

2.3.5 Norma norte-americana NDS/91

Nos Estados Unidos da América convivem, simultaneamente, duas normas relativas ao projeto das estruturas de madeira. Uma delas, denominada *National design specification for wood construction* – NDS, publicada pela *American National Standard*, em 1991, é baseada no método determinista das tensões admissíveis. A versão preliminar da NDS foi publicada em 1944. Na edição de 1991, muitas seções foram reescritas para garantir maior clareza textual e incorporar as conquistas sobre o conhecimento do material e o desenvolvimento do projeto das estruturas de madeira.

A edição contemporânea da NDS foi publicada em 1997. Embora seja o texto mais recente, faz-se referência neste trabalho ao documento de 1991. Contudo, Breyer et al. (1999) afirmam não haver extensas modificações nessa edição e sendo sua publicação nela baseada, permite-nos discutir e observar as alterações que trazem interferências no processo de dimensionamento das peças comprimidas e flexocomprimidas. Ainda segundo esses mesmos autores, há uma expectativa de que a norma LRFD venha a substituir a NDS, mas, atualmente, essa última é a preferida entre os profissionais projetistas, sendo a especificação básica nos Estados Unidos da América para o projeto de estruturas de madeira.

2.3.5.1 Fatores de ajuste

Os valores tabulados pela NDS/91 ($\sigma_{c0,tab}$, E , por exemplo) devem ser multiplicados por todos os fatores de ajuste aplicáveis para cada tipo de solicitação, obtendo-se, assim, os correspondentes *valores admissíveis de projeto* (σ'_{c0} , E').

a) Fator de duração de carregamento, C_D

A NDS/91 considera como *duração normal de carregamento* uma carga que tenciona completamente uma peça, até seu valor admissível de projeto, por uma duração acumulada de aproximadamente dez anos. Somente o módulo de elasticidade e a tensão de compressão perpendicular às fibras, $\sigma_{c90,tab}$, não são afetados por esse fator. A base histórica do fator de duração de carregamento é a curva mostrada na Figura 2.16, também conhecida como *Curva de Madison* e que está integrada à prática de projeto norte-americano desde os anos 40.

O termo duração de carregamento se refere ao período total de tempo acumulado, em que o carregamento total de projeto é aplicado ao longo da vida da estrutura. O fator de duração de carregamento – com módulo variando de 0,90 a 2,00 – que deve ser aplicado numa combinação de carregamento é aquele referente à mais curta duração das ações envolvidas.

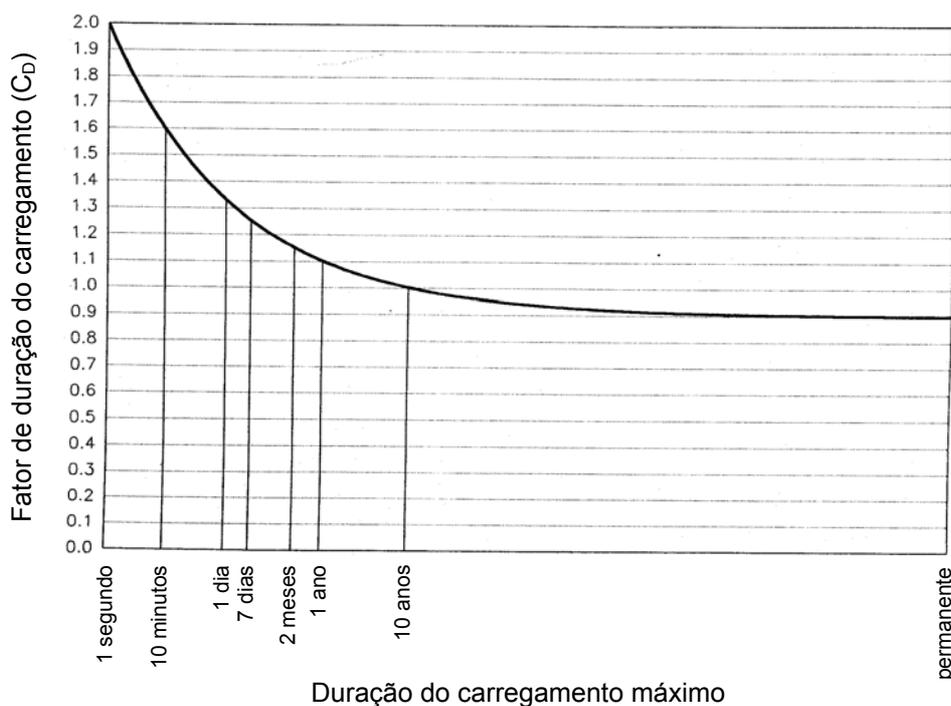


Figura 2.16 – Fator de duração de carregamento para várias durações de carga.
Fonte: NDS/91

b) Fator de umidade de serviço, C_M

Para a obtenção dos valores tabelados de projeto para madeira serrada, a NDS/91 estabelece como padrão que o material será usado em condição seca de serviço, o que acontece na maioria das estruturas cobertas. Se o teor de umidade em serviço excede o padrão estabelecido por um extenso período, os valores tabelados são multiplicados por fatores de umidade de serviço apropriados.

c) Fator de temperatura, C_t

A resistência da madeira é afetada pela temperatura em serviço, tendo seu valor diminuído na medida em que se eleva a temperatura. Os valores de projeto tabulados pela NDS/91 se

aplicam às peças expostas a faixas normais de temperatura e, ocasionalmente, aquecidas durante o uso a temperaturas de até 65,5 °C (150 °F). Quando as peças estruturais experimentam exposição contínua a temperaturas acima desse patamar, os valores de projeto tabelados devem ser multiplicados por fatores de temperatura, C_t .

d) Fator de incisão, C_i

Este fator de ajuste foi introduzido pela edição da NDS de 1997. Conforme Breyer et al. (1999) muitas espécies, notadamente as *softwoods*, aceitam prontamente os tratamentos preservativos, enquanto outras não os aceitam muito bem. Para esse último grupo, incisões normalmente são feitas para a efetivação do tratamento, permitindo o aumento da penetração dos líquidos preservativos. Neste caso, quando esse procedimento é realizado, devem-se ajustar algumas propriedades da madeira segundo a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Fatores de incisão, C_i . Fonte: NDS/97

	C_i
Módulo de elasticidade	0,95
Tensões de flexão, tração e compressão paralela às fibras	0,85
Para todos os outros valores de projeto, como também para madeira tratada sem incisões	1,00

e) Fator de dimensão, C_F

A dimensão de uma peça de madeira tem efeito na sua resistência. Esse comportamento é levado em conta pelo fator de dimensão, C_F , e aplicável às tensões de tração paralela às fibras, compressão paralela às fibras e flexão, para madeiras classificadas visualmente. O fator de dimensão depende da classificação da madeira e, sobretudo, da largura da peça.

f) Demais fatores

O fator de estabilidade de peças comprimidas, C_p , afeta diretamente os valores de projeto à compressão paralela às fibras e é discutido com maiores detalhes na seção 2.3.5.2. Outros

fatores de ajuste são ainda apresentados pela NDS/91; seu detalhamento está sendo omitido pois são aplicáveis em situações que divergem do escopo deste trabalho.

2.3.5.2 Peças comprimidas

A NDS/91 denomina *tensão real* (σ_{c0}) ao resultado da solicitação de cálculo pela área da seção transversal. Essa tensão não deverá exceder ao valor admissível à compressão paralela às fibras, que pode ser expresso pela desigualdade:

$$\sigma_{c0} = \frac{N}{A} \leq \sigma'_{c0} \quad [2.111]$$

em que:

N = carga axial de compressão;

A = área da seção transversal;

σ'_{c0} = tensão admissível de compressão paralela às fibras – valor de projeto.

O cálculo de σ_{c0} deve ser baseado na área líquida da seção transversal – área bruta descontando-se os entalhes ou outras reentrâncias – quando a redução de seção ocorre em uma parte crítica do comprimento da peça, que está mais sujeita à potencial flambagem. Em caso contrário, emprega-se a área bruta da seção. Além disso, conforme a NDS/91, o valor de σ_{c0} calculado a partir da seção transversal líquida, não deverá exceder o valor tabelado de projeto à compressão paralela às fibras multiplicado por todos fatores de ajuste aplicáveis, exceto o fator de estabilidade de peças comprimidas:

$$\sigma_{c0} \leq \sigma_{c0,tab} \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_F \quad [2.112]$$

Para as extremidades das peças de madeira que se apóiam sobre madeira e sobre placas de metal, valem as condições gerais de projeto para apoios, especificados na seção 3.10 e Tabela 2A da NDS/91.

Segundo Breyer et al. (1999), a tensão admissível em uma peça comprimida, σ'_{c0} , deve considerar os fatores de ajustes pertinentes, além do fator de estabilidade, sendo calculada pela expressão:

$$\sigma'_{c0} = \sigma_{c0,tab} \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_F \cdot C_i \cdot C_P \quad [2.113]$$

em que $\sigma_{c0,tab}$ é a tensão tabulada de compressão paralela às fibras.

O projeto das peças comprimidas passa, necessariamente, pela análise de sua natureza geométrica, obtendo-se os parâmetros que indicam a possibilidade de ocorrência da flambagem. Para peças com seção transversal retangular, o índice de esbeltez – chamado *índice de esbeltez modificado* – é apresentado sob a forma:

$$L_e/d \quad [2.114]$$

em que o *comprimento efetivo*, L_e , é determinado pela multiplicação do comprimento real por um coeficiente de comprimento de flambagem apropriado, conforme Equação [2.115], e d é a menor dimensão da seção transversal (ver Figura 2.17). O uso desse índice de esbeltez modificado é possível porque o raio de giração pode ser expresso como uma função direta da largura de um pilar retangular, sendo a constante de conversão do índice de esbeltez modificado simplesmente incorporada nas fórmulas das tensões admissíveis de projeto. Os coeficientes de comprimento de flambagem, K_e , constam na Tabela A.4 (Anexo A).

$$L_e = K_e \cdot L \quad [2.115]$$

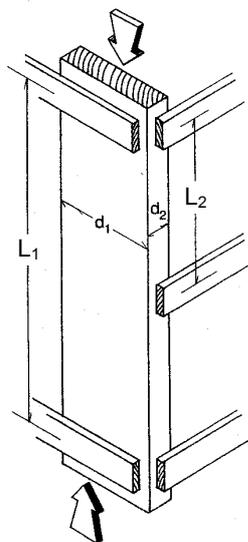


Figura 2.17 – Peça comprimida simples em madeira serrada. Fonte: NDS/91

O índice de esbeltez para peças de madeira serrada, L_e/d , não deve exceder 50. Entretanto, durante a fase de construção, o índice de esbeltez não deve ultrapassar 75.

Na determinação da tensão admissível à compressão paralela às fibras é utilizado o fator de estabilidade das peças comprimidas, C_P , que leva em conta a possibilidade de flambagem. Breyer et al. (1999) comentam que a expressão para σ'_{c0} , em função de C_P define, essencialmente, a *curva para peças comprimidas*, que é contínua ao longo de todo o intervalo de possibilidade dos índices de esbeltez da peça, conforme Figura 2.18. Ainda segundo esses mesmos autores, a expressão para peças comprimidas que aparece na NDS foi originalmente desenvolvida por Ylinen e verificada por estudos no *Forest Products Laboratory*.

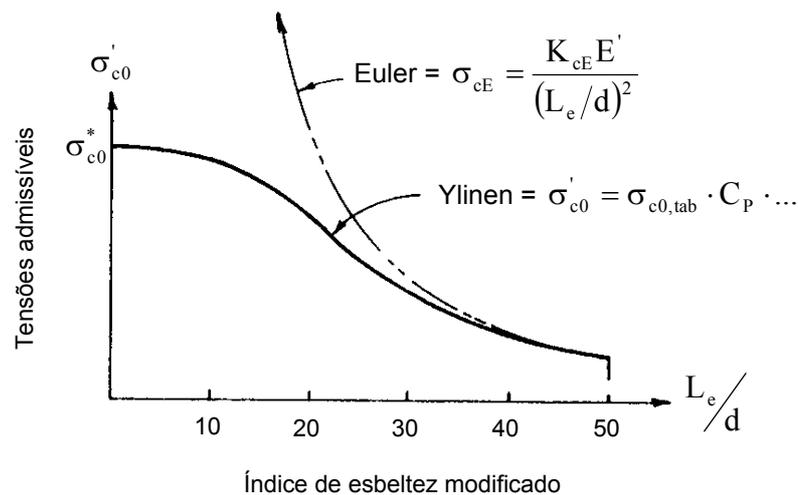


Figura 2.18 – Curva para peças comprimidas Ylinen. Fonte: Breyer et al. (1999)

A tensão crítica de flambagem de Euler define a situação de flambagem pura:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L_e/d)^2} \quad [2.116]$$

A NDS/91 expressa essa tensão de Euler dividida por um coeficiente de segurança, na qual o termo K_{cE} incorpora o π^2 dividido por um fator de segurança, conforme segue:

$$\sigma_{cE} = \frac{K_{cE} E'}{(L_e/d)^2} \quad [2.117]$$

Na expressão anterior, tem-se:

$K_{cE} = 0,3$ para madeira classificada visualmente;

$K_{cE} = 0,384$ para madeira classificada mecanicamente (tipo MEL);

$K_{cE} = 0,418$ para madeira classificada mecanicamente (tipo MSR);

$E' =$ módulo de elasticidade associado com o eixo de flambagem do pilar, calculado pela expressão [2.118]. Para madeira serrada, $E_x = E_y$.

$$E' = E \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_T \cdot C_i \quad [2.118]$$

O parâmetro C_T que aparece na Equação [2.118], chamado *fator de rigidez à flambagem*, usualmente tem valor unitário, sendo calculado por uma expressão específica fornecida pela NDS /91 quando se se trata de peças comprimidas em treliças.

No método das tensões admissíveis, a verificação da resistência da madeira é medida pela tensão tabulada de compressão paralela, multiplicada pelos fatores de ajuste aplicáveis, exceto C_p , representado pelo símbolo σ_{c0}^* e definido, matematicamente, através da equação:

$$\sigma_{c0}^* = \sigma_{c0,tab} \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_F \cdot C_i \quad [2.119]$$

O fator de estabilidade é, então, calculado pela expressão:

$$C_p = \frac{1 + (\sigma_{cE} / \sigma_{c0}^*)}{2c} - \sqrt{\left[\frac{1 + (\sigma_{cE} / \sigma_{c0}^*)}{2c} \right]^2 - \frac{\sigma_{cE} / \sigma_{c0}^*}{c}} \quad [2.120]$$

em que o termo “c” tem valor $c = 0,80$ para peças comprimidas de madeira serrada. Quando uma peça comprimida é suportada ao longo de todo o seu comprimento, prevenindo deslocamentos laterais em todas as direções, então $C_p = 1,0$.

O efeito do fator de duração de carregamento varia em função do modo de ruptura predominante na peça comprimida, isto é, por flambagem ou por esmagamento das fibras. A Figura 2.19 mostra o efeito da duração do carregamento na tensão admissível.

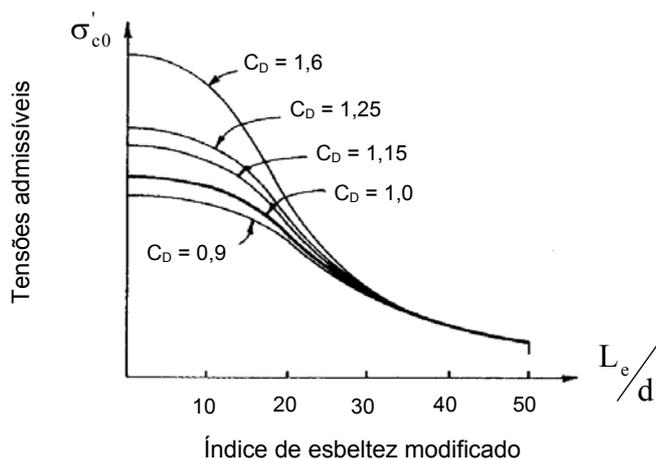


Figura 2.19 – Efeito da duração do carregamento. Fonte: Breyer et al. (1999)

2.3.5.3 Peças flexocomprimidas

Peças estruturais que estão sujeitas à flexão e à compressão, simultaneamente, são também conhecidas como *vigas-colunas*. A equação apresentada pela NDS/91 para o dimensionamento das vigas-colunas foi desenvolvida por Zahn e publicada em 1991, representando um tratamento unificado entre flambagem de peças comprimidas (σ'_{c0}), flambagem lateral de vigas (σ'_{bx}) e interação viga-coluna. Nas peças sujeitas à flexo-compressão, os efeitos de segunda ordem resultantes tornam mais complexo o estado de tensões e as tensões reais de flexão, σ_b , são multiplicadas por um *fator de amplificação* que reflete a magnitude do esforço axial e da deflexão Δ , calculado pela expressão:

$$\left(\frac{1}{1 - \sigma_{c0}' / \sigma_{cEx}'} \right) \quad [2.121]$$

É interessante notar que, na análise de peças flexocomprimidas, a tensão admissível de compressão paralela às fibras, σ'_{c0} , é definida pela fórmula de Ylinen, enquanto o fator de

amplificação – Equação [2.121] – faz uso da fórmula de Euler. A lógica disso, segundo Breyer et al. (1999), é que a deflexão será grande para peças com grande índice de esbeltez. Assim, σ_{cEx} produz o efeito desejado no fator de amplificação.

As peças estruturais sujeitas à combinação entre a compressão axial e o momento fletor, atuando sobre um ou ambos os eixos principais (ver Figura 2.20), são verificadas por:

$$\left[\frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{c0}'} \right]^2 + \frac{\sigma_{b1}}{\sigma_{b1}' \cdot [1 - (\sigma_{c0}/\sigma_{cE1})]} + \frac{\sigma_{b2}}{\sigma_{b2}' \cdot [1 - (\sigma_{c0}/\sigma_{cE2}) - (\sigma_{b1}/\sigma_{bE})^2]} \leq 1,0 \quad [2.122]$$

em que:

$$\sigma_{c0} < \sigma_{cE1} = \frac{K_{cE} \cdot E'}{(L_{e1}/d_1)^2} \quad \text{para flexão uniaxial ou biaxial} \quad [2.123]$$

e

$$\sigma_{c0} < \sigma_{cE2} = \frac{K_{cE} \cdot E'}{(L_{e2}/d_2)^2} \quad \text{para flexão biaxial} \quad [2.124]$$

e

$$\sigma_{b1} < \sigma_{bE} = \frac{K_{bE} \cdot E'}{(R_B)^2} \quad \text{para flexão biaxial} \quad [2.125]$$

sendo:

σ_{b1} = tensão real de flexão, com carregamento aplicado na face estreita da peça;

σ_{b2} = tensão real de flexão, com carregamento aplicado na face larga da peça;

d_1 = dimensão da face larga (ver Figura 2.20);

d_2 = dimensão da face estreita (ver Figura 2.20);

K_{bE} = coeficiente de flambagem de Euler para vigas;

R_B = índice de esbeltez para peças submetidas à flexão.

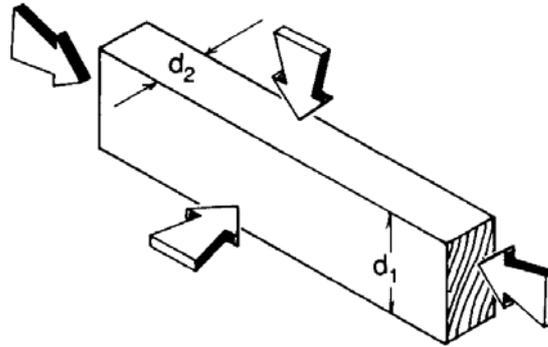


Figura 2.20 – Peça sujeita à flexo-compressão. Fonte: NDS/91

Os comprimentos efetivos, L_{e1} e L_{e2} , são determinados de acordo com o disposto na seção 2.3.5.2. Já os valores de σ'_{c0} , σ_{cE1} e σ_{cE2} são encontrados a partir das Equações [2.113], [2.123] e [2.124], respectivamente. Por fim, os valores de σ'_{b1} , σ'_{b2} e σ_{bE} , que se referem à verificação de flexão, têm seus critérios discutidos na NDS/91. O fator de duração de carregamento, C_D , associado com a ação de duração mais curta em uma dada combinação de ações, é usado para o cálculo de σ'_c , σ'_{b1} e σ'_{b2} .

Breyer et al. (1999) apresentam a fórmula de interação geral [2.126] em sua forma reduzida, válida para o caso comum de peças sujeitas à compressão axial associada com a flexão sobre apenas um eixo:

$$\left[\frac{\sigma_{c0}}{\sigma'_{c0}} \right]^2 + \left(\frac{1}{1 - \sigma_{c0}/\sigma_{cE1}} \right) \cdot \frac{\sigma_{b1}}{\sigma'_{b1}} \leq 1,0 \quad [2.126]$$

2.3.5.4 Peças com carregamento lateral e excentricidade

O conceito de uma equação geral de interação pode conduzir a um passo mais adiante, como comentam Breyer et al. (1999). Os problemas mais avançados envolvem a aplicação da equação expandida de Zahn, que permite a aplicação excêntrica de uma força axial de compressão. Assim, num caso bem geral, os momentos fletores sobre os eixos x e y podem ser resultado de ações transversais de flexão e a força axial pode ser excêntrica aplicada. Dessa forma, o carregamento geral pode assim ser resumido:

- Força de compressão na peça ⇒ N
- Momento fletor sobre o eixo x:
 - Momento devido às ações transversais ⇒ M_x
 - Momento devido à excentricidade sobre o eixo x ⇒ $N \cdot e_x$
- Momento fletor sobre o eixo y:
 - Momento devido às ações transversais ⇒ M_y
 - Momento devido à excentricidade sobre o eixo y ⇒ $N \cdot e_y$

Breyer et al. (1999) observam que é necessária uma diferenciação entre os momentos causados pelas ações transversais e aqueles devidos à excentricidade da carga, pois, as tensões de flexão que se desenvolvem como resultado da excentricidade da carga estão sujeitas à aplicação de um fator de amplificação adicional.

A equação seguinte, apresentada pela NDS/91, é válida para peça com extremidades rotuladas e com seção transversal quadrada ou retangular, conforme Figura 2.21, submetida à ação simultânea da compressão axial (aplicada na extremidade da peça) e do momento (devido à excentricidade ou carregamentos laterais):

$$\left(\frac{\sigma_{c0}}{\sigma'_{c0}}\right)^2 + \frac{\sigma_{bx} + \sigma_{c0}(6e_x/d)[1 + 0,234(\sigma_{c0}/\sigma_{cEx})]}{\sigma'_{bx}[1 - (\sigma_{c0}/\sigma_{cEx})]} +$$

$$\frac{\sigma_{by} + \sigma_{c0}(6e_y/b) \left\{ 1 + 0,234(\sigma_{c0}/\sigma_{cEy}) + 0,234 \left[\frac{\sigma_{bx} + \sigma_{c0}(6e_x/d)}{\sigma_{bE}} \right]^2 \right\}}{\sigma'_{by} \left\{ 1 - (\sigma_{c0}/\sigma_{cEy}) - \left[\frac{\sigma_{bx} + \sigma_{c0}(6e_x/d)}{\sigma_{bE}} \right]^2 \right\}} \leq 1,0 \quad [2.127]$$

Na expressão acima, tem-se:

e_x = excentricidade, medida paralela à face larga a partir da linha de centro da peça até a linha de centro do carregamento axial, conforme Figura 2.21;

e_y = excentricidade, medida paralela à face estreita a partir da linha de centro da peça até a linha de centro do carregamento axial.

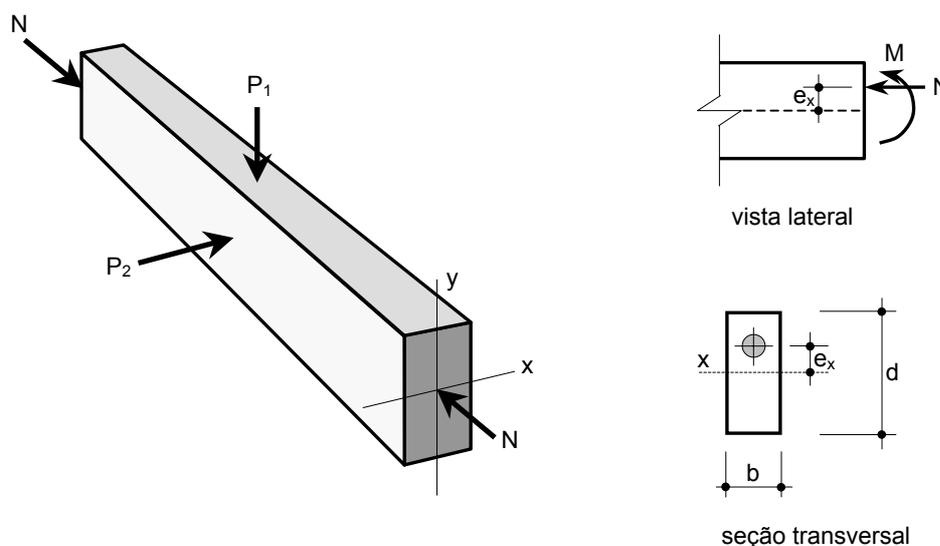


Figura 2.21 – Peça flexocomprimida – indicação das excentricidades.

Muitos pilares situados no interior das edificações ou até mesmo no seu perímetro podem ser considerados como peças axialmente comprimidas. No entanto, na prática, sempre se pergunta se o esforço de compressão é verdadeiramente axial, pois os desalinhamentos e apoios não uniformes em conexões são capazes de provocar as excentricidades. Breyer et al. (1999) afirmam que, provavelmente, algum momento se desenvolve em peças que são imaginadas suportando apenas forças axiais. A magnitude desses momentos, todavia, é desconhecida. Muitos projetistas de estruturas norte-americanos simplesmente ignoram o possível momento devido à excentricidade e projetam somente para forças axiais, justificando essa prática em função de que as extremidades dos pilares de madeira são fixadas por sistemas que diferem das condições ideais de rótula nas extremidades.

No entanto, Gurfinkel¹ apud Breyer et al. (1999) sugere que as peças sejam projetadas para uma excentricidade mínima correspondente à maior das duas condições:

- uma polegada, ou
- um décimo da dimensão da peça ($0,1 \cdot d$) na direção analisada.

¹ GURFINKEL, G. (1981). *Wood engineering*. 2.ed. Kendall/Hunt Publishing, Kenner, LA.