiente de modificação, $k_{mod,1}$. Fonte: NBR 7190/97

Classes de carregamento	Tipos de material	
	Madeira serrada, madeira laminada e colada, madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Tabela 2.2 – Valores do coeficiente de modificação, $k_{mod,2}$. Fonte: NBR 7190/97

Classe de umidade	Tipos de material	
	Madeira serrada, madeira laminada colada, madeira compensada	Madeira recomposta
(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9

Dicotiledôneas classificadas como de primeira categoria têm um $k_{\text{mod},3} = 1,0$; se, de segunda categoria, $k_{\text{mod},3} = 0,8$. Coníferas, em quaisquer casos, têm um $k_{\text{mod},3} = 0,8$.

2.2.1.2 Parâmetros de rigidez

Nas situações de verificação dos estados limites últimos ou de utilização, em que aparecem os parâmetros de rigidez da madeira, o módulo de elasticidade longitudinal deve ser usado com o seu valor efetivo, calculado por:

$$E_{c0,ef} = k_{\text{mod},1} \cdot k_{\text{mod},2} \cdot k_{\text{mod},3} \cdot E_{c0,m} \quad [2.16]$$

2.2.1.3 Parâmetros geométricos

A classificação de uma peça comprimida, para efeito de dimensionamento, é baseada na sua esbeltez, ou seja, na relação entre o comprimento de flambagem (L_0) e o raio de giração mínimo da seção transversal (i_{min}):

$$\lambda = \frac{L_0}{i_{\text{min}}} \quad [2.17]$$

Para peça de comprimento efetivo, L , engastada em uma das extremidades e livre na outra, $L_0 = 2L$. Para peças em que as duas extremidades são indeslocáveis por flexão, não se considera qualquer redução em decorrência da eventual continuidade estrutural da peça. Nesse caso, $L_0 = L$. Nos elementos estruturais comprimidos, o comprimento máximo não pode ultrapassar 40 vezes a dimensão transversal correspondente ao eixo de flambagem (limite de esbeltez).

A NBR 7190/97 classifica as peças comprimidas a partir de seus respectivos índices de esbeltez, λ , como segue:

- Peças curtas $\Rightarrow \lambda \leq 40$
- Peças medianamente esbeltas $\Rightarrow 40 < \lambda \leq 80$
- Peças esbeltas $\Rightarrow 80 < \lambda \leq 140$

Nos critérios de dimensionamento das peças medianamente esbeltas e esbeltas se consideram as seguintes excentricidades, assim definidas:

- **e_a – excentricidade acidental mínima:** representa as imperfeições geométricas das peças e as inevitáveis excentricidades dos carregamentos, adotando-se:

$$e_a = \frac{L_0}{300} \quad [2.18]$$

em que L_0 é o comprimento de flambagem;

- **e_i – excentricidade inicial:** resulta da aplicação dos valores de cálculo do momento fletor (M_{1d}) e do esforço normal de compressão (N_d) na situação de projeto, ou seja, ainda sem amplificação devido à teoria de segunda ordem. É calculada pela Equação [2.19], não devendo ser tomada com um valor inferior a $h/30$, em que h é a altura da peça referente ao plano de verificação da estabilidade.

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} = \frac{M_{1gd} + M_{1qd}}{N_d} \quad [2.19]$$

sendo:

M_{1gd} = momento fletor provocado pela ação permanente – valor de cálculo;

M_{1qd} = momento fletor provocado pelas ações variáveis – valor de cálculo.

- **e_1 – excentricidade de primeira ordem:** é definida como a soma das excentricidades inicial e acidental:

$$e_1 = e_i + e_a \quad [2.20]$$

2.2.2 Peças comprimidas

Analisando as prescrições do código brasileiro é possível se constatar que, apenas na hipótese de se ter uma peça curta, o dimensionamento será feito pela regra clássica à

compressão simples, sendo dispensada a avaliação de eventuais efeitos da flexão. Neste caso, a verificação da segurança se faz, unicamente, em relação à resistência às tensões normais de compressão paralela às fibras pela condição:

$$\sigma_{c0,d} = \frac{N_d}{A} \leq f_{c0,d} \quad [2.21]$$

na qual:

$\sigma_{c0,d}$ = valor de cálculo da tensão de compressão atuante;

N_d = valor de cálculo do esforço normal de compressão;

A = área da seção transversal, não se descontando os furos para aplicação de pinos;

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

Observa-se que para os demais casos, isto é, com $\lambda > 40$, mesmo que a solicitação de cálculo seja apenas à compressão centrada, a verificação da estabilidade deve ser feita admitindo-se uma excentricidade accidental do esforço de compressão. Essa excentricidade é devida a imperfeições geométricas das peças, excentricidades inevitáveis dos carregamentos e acréscimos das excentricidades devidos aos efeitos de segunda ordem. Concluindo, as peças medianamente esbeltas e as esbeltas têm a sua estabilidade verificada segundo os critérios de peças flexocomprimidas.

2.2.3 Peças flexocomprimidas

As peças estruturais sujeitas à flexo-compressão devem ser verificadas em duas situações distintas relativamente às tensões normais: uma que verifica a resistência e a outra que inspeciona a estabilidade da peça. Além dessas, também devem ser verificados o estado limite último referente às tensões de cisalhamento e o estado limite de utilização, para os casos de flexão simples e oblíqua.

2.2.3.1 Estado limite último: tensões normais

A condição de segurança relativa à resistência das peças de madeira flexocomprimidas é dada pela mais rigorosa das Expressões [2.22] e [2.23], aplicadas ao ponto mais solicitado da

borda mais comprimida. A função quadrática, segundo a NBR 7190/97, é adotada para se levar em consideração a influência das tensões devidas à força normal de compressão.

$$\left(\frac{\sigma_{N,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad [2.22]$$

$$\left(\frac{\sigma_{N,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad [2.23]$$

Nessas expressões, tem-se:

$\sigma_{N,d}$ = valor de cálculo da tensão normal devida ao esforço de compressão, determinada conforme a Equação [2.21];

$\sigma_{Mx,d}$ = tensão máxima devida à componente de flexão atuante, segundo a direção x;

$\sigma_{My,d}$ = tensão máxima devida à componente de flexão atuante, segundo a direção y;

k_M = coeficiente de correção, que pode assumir os seguintes valores: $k_M = 0,5$ para seções transversais retangulares e $k_M = 1,0$ para as demais seções transversais.

2.2.3.2 Estado limite último: instabilidade

A verificação da instabilidade, aqui apresentada, aplica-se tanto à situação de flexo-compressão quanto à de compressão centrada, devendo ser realizada segundo os dois planos que contêm os eixos principais da seção transversal da peça.

a) Verificação de peças curtas ($\lambda \leq 40$)

Para peças comprimidas classificadas como curtas é dispensada a verificação da estabilidade, sendo suficiente a verificação da condição de resistência dada pela Equação [2.21], no caso de compressão centrada, ou pelas Equações [2.22] e [2.23], no caso de peças flexocomprimidas.

b) Verificação de peças medianamente esbeltas ($40 < \lambda \leq 80$)

O código brasileiro afirma que a condição de segurança relativa ao estado limite último de instabilidade é atendida se, no ponto mais comprimido da seção transversal, for respeitada a Expressão [2.24], aplicada isoladamente para os planos de rigidez mínima e máxima da peça.

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad [2.24]$$

Na expressão acima, tem-se:

σ_{Nd} = valor de cálculo da tensão de compressão devida à força normal de compressão (N_d);

σ_{Md} = valor de cálculo da tensão de compressão devida ao momento fletor de 2ª ordem (M_d).

O momento fletor de 2ª ordem, M_d , é obtido a partir da excentricidade de 1ª ordem com a devida amplificação, sendo dado por:

$$M_d = N_d \cdot e_1 \cdot \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad [2.25]$$

A parcela $\left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right)$, segundo Timoshenko & Gere (1963) e Timoshenko (1982), representa a influência da força de compressão longitudinal, N_d , no cálculo dos deslocamentos, quando a carga atuante é de grande intensidade. O parâmetro F_E é a carga crítica de Euler – ver Equação [2.26] –, em que I representa o momento de inércia da seção transversal relativo ao plano de flexão em que se está verificando a estabilidade.

$$F_E = \frac{\pi^2 E_{c0,ef} I}{L_0^2} \quad [2.26]$$

c) Verificação de peças esbeltas ($80 < \lambda \leq 140$)

As peças esbeltas passam pelas verificações dos estados limites de resistência e de instabilidade, a exemplo das medianamente esbeltas. Porém, neste caso, deve-se aumentar a excentricidade de 1ª ordem, e_1 , de um valor referente à *excentricidade suplementar* de 1ª ordem, e_c , que representa a fluência da madeira.

$$e_{1,ef} = e_1 + e_c = e_i + e_a + e_c \quad [2.27]$$

A excentricidade suplementar, e_c , é determinada a partir da excentricidade inicial devida apenas à carga permanente, e_{ig} , que é calculada como indica a equação:

$$e_{ig} = \frac{M_{1gd}}{N_{gd}} \quad [2.28]$$

na qual:

M_{1gd} = valor de cálculo do momento fletor devido apenas à carga permanente, na situação de projeto.

Logo, a excentricidade suplementar é obtida a partir da seguinte equação:

$$e_c = (e_{ig} + e_a) \cdot \left\{ e^{\left\{ \frac{\phi [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]}{F_E - [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]} \right\}} - 1 \right\} \quad \text{com } (\psi_1 + \psi_2) \leq 1 \quad [2.29]$$

em que:

ϕ = coeficiente de fluência, dado na Tabela 2.3;

N_{gk} = valor característico da força normal devida às ações permanentes;

N_{qk} = valor característico da força normal devida às ações variáveis;

ψ_1 e ψ_2 = fatores de utilização, tabelados pela NBR 7190/97.

Tabela 2.3 – Coeficientes de fluência, ϕ . Fonte: NBR 7190/97

Classes de carregamento	Classes de umidade	
	(1) e (2)	(3) e (4)
Permanente ou de longa duração	0,8	2,0
Média duração	0,3	1,0
Curta duração	0,1	0,5

Assim, o momento fletor de 2ª ordem é calculado por:

$$M_d = N_d \cdot e_{1,ef} \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad [2.30]$$

Faz-se a verificação da estabilidade, então, de maneira análoga ao caso anterior, utilizando-se a Equação [2.24].

No cálculo da excentricidade suplementar e , conseqüentemente, da excentricidade de 1ª ordem efetiva, a NBR 7190/97 exige que não se adote um valor menor que $h/30$ para a excentricidade acidental mínima. Entretanto, para as seções transversais retangulares, essa exigência é contrária à segurança, já que em peças esbeltas, deve-se ter $\lambda \geq 80$, ou seja:

$$\frac{3,46 \cdot L_0}{h} \geq 80 \quad \text{que conduz a:} \quad \frac{L_0}{h} \geq 23 \quad [2.31] \text{ e } [2.32]$$

No entanto, a partir da Equação [2.18], se tem:

$$L_0 = 300 \cdot e_a \quad [2.33]$$

Substituindo-se o valor de L_0 na Equação [2.32] e fazendo-se os devidos ajustes, permite-se concluir que:

$$e_a \geq h/13 \quad [2.34]$$

Partindo da consideração de que a madeira é um material viscoelástico e da hipótese de linearidade da fluência (já que ela ocorre sob a ação de esforços de longa duração), Alvim (2000) e Alvim & Veloso (2002) mostram que a função de fluência, ϕ , é tal que:

$$\phi = \bar{\varepsilon}_{o,c} \cdot E_{c0,m} \quad [2.35]$$

em que $\bar{\varepsilon}_{o,c}$ é a deformação unitária específica da madeira na direção longitudinal devida à fluência. O cálculo da parcela de deformação devida à fluência, num instante genérico t , é dado por:

$$e_c = e_2 \cdot e^{\left(\frac{\phi \cdot N}{F_E - N}\right)} \quad [2.36]$$

na qual o termo e_2 representa a flecha no meio da barra, amplificada pela aplicação do esforço normal N . Com o ajuste do esforço normal N às situações de carregamento possíveis para o elemento estrutural de madeira, chega-se finalmente à Equação [2.29].

2.2.4 Considerações sobre os critérios da norma brasileira

Na implantação do método dos estados limites, as peças sujeitas à compressão paralela às fibras foram aquelas que sofreram as transformações mais acentuadas em seus critérios de cálculo. Nesta seção pretende-se discutir particularidades resultantes da aplicação das recomendações do texto normativo, motivos que justificam e motivaram a elaboração do presente trabalho.

A avaliação da segurança nas estruturas é um tema sempre complexo, já que envolve decisões de natureza empírica na expectativa de quantificação de fatores de segurança. Para que uma nova versão normativa contribua para o desenvolvimento da técnica de projetar estruturas, ela não pode produzir um impacto negativo sobre os profissionais nela interessados, afirma o anexo F da NBR 7190/97.

Fusco (1995a, 1995b) comenta que, visando a sua fácil aceitação, a boa técnica de normalização recomendou a calibração do atual código normativo – que é detalhada nesse

trabalho pelo autor – e complementa informando que, em decorrência das particularidades anatômicas da madeira, os arranjos estruturais usuais buscam explorar principalmente a resistência às tensões atuantes paralelamente às fibras, sendo esse o ponto central do processo de calibração. Todavia, depois de sua implantação e sedimentação no meio profissional, cautelosamente, podem ser discutidos os parâmetros que compõem a segurança global da estrutura, em função dos resultados da aplicação desta nova versão do código normativo.

Não obstante seja inegável o avanço alcançado com a adoção deste modelo de inspeção das condições de segurança estrutural, a modificação do código brasileiro tem provocado a crítica de vários autores, particularmente quanto ao procedimento de cálculo e verificação da estabilidade de peças sujeitas à compressão paralela às fibras. Gehri (2000) ao estabelecer um comparativo entre o EUROCODE 5/93 e a NBR 7190/97, assegura que diferentes métodos, ao serem comparados, devem verificar não só os resultados do dimensionamento como também a eficiência do seu processo. Stolper & Ribeiro (1998), seguindo a mesma linha, também manifestam que a natureza complexa das expressões propostas pela NBR 7190/97 merece a adição de elementos que tornem o cálculo mais ágil e motivador.

2.2.4.1 Constatações e propostas de autores nacionais

Baraldi & Logsdon (1998), Cordovil (1998), Gehri (2000) e Santos (2000) constataram que há um problema de descontinuidade abrupta no diagrama que representa a variação da resistência de cálculo segundo os diferentes índices de esbeltez – ilustrado na Figura 2.5 para peças de seção transversal retangular simples, com dimensões de seção transversal em centímetros, e madeira dicotiledônea classe C60. Essa descontinuidade ocorre especificamente quando as peças passam de curtas para medianamente esbeltas ($\lambda = 40$) e na passagem da categoria de medianamente esbeltas para peças esbeltas ($\lambda = 80$). A seguir se discute a gênese desse problema e as propostas publicadas por esses autores para a sua correção.

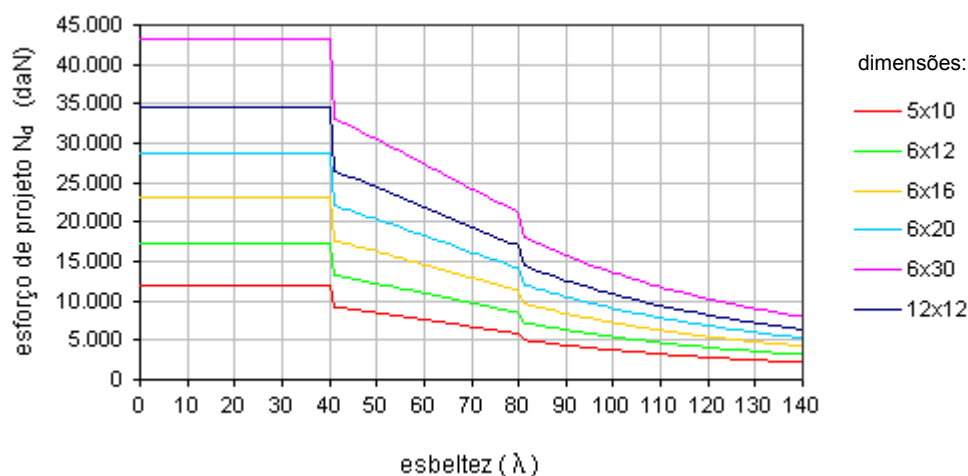


Figura 2.5 – Curvas de resistência à compressão segundo os critérios da NBR 7190/97.

Baraldi & Logsdon (1998) avaliaram pilares e barras de treliça observando, inicialmente, que a solução da expressão de verificação da instabilidade das peças – Equação [2.24] – fornece duas soluções matemáticas. Objetivando a determinação do esforço axial máximo, obviamente deve-se adotar a solução de menor valor, já que a outra conduz a $N_d > F_E$. Como os processos de automatização dos cálculos têm se tornado cada vez mais frequentes, a sugestão dos autores é a inclusão de rotinas de verificação do tipo $N_d < F_E$, ao longo do processo de cálculo.

O Anexo F da norma brasileira considera que o comportamento da madeira é aquele representado na Figura 2.6, em detrimento daquele aceito tradicionalmente, também representado na mesma figura. No entanto, esses autores preferem utilizar o modelo tradicional, por ser mais adequado à segurança das estruturas.

Como mostrado por Zagottis (1980), a carga crítica de flambagem (F_E) é determinada a partir das considerações de flambagem elástica, o que ocorre somente em peças esbeltas. Baraldi & Logsdon (1998) afirmam que a utilização desse valor na obtenção da excentricidade de cálculo para peças medianamente esbeltas – parcela final da Equação [2.25] – não é adequada, pois para esse tipo de peças a flambagem é inelástica. Todavia, essa parcela é apenas um operador matemático, também válido para as peças medianamente esbeltas. Além disto, o modelo adotado pela NBR 7190/97 é o de comportamento elástico do material, inclusive na compressão.

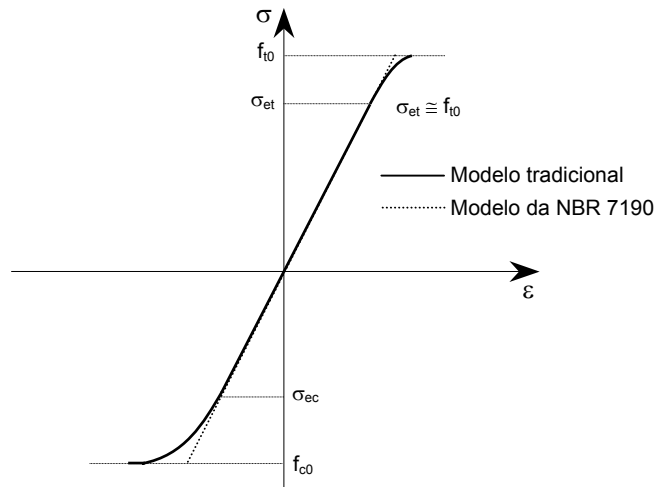


Figura 2.6 – Diagramas $\sigma \times \varepsilon$ para a madeira.

Aproveitando as idéias da NB11/51, Baraldi & Logsdon (1998) propõem para a consideração da não linearidade do material a interpolação linear entre os limites ($\lambda = 40$ e $\lambda = \lambda_0$), obtendo-se:

$$f_E = f_{c0,d} - \left(\frac{\lambda - 40}{\lambda_0 - 40} \right) \cdot \left(f_{c0,d} - \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef}}{\lambda_0^2} \right) \quad [2.37]$$

e

$$F_E = A \cdot f_E \quad [2.38]$$

sendo:

f_E = tensão crítica;

λ_0 = índice de esbeltez acima do qual é aplicável a expressão de Euler (a NBR 7190/97 adota $\lambda_0 = 80$).

Inspirando-se no EUROCODE 5/93, esses autores propõem que a verificação da instabilidade das peças flexocomprimidas seja feita a partir da condição abaixo, em substituição à Equação [2.24]:

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_E} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c0,d}} \leq 1,0 \quad [2.39]$$

na qual:

▪ Peças curtas:
$$f_E = f_{c0,d} \quad [2.40]$$

▪ Peças medianamente esbeltas:
$$f_E = f_{c0,d} - \left(\frac{\lambda - 40}{\lambda_0 - 40} \right) \cdot \left(f_{c0,d} - \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef}}{\lambda_0^2} \right) \quad [2.41]$$

▪ Peças esbeltas:
$$f_E = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef}}{\lambda^2} \quad [2.42]$$

Para evitar os problemas de descontinuidade anteriormente relatados, Baraldi & Logsdon (1998) propõem que as excentricidades sejam introduzidas gradualmente conforme o índice de esbeltez. A Expressão [2.43] introduz gradualmente a excentricidade accidental em peças medianamente esbeltas e a Expressão [2.44] a excentricidade devido à fluência em peças esbeltas.

$$e_a = \left(\frac{\lambda - 40}{\lambda_0 - 40} \right)^n \cdot \frac{L_0}{300} \geq \left(\frac{\lambda - 40}{\lambda_0 - 40} \right) \cdot \frac{h}{30} \quad [2.43]$$

$$e_c = \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{140 - \lambda_0} \right)^n \cdot (e_{lg} + e_a) \cdot \left\{ e^{\left\{ \frac{\phi [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]}{F_E - [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]} \right\}} - 1 \right\} \quad [2.44]$$

A utilização de $0 < n < 1$ permite a introdução das excentricidades de forma mais acentuada. No entanto, esses autores estudaram apenas o caso em que $n = 1$.

Pesquisando os problemas de flexo-compressão em estruturas de madeira, Cordovil (1995) faz uma proposta de reformulação dos critérios da norma brasileira baseada nas tensões admissíveis, fundamentando-se nos procedimentos recomendados pela edição do EUROCODE 5 de 1987. Todavia, essas prescrições sofreram substanciais modificações na última edição do EUROCODE 5 e, assim, não estão sendo discutidas neste trabalho.

Cordovil (1998) afirma que, tratando-se de flexo-compressão reta, a verificação da expressão [2.24] será sempre mais rigorosa, dispensando-se o uso da função quadrática – Equações [2.22] e [2.23].

Relativamente à excentricidade accidental mínima, Cordovil (1998) diz não haver motivo para a exclusão desse tipo de excentricidade nas peças curtas, uma vez que as imperfeições geométricas podem ocorrer em qualquer tipo de peça. Quanto à estabilidade da peça, esse autor lembra muito bem que a esbeltez não pode ser condicionada apenas ao raio de giração mínimo. Em muitas situações de projeto é possível ter um travejamento que impeça a flambagem em torno do eixo de menor inércia.

Quanto à consideração da fluência nas peças esbeltas, Cordovil (1998) comenta que os fatores ψ_1 e ψ_2 , relativos aos estados limites de utilização, usados na verificação da segurança nos estados limites últimos, podem sugerir coeficientes que representem os efeitos reversíveis e irreversíveis da fluência sob ações variáveis. Esse autor sugere a substituição do termo “classes de carregamento”, na Tabela 2.3, por “tipos de carregamento”. Deste modo, a expressão [2.29] pode ser modificada, adotando-se coeficientes de fluência ϕ_1 e ϕ_2 :

$$e_c = (e_{ig} + e_a) \cdot \left\{ e^{\left\{ \frac{\phi_1 N_{gk} + \phi_2 (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}}{F_E - [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]} \right\}} - 1 \right\} \quad [2.45]$$

sendo:

ϕ_1 = coeficiente de fluência para carregamentos permanente ou de longa duração;

ϕ_2 = coeficiente de fluência para carregamentos de média ou de curta duração.

Para evitar a descontinuidade entre as peças curtas e medianamente esbeltas, esse autor propõe que as peças curtas, com carregamento suposto centrado na condição de projeto, sejam verificadas com os mesmos critérios das peças medianamente esbeltas.

Loriggio (1998), estudando o estado limite último de instabilidade de estruturas de madeira, observa que os critérios propostos pela NBR 7190/97 para o cálculo de peças curtas admitem um comportamento elástico-plástico perfeito na compressão paralela às fibras. Sua crítica ao

modelo consiste em que as verificações simplificadas apresentadas parecem mais baseadas em um modelo elástico, com a inclusão de efeitos de segunda ordem, do que propriamente um modelo de instabilidade. Anteriormente, Loriggio (1995) propôs um critério para verificação das peças flexocomprimidas, chamado *critério do dano acumulado*, que pode ser representado pela expressão:

$$D = \frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{M,d}} \leq 1 \quad [2.46]$$

sendo $f_{M,d}$ a resistência de cálculo à flexão e os demais parâmetros já são conhecidos.

Nesse critério, comenta o autor, D pode ser entendido como o dano acumulado na seção. Quando $D = 0$ não há nenhum dano acumulado. Quando $D = 1$ o dano é máximo, ou seja, foi utilizada a capacidade máxima da peça. O valor de D é composto por duas parcelas: a primeira correspondendo à capacidade portante da peça consumida pelo esforço normal, e a segunda referindo-se à capacidade consumida pela flexão. Utilizando-se a resistência $f_{M,d}$ podem ser incorporados nos resultados pequenas não linearidades físicas, aproximando-se do comportamento real da peça. Loriggio (1998) comenta que uma das vantagens desse critério é que ele pode ser usado tanto para peças pouco esbeltas, em que praticamente não há efeito de segunda ordem, quanto para peças esbeltas.

Santos et al. (2002) propõem um método para corrigir as discontinuidades geradas nas curvas de resistência segundo as recomendações da NBR 7190/97, ilustrado na Figura 2.7.

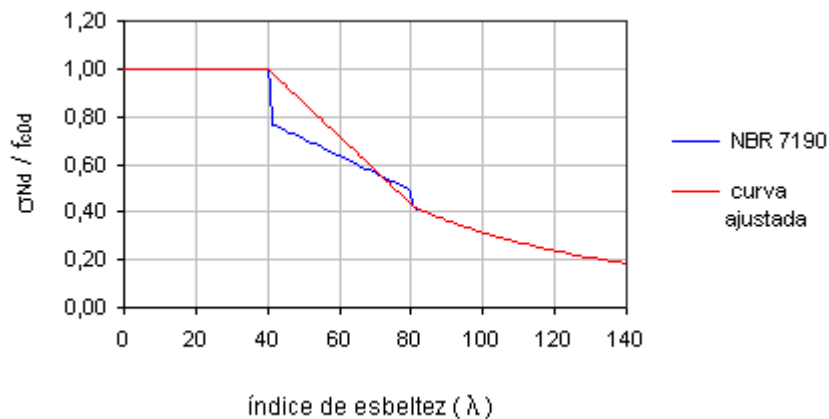


Figura 2.7 – Ajuste da curva de resistência à compressão.
Fonte: Santos et al. (2002)

Nesse trabalho, as tensões de cálculo são parametrizadas, dividindo-as pela resistência à compressão paralela às fibras. Em seguida, o ponto final do trecho horizontal e o início da curva válida para as peças esbeltas são ajustados por meio de uma reta. Nas simulações numéricas efetuadas pelos autores, os resultados alcançados mostram um ganho de resistência para as peças com esbeltez imediatamente superior a 40, como era previsível.