

2.3 Dimensionamento segundo as normas de outros países

A seguir estão apresentados os critérios de dimensionamento, referente ao assunto em questão, de normas de países com larga tradição no uso de madeira. Visando facilitar a leitura e compreensão deste texto, muitos parâmetros tiveram a sua nomenclatura alterada.

2.3.1 Norma alemã

A norma alemã que trata do projeto das estruturas de madeira – DIN 1052/88 – tem como fundamentação o método determinístico das tensões admissíveis. Está subdividida em três partes, tratando do projeto e construção de estruturas e elementos estruturais, do projeto de suas conexões e do projeto de painéis estruturais.

2.3.1.1 Parâmetros de dimensionamento

a) Parâmetros de resistência e elasticidade

As ações que atuam na estrutura em dimensionamento devem ser avaliadas segundo as normas alemãs pertinentes. A probabilidade de ocorrência simultânea dos diversos tipos de ações é tratada diferentemente, para os propósitos de análise da estabilidade, entre os seguintes casos de carregamento:

- a. **caso H**: ocorrência do total das ações principais;
- b. **caso HZ**: ocorrência do total das ações principais e secundárias.

O texto normativo apresenta tabelas com os valores das tensões admissíveis para madeira serrada em exposição classificada como seca, submetida ao carregamento do caso H. Seus respectivos módulos podem ser aumentados em 25% para casos de carregamento do tipo HZ e em 100% para ações de impacto.

No entanto, uma compensação é considerada quando a exposição é do tipo úmida. Nessa condição, as tensões admissíveis fornecidas devem ser reduzidas:

- em um sexto para peças expostas ao tempo em todos os lados ou na qual um teor de umidade de equilíbrio maior que 18% é esperado, mas não para andaimes, e

- em um terço para peças e andaimes que estão em permanente contato com a água, e para andaimes construídos a partir de madeira que, no momento do carregamento, ainda não atingiu a semi-secagem.

A DIN 1052/88 também fornece os valores dos módulos de elasticidade – longitudinal e transversal –, alertando que seus respectivos módulos devem sofrer as seguintes alterações:

- para elementos de madeira serrada expostos aos intemperismos em todos os seus lados ou que estão sujeitos a uma saturação de curto tempo, deve-se reduzir seus valores correspondentes em um sexto;
- para elementos expostos à saturação permanente é requerida uma redução de um quarto em seus correspondentes valores.

b) Parâmetros geométricos

A DIN 1052/88 define os seguintes comprimentos efetivos (L_e) para as peças:

- rotuladas nas duas extremidades (fixas): $L_e = L$
- em sistemas estruturais planos, compostos pela associação de pilares com treliças horizontais, conforme indicado na Figura 2.8, o comprimento efetivo é calculado por um método simplificado, usando-se a seguinte expressão:

$$L_e = 2h_u \cdot \left(1 + 0,35 \frac{h_0}{h_u} \right) \quad [2.47]$$

- em pórticos planos simétricos, bi ou triarticulados, como mostrados na Figura 2.9, o comprimento efetivo do pilar é determinado pela expressão:

$$L_e = 2h \cdot \sqrt{1 + 0,4 \cdot c} \quad [2.48]$$

Sendo:

$$c = \frac{I \cdot 2s}{I_0 \cdot h} \quad [2.49]$$

O comprimento efetivo da peça inclinada é calculado por meio da expressão:

$$L_e = 2h \cdot \sqrt{1 + 0,4c} \cdot \sqrt{k_R} \quad [2.50]$$

Sendo:

$$k_R = \frac{I_0 \cdot N}{I \cdot N_0} \quad [2.51]$$

Na expressão acima, N é a força média atuando no eixo do pilar e N₀ é a força média agindo no eixo do elemento horizontal.

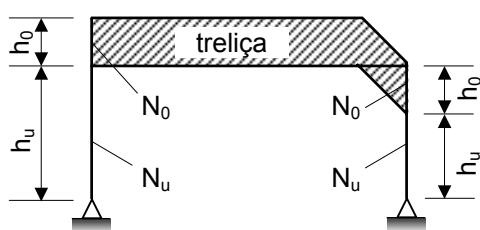


Figura 2.8 – Pórtico bi-rotulado com treliça horizontal. Fonte: DIN 1052/88

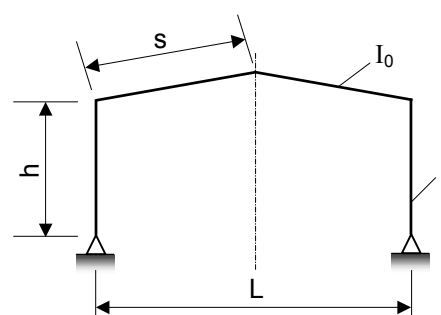


Figura 2.9 – Pórtico. Fonte: DIN 1052/88

Admite-se uma esbeltez de até 150 para peças simples de madeira serrada e de até 200 para peças comprimidas que fazem parte de sistemas de contraventamentos.

2.3.1.2 Peças comprimidas

A segurança contra a flambagem de peças de madeira serrada, axialmente comprimidas, se faz mediante a verificação da seguinte condição:

$$\frac{(N/A)}{\bar{\sigma}_k} \leq 1 \quad [2.52]$$

com:

$$\bar{\sigma}_k = \frac{\bar{\sigma}_{D,0}}{\omega} \quad [2.53]$$

em que:

- N = máxima força de compressão atuando na peça;
- A = área total da seção transversal;
- $\bar{\sigma}_{D,0}$ = tensão admissível à compressão paralela às fibras, levando-se em consideração os acréscimos ou reduções previstas em 2.3.1.1;
- ω = coeficiente de flambagem, conforme Tabela A.1 (Anexo A); os valores intermediários podem ser obtidos por interpolação linear.

Diferenciando-se da maioria das normas, a DIN 1052/88 fornece em formato de tabela os coeficientes de flambagem, ω , que resultam do quociente entre a tensão admissível à compressão na direção paralela às fibras e a tensão admissível de flambagem da peça, conforme Demarzo (1990). A verificação da estabilidade das peças comprimidas é feita conforme a Equação [2.55].

2.3.1.3 Peças flexocomprimidas

Peças flexocomprimidas ou sujeitas à compressão excêntrica, segundo a DIN 1052/88, podem ser definidas como:

- peças submetidas à compressão situada a uma certa distância dos seus respectivos centróides;
- peças projetadas com curvatura;
- peças que não estão somente sujeitas à compressão axial, mas são também solicitadas perpendicularmente aos seus eixos longitudinais.

a) Verificação da resistência

As peças flexocomprimidas devem, inicialmente, passar pela verificação padrão envolvendo a ocorrência simultânea da flexão com a compressão, representada pela Equação [2.54], em que o efeito da deformação é negligenciado.

$$\frac{(N/A_n)}{\bar{\sigma}_{D,0}} + \frac{(M/W_n)}{\bar{\sigma}_B} \leq 1 \quad [2.54]$$

Na expressão anterior, tem-se:

A_n = área líquida da seção transversal da peça;

W_n = módulo de resistência efetivo;

$\bar{\sigma}_{D,0}$ = tensão admissível à compressão paralela às fibras;

$\bar{\sigma}_B$ = tensão admissível à flexão, levando-se em consideração os acréscimos ou reduções previstas na seção 2.3.1.1.

Precauções adicionais relativas às possíveis reduções na seção transversal devem observar ao que se prescreve no parágrafo 6.4 da DIN 1052/88.

b) Verificação da estabilidade

Procede-se a análise de estabilidade de uma peça flexocomprimida com a verificação da condição seguinte, exceto se, declaradamente, uma análise mais rigorosa for requerida:

$$\frac{(N/A)}{\bar{\sigma}_k} + \frac{(M/W)}{k_B \cdot 1,1 \cdot \bar{\sigma}_B} \leq 1 \quad [2.55]$$

em que $\bar{\sigma}_k$ é obtida a partir da Equação [2.53]; o máximo valor de ω deve ser adotado independentemente da direção da excentricidade e k_B é determinado a partir de:

$$k_B = \begin{cases} 1,00 & \text{se } \lambda_B \leq 0,75 & [2.56] \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_B & \text{se } 0,75 \leq \lambda_B \leq 1,40 & [2.57] \\ 1,00/\lambda_B^2 & \text{se } \lambda_B > 1,40 & [2.58] \end{cases}$$

sendo λ_B o índice de esbeltez calculado, para seções retangulares, a partir da expressão:

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{s \cdot h \cdot \gamma_1 \cdot \bar{\sigma}_B}{\pi \cdot b^2 \cdot \sqrt{E \cdot G_T}}} \quad [2.59]$$

em que:

s = espaçamento entre pontos de fixação;

h = altura da seção transversal;

γ_1 = fator de majoração para os casos de carregamento H e HZ ($\gamma_1 = 2,0$);

b = largura da seção transversal;

E = módulo de elasticidade na direção paralela às fibras;

G_T = módulo de torção, que pode ser tomado igual a $G_T = 2/3 \cdot G$ para madeira serrada.

c) Verificação pela teoria de segunda ordem

A DIN 1052/88 permite que seja feita uma verificação da segurança estrutural pela teoria de segunda ordem em sistemas estruturais – como os mostrados na Figura 2.11 – que não são enrijecidos em seu plano por contraventamentos, painéis ou elementos equivalentes, sob cargas de serviço. Essa opção é uma alternativa à investigação contra a flambagem, conforme descrito no item (b) anterior, sendo suficiente o exame de qualquer uma delas.

A análise estrutural pela teoria de segunda ordem, para os casos de carregamento H e HZ, será baseada em carregamentos multiplicados por um fator γ_1 (igual a 2,00) ou γ_2 (igual a 3,00). Admite-se que a adequação estrutural é atingida, conforme o texto normativo, se as seguintes condições são encontradas:

- as tensões admissíveis apresentadas pela norma, quando multiplicadas por um fator γ_1 , não são excedidas em nenhum lugar na estrutura, sob cargas multiplicadas pelo mesmo fator γ_1 ;
- sob cargas multiplicadas por um fator de γ_2 , as deformações relevantes – em particular o máximo deslocamento e escorregamento horizontal – não são maiores que 4,5 vezes as deformações associadas sob γ_1 vezes essas mesmas cargas;
- o menor raio de giração de uma peça sólida, linear, no plano do sistema estrutural, seja pelo menos $1/150$ do seu comprimento.

A probabilidade de ocorrência de escorregamento nas ligações ou de deformações devidas à fluência pode precisar ser levada em conta. Uma correlação linear entre a rigidez do sistema e o seu comportamento às deformações, nesse caso, pode ser assumida, conforme o texto normativo. A rigidez inicial das ligações, nas quais seja provável a ocorrência do deslizamento, é determinada usando-se oito vezes o módulo de deslizamento dado no parágrafo 13, da parte 2 da DIN 1052/88.

Para atender à exigência anterior, o coeficiente de fluência deve ser determinado com a consideração de uma satisfatória proporção do carregamento imposto sendo assumido como uma carga permanente e calculado de acordo com a seção 4.3 da DIN 1052/88.

Mesmo em situações onde as peças estruturais são projetadas para ser retas e sujeitas à compressão centrada, na prática, um certo grau de imperfeição é inevitável, gerando uma excentricidade do carregamento. A excentricidade acidental de projeto, situada a meia-altura e com o pilar em estado de descarregamento, ver Figura 2.10, é denotada por “e”, sendo calculada como segue:

$$e = \eta \cdot d_n \cdot \frac{L}{i} \quad [2.60]$$

em que:

L = comprimento projetado da peça;

i = raio de giração;

d_n = distância nuclear ($d_n = h/6$ para seção transversal retangular);

η = coeficiente de curvatura inicial, igual a 0,006 para pilares de madeira serrada produzidos de *softwoods* classes I ou II ou de *hardwoods* de classificação média.

Onde as seções transversais são assimétricas, deverá ser tomado o maior valor de d_n .

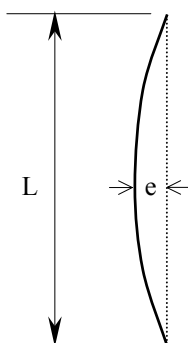


Figura 2.10 – Peça com excentricidade acidental, “e”, na condição descarregada.

Fonte: DIN 1052/88

No caso de estruturas formadas pela associação de barras, uma compensação adicional relativa a uma inclinação acidental dos pilares, na direção menos favorável, deve ser considerada quando o sistema estrutural está em sua condição descarregada. O mesmo se

aplica, por analogia, a pilares que estão sozinhos ou em filas, conforme Figura 2.11. A divergência de projeto, ψ , a partir da posição planejada do pilar, é assumida como sendo:

$$\psi = \pm \frac{1}{100 \cdot \sqrt{h}} \quad [2.61]$$

em que:

h = altura do pilar ou, em caso de pórtico com múltiplos pavimentos, a altura global da estrutura, em metros.

Nas situações em que os pilares são planejados para que sejam submetidos à compressão excêntrica, uma compensação também deve ser feita para a excentricidade de projeto, como dada na Equação [2.60], exceto onde a excentricidade planejada, calculada por M/N , na seção transversal da extremidade ou da metade do comprimento do pilar, seja qual for a mais relevante, não é menor que $(20 \cdot e)$.

Onde os pilares dos pórticos exibem uma excentricidade planejada não menor que $1/s \cdot \sqrt{h}$, com s e h expressos em metros, as suas declividades podem ser desconsideradas. Essa regra se aplica, por analogia, a pilares que estão sozinhos ou em filas.

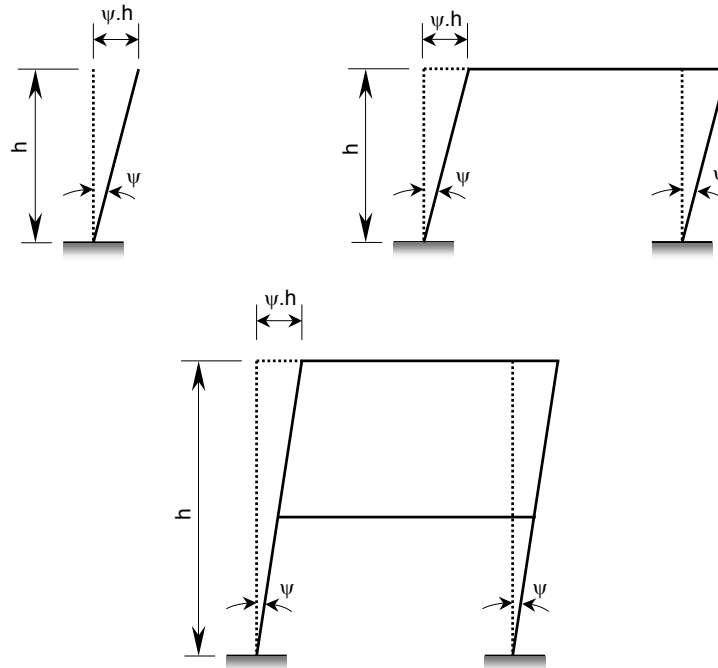


Figura 2.11 – Pórticos, colunas e filas de colunas tendo uma declividade acidental.
 Fonte: DIN 1052 (1988)