

4.8 Grandes excentricidades e efeitos da fluência

Na expectativa de serem atingidas situações de provável ocorrência na prática das estruturas, adotou-se, para as excentricidades iniciais, os dois valores analisados nas seções anteriores, ou seja, $e_i = 0,1 \cdot b$ e $e_i = 0,5 \cdot b$. Naturalmente que esses valores atendem ao contido no item 7.5.4 da NBR 7190/97, relativamente às exigências de excentricidades iniciais mínimas. Considerando-se apenas as limitações geométricas, impostas pelas dimensões das seções transversais das peças simples de madeira serrada, esses valores cobrem um grande número dos casos previstos no projeto estrutural. No entanto, a excentricidade inicial pode se tornar maior diante de, pelo menos, duas circunstâncias:

- o esforço de compressão ser aplicado a uma distância ainda maior do eixo baricentral, o que pode ser conseguido através de braçadeiras ou cantoneiras de apoio;
- o momento fletor de 1ª ordem resultar da combinação do esforço axial de compressão excêntrico com solicitações laterais, por exemplo resultante da ação do vento ou de empuxos.

Baseando-se nessas hipóteses, admitiu-se para a excentricidade inicial um valor muito elevado, equivalente a $e_i = 10 \cdot b$, com o objetivo de se pesquisar o comportamento dos diferentes critérios normativos, diante de um novo contexto em que preponderam os efeitos da flexão. O desempenho de cada recomendação normativa está representado na Figura 4.25, em função do índice de esbeltez da peça. Foram utilizados os parâmetros das dicotiledôneas de classe C60 na elaboração desta avaliação.

Dos resultados obtidos foi possível concluir que o critério proposto pela NBR 7190/97, quando as peças flexocomprimidas estão sujeitas a grandes excentricidades iniciais, é demasiadamente conservador se comparado às demais normas estudadas. O esforço de cálculo, N_d , determinado segundo as recomendações da DIN 1052/88 supera em 43% aquele decorrente da aplicação da norma brasileira, quando $\lambda = 90$. Nos demais casos, os picos ocorrem quando $\lambda = 41$ e atingem os seguintes percentuais: a AS 1720.1/97 e o EUROCODE 5/93 excedem em 30%; a CSA 086.1/89 supera em 62%; a NDS/91 ultrapassa em 32% e a AF&PA/ASCE 16-95/96 extrapola em 57% os valores devidos à norma brasileira.

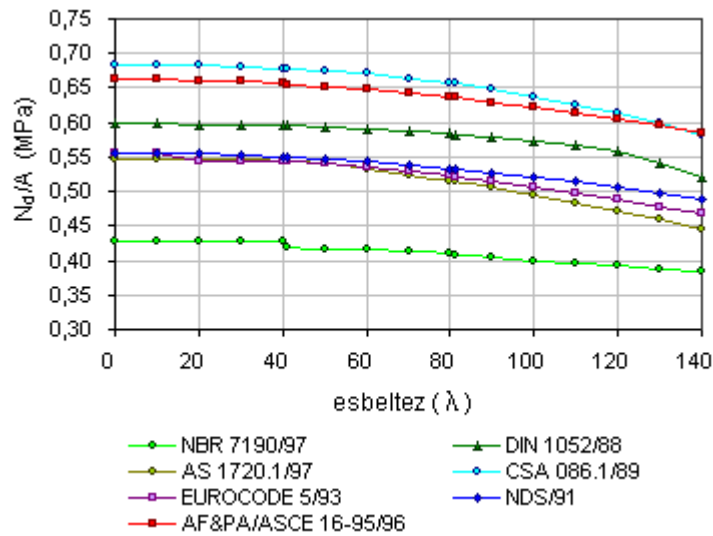


Figura 4.25 – Comportamento das peças flexocomprimidas sujeitas à excentricidade inicial igual a 10.b.

Relativamente aos efeitos da fluência, Alvim & Veloso (2002) demonstraram que a deformação devida a esse comportamento do material pode ser determinada a partir da flecha de segunda ordem amplificada por um fator exponencial, conforme a Equação [2.36]. Então, a flecha suplementar decorrente do efeito isolado da fluência pode ser calculada por:

$$e_c = e_1 \cdot \left[e^{\left(\frac{\phi \cdot N_{k,real}}{F_E - N_{k,real}} \right)} - 1 \right] \quad [4.20]$$

em que $N_{k,real}$ denota o carregamento característico real, válido para as condições de utilização, sendo representado por:

$$N_{k,real} = N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2)N_{qk} \quad \text{com} \quad \psi_1 + \psi_2 \leq 1 \quad [4.21]$$

Admitindo-se a excentricidade de primeira ordem, e_1 , com valor unitário e um coeficiente adimensional, α , definido por:

$$\alpha = \frac{N_{k,real}}{F_E} \quad [4.22]$$

é possível escrever, então, a excentricidade devida à fluência sob a forma:

$$e_c = e \left(\frac{\phi \cdot \alpha}{1 - \alpha} \right) - 1 \quad [4.23]$$

A Figura 4.26 ilustra o comportamento de e_c segundo os diferentes valores dos coeficientes de fluência, ϕ , recomendados pela NBR 7190/97 para as classes de umidade 1 e 2. Observando-se essas curvas é possível constatar, para barras curvas comprimidas excentricamente, porém sob baixos níveis de carregamento, a validade da aplicação da teoria linear de fluência, hipótese admitida na dedução da Equação [4.20].

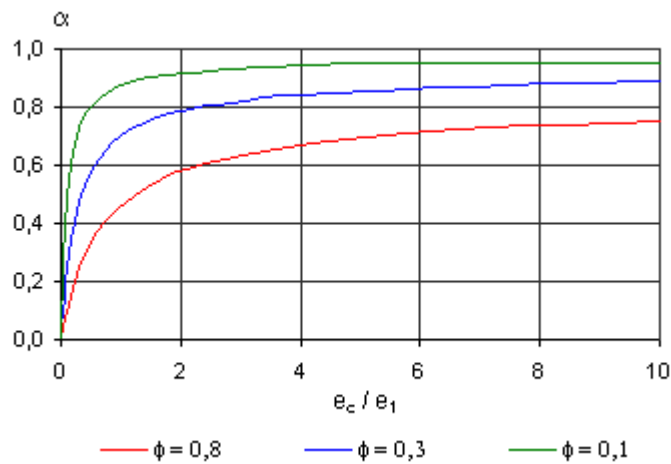


Figura 4.26 – Evolução das flechas devidas à fluência com o carregamento de uma barra curva comprimida excentricamente.

Com o propósito de se inspecionar a importância da fluência no módulo do momento fletor de 2ª ordem, M_d , e, conseqüentemente, na verificação da estabilidade das peças esbeltas, adotou-se uma barra de seção transversal retangular cujos lados estão na razão 1:2, biarticulada e sujeita a um esforço de compressão com excentricidades iniciais equivalentes a $e_i = 0,1 \cdot b$ e $e_i = 0,5 \cdot b$; a madeira considerada foi a dicotiledônea de classe C60.

As Figuras 4.27 a 4.32 mostram os resultados obtidos com a consideração de três diferentes situações de composição de carregamento, adiante discriminadas. Procurou-se envolver, nestas simulações, condições prováveis de carregamentos nos projetos estruturais.

Na primeira simulação, denominada *caso 1*, as ações acidentais foram consideradas nulas. A segunda simulação – chamada *caso 2* – envolve ações permanentes e acidentais típicas de uma estrutura treliçada sujeita à ação do vento. Nessa condição, os fatores de minoração foram admitidos iguais a $\psi_1 = 0,2$ e $\psi_2 = 0$, conforme recomendações da NBR 7190/97; a relação entre as ações acidentais e permanentes considerada foi: $N_{qk} = 2 \cdot N_{gk}$. A simulação, chamada *caso 3*, representa peças que suportam uma estrutura de piso onde não há predominância de pesos de equipamentos fixos, nem de elevadas concentrações de pessoas. Nesse caso, os fatores de minoração indicados pela norma brasileira são $\psi_1 = 0,3$ e $\psi_2 = 0,2$; a relação entre as ações acidentais e permanentes adotada para esse caso foi: $N_{qk} = 4 \cdot N_{gk}$. Em todos os casos, adotou-se um coeficiente de fluência $\phi = 0,8$, que corresponde a classes de carregamento permanente ou de longa duração e classes de umidade 1 ou 2, de acordo com a NBR 7190/97.

Para analisar a relevância do efeito da fluência na verificação das peças esbeltas, recorreu-se à Equação [2.24]. A segunda parcela dessa expressão é composta por tensões de flexão resultantes da incidência das excentricidades inicial, acidental e relativa à fluência, devidamente amplificadas, conforme Equação [2.30]. Nas Figuras 4.27 a 4.32 estão representadas, inicialmente, as parcelas da tensão de flexão, expressas em porcentagens. Ao lado se ilustram as contribuições de cada uma das três excentricidades na tensão total (efeito do normal e do momento fletor). A barra em azul claro (tensões de flexão) corresponde à soma das parcelas devidas às diferentes excentricidades. Os resultados foram obtidos com o auxílio de planilha desenvolvida no *Mathcad8 Professional*, em que inicialmente se calcula o valor do esforço de cálculo, N_d , e, a partir dele, são determinadas as parcelas de momento devidas à cada uma das respectivas excentricidades.

A Figura 4.27 indica que a participação da excentricidade inicial nas tensões totais varia de 29 a 21%, quando a excentricidade inicial é $e_i = 0,1 \cdot b$, decrescendo com o aumento do índice de esbeltez. Por outro lado, a contribuição da excentricidade relativa à fluência, que varia no intervalo de 17 a 34% e a parcela correspondente à excentricidade acidental, que se situa no intervalo de 23 a 29%, aumentam na medida que o índice de esbeltez da barra também se torna elevado.

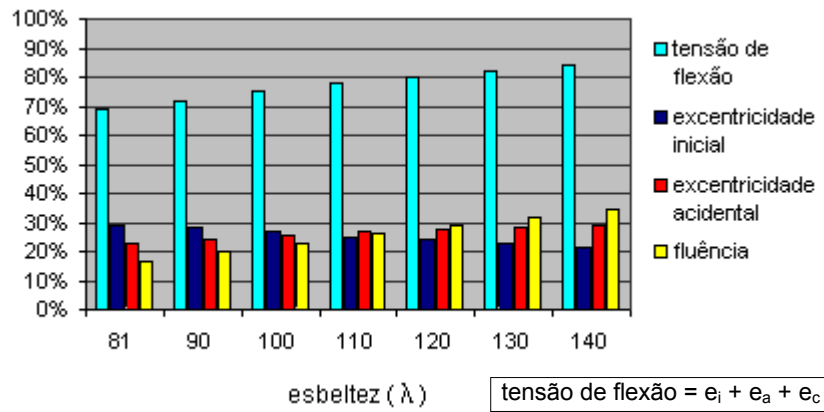


Figura 4.27 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_i = 0,1b$ – caso 1.

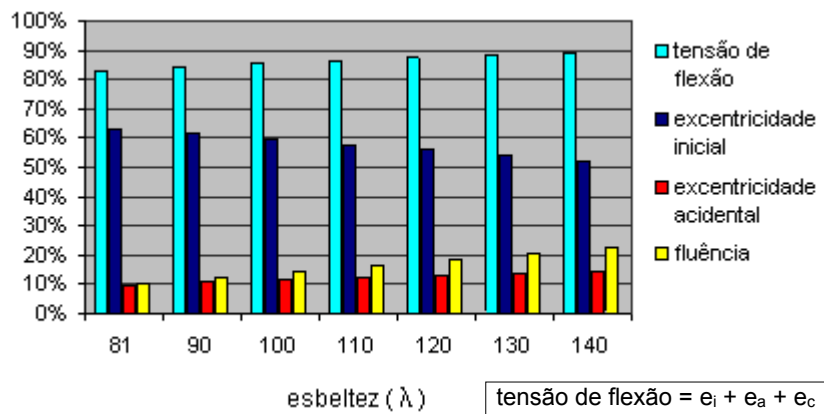


Figura 4.28 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_i = 0,5b$ – caso 1.

Tratando-se ainda do caso 1, mas com uma excentricidade inicial equivalente a $e_i = 0,5 \cdot b$, a Figura 4.28 indica um novo perfil para a contribuição das excentricidades nas tensões totais. Nota-se a participação da excentricidade inicial novamente decrescendo, à medida que aumenta o índice de esbelteza, variando de 63 até 52%. A parcela de excentricidade devida à fluência tem uma contribuição que vai desde 10 até 23%; e aquela correspondente à excentricidade acidental oscila entre 10 e 14%. Observa-se que, mesmo com elevada excentricidade inicial, a fração devida à fluência permanece representativa, especialmente nas peças com elevadas esbeltezes.

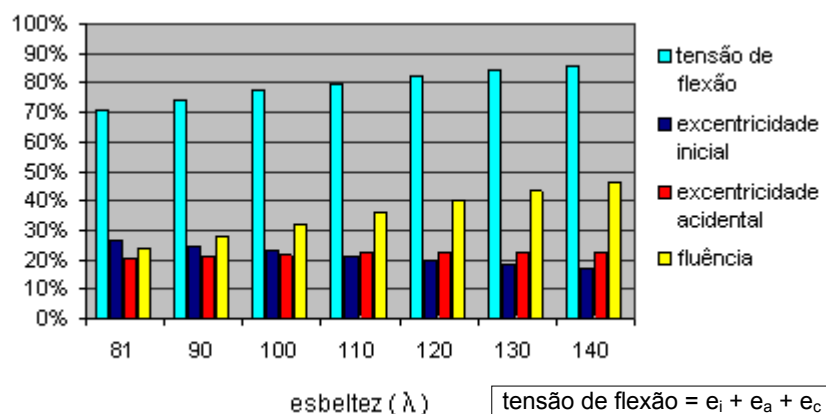


Figura 4.29 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_i = 0,1b$ – caso 2.

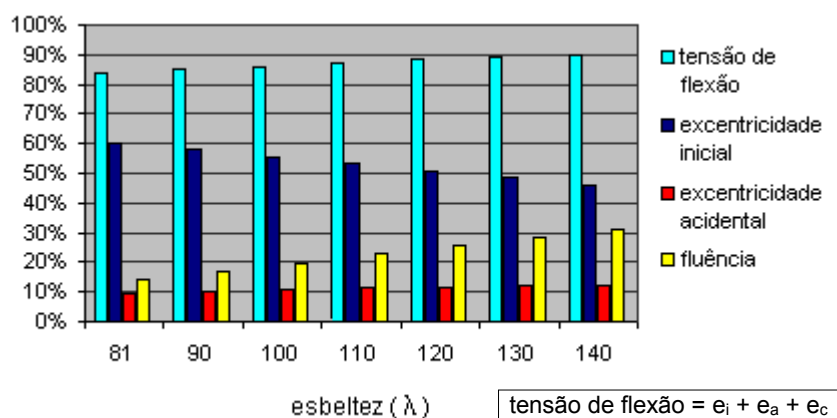


Figura 4.30 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_i = 0,5b$ – caso 2.

No caso 2, quando $e_i = 0,1 \cdot b$, a parcela relativa à excentricidade inicial varia de 26 a 17%; aquela devida à fluência situa-se no intervalo de 24 a 46% e aquela decorrente dos efeitos da excentricidade acidental varia muito pouco, oscilando entre 21 e 23%, como indica a Figura 4.29. Quando $e_i = 0,5 \cdot b$, a parcela relativa à excentricidade inicial decresce desde 60 até 46%; a contribuição dos efeitos da fluência e da excentricidade acidental variam de 14 a 31% e de 9 a 12%, respectivamente, ilustradas na Figura 4.30. Constata-se, em ambas simulações, que a participação da fluência e da excentricidade acidental aumenta com a elevação do índice de esbelteza, ocorrendo de forma oposta com a parcela devida à excentricidade inicial.

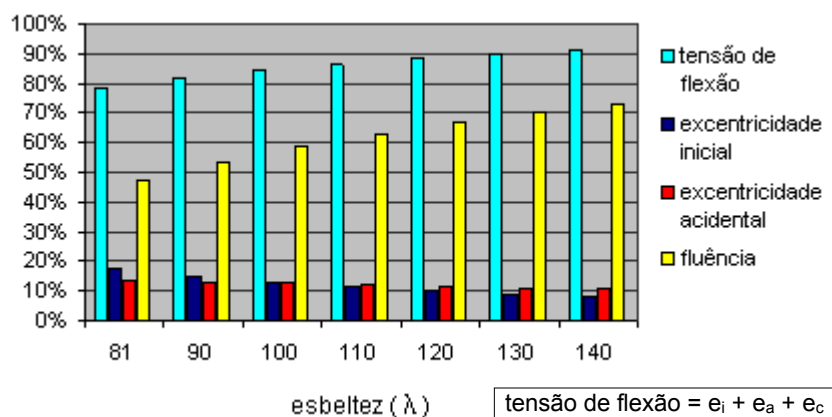


Figura 4.31 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_i = 0,1b$ – caso 3.

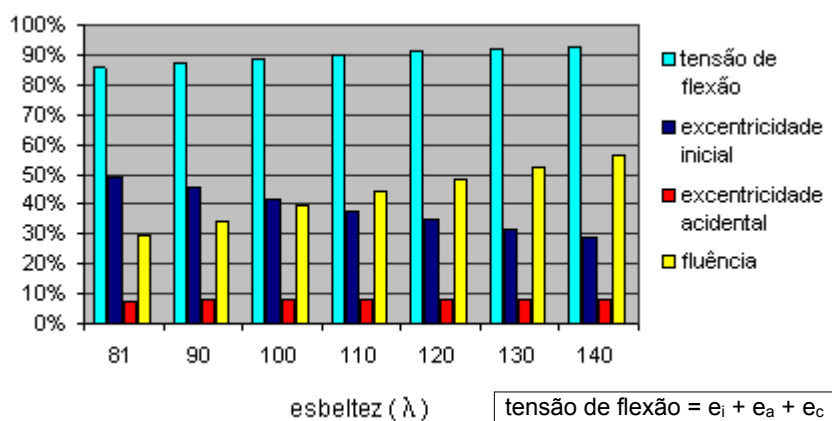


Figura 4.32 – Contribuição das excentricidades na tensão máxima atuante em peças esbeltas com $e_i = 0,5b$ – caso 3.

A Figura 4.31 representa o caso 3, quando $e_i = 0,1 \cdot b$. Nessa simulação, a parcela relativa à excentricidade inicial decresce de 17 a 8%, com o correspondente acréscimo do índice de esbeltez. Por outro lado, a participação da fluência e da excentricidade acidental na tensão total varia de 48 a 73% e de 13 a 11%, respectivamente. Quando a excentricidade inicial é $e_i = 0,5 \cdot b$, a participação da excentricidade inicial varia de 49 a 29%, decrescendo na medida que aumenta a esbeltez da peça; a parcela da tensão total que corresponde ao efeito da fluência varia de 29 a 56%; e, com uma contribuição em torno de 8%, a participação da excentricidade acidental se mantém praticamente constante em todo o intervalo de validade das peças esbeltas, conforme ilustra a Figura 4.32.

Conclui-se, pois, que o efeito da fluência tem uma representação expressiva. A não consideração desse efeito, nos projetos das peças comprimidas ou flexocomprimidas, conduz a distorções acentuadas nos resultados do modelo de cálculo proposto pela norma brasileira.