

Estudo para barras fletidas de madeira e desenvolvimento de programa computacional

Studies of timber elements on bending moment and development of computational code

Marcus Vinicius Sousa Prates 1
Luttgardes de Oliveira Neto 2

Resumo: A norma técnica ABNT-NBR 7190:1997 - Projeto de estruturas de madeira - traz os procedimentos para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira para flexão e combinadas, porém apresenta-se em versão já ultrapassada, definindo expressões em termos de tensões resistentes apesar de afirmar que os procedimentos para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira estão baseados no Método dos Estados Limites. Propõem-se, a partir de estudos de formulações que constam de normas estrangeiras, um procedimento de cálculo que objetive a obtenção de uma expressão de Momento Fletor Resistente de Cálculo que esteja condizente com o Método de Estados Limites. Estes estudos permitiram a elaboração de um programa computacional que realiza os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de elementos fletidos de madeira, seguindo a norma técnica brasileira ABNT-NBR 7190:1997, auxiliando o usuário na montagem do arquivo de leitura de dados necessários ao processamento dos cálculos de dimensionamento de modo que o usuário tenha uma ferramenta didática e segura. Exemplos numéricos são apresentados atestando o funcionamento final do programa.

Palavras-Chave: Estruturas de madeira, Método dos Estados Limites, barras fletidas.

Abstract: The Brazilian Code ABNT-NBR 7190:1997 – Design of Timber Structures – presents dimensioning procedures of timber structural elements for several types of solicitation efforts. Bending moments are treated by resistant stresses, based on method of the admissible stresses, which method is just in disusing. This work proposes an alternative design procedure of timber structural elements by considering strength efforts of project, in this case, bending strength of project. This proposal permits the automation of steps of the design procedure and a practical and logical use by the structural engineer. Numerical examples are carried out to evaluate the proposed procedure and to show the coherence regards the Method of the Limit States.

Keywords: Wooden structures, Method of the limit states, bending moments.

1: Graduação, Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia – Bauru - Universidade Estadual Paulista (UNESP)
e-mail: marcusvinicius_03@hotmail.com
2: Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Faculdade de Engenharia – Bauru - Universidade Estadual Paulista (UNESP)
e-mail: lutt@feb.unesp.br

1 INTRODUÇÃO

A norma técnica ABNT-NBR 7190:1997 - Projeto de estruturas de madeira - traz os procedimentos para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira para todo tipo de solicitação, axiais, de flexão e combinadas. O capítulo 7 (Dimensionamento - Estados limites últimos) trata destas situações estruturais e serão abordados neste trabalho. A norma brasileira apresenta-se em versão já antiga, define expressões em termos de tensões resistentes e traz procedimentos para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira, baseados no Método dos Estados Limites. Para adequar os procedimentos de cálculo ao método citado e realizar a necessária automatização dos procedimentos de cálculo em programas de fácil acesso e utilização por meio de computador pessoal em práticas profissionais é necessário obter expressões de resistências de cálculo em termos de esforços resistentes de cálculo. Este procedimento, de estabelecer expressões de esforços resistentes de cálculo já consta de outras normas brasileiras mais atualizadas. Apenas com estas expressões será possível uma racionalização dos procedimentos e a subsequente automatização dos cálculos de dimensionamento. O objetivo do trabalho é realizar um estudo sobre procedimentos de cálculo de elementos estruturais de madeira da norma brasileira NBR 7190:1997 e o desenvolvimento de um formulário mais racional e prático para o procedimento de dimensionamento de barras fletidas coerente com o Método dos Estados Limites.

Para verificação dos cálculos compararam-se os resultados obtidos do programa com os critérios de verificação da norma e exemplos numéricos.

2. DIMENSIONAMENTO DE BARRAS FLETIDAS DE MADEIRA

Para resolver o problema de estabilidade lateral propõe-se a seguinte formulação, equação (1), baseada em momentos resistentes de cálculo e nas teorias de Timoshenko [4].

$$M_{Rd} = C_b \cdot E_1 \cdot W \cdot f_{c0d} \quad (1)$$

sendo C_b é o fator de estabilidade lateral calculado pela relação: .

Já o coeficiente C_b é o gradiente de momento fletor, que será considerado igual a 1,13 para vigas bi-apoiadas com carregamento uniformemente distribuído.

$$\frac{\sigma_{crit}}{f_{c0d}}$$

Se a relação f_{c0d} for maior que 1 não há possibilidade do fenômeno de flambagem lateral na peça, e E_1 deve ser considerado igual a 1 para efeito de cálculo. Porém, se E_1 for menor que 1 há possibilidade de flambagem lateral na peça e o valor encontrado deve ser considerado no cálculo, ou seja: $E_1 \leq 1$. Sendo assim tem-se o valor de $M_{Rd, máximo}$ quando E_1 for igual a 1.

$$\frac{\sigma_{crit}}{f_{c0d}}$$

A relação f_{c0d} estabelece um fator de comparação entre tensões e será estudado a seguir.

Sendo que a expressão da tensão resistente crítica a flambagem lateral de uma barra sujeita à flexão simples, com seção retangular $b \times h$ é (equação 2)

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi}{\ell/b} E \frac{b}{h} \sqrt{\frac{G}{E}} \sqrt{1 - 0,63 \frac{b}{h}} \quad (2)$$

e o valor de σ_{crit} não pode ser maior que f_{c0d} . Para satisfazer a segurança de estabilidade da estrutura tem-se que seguir a seguinte relação:

$$M_d \leq M_{Rd} \quad (3)$$

sendo M_d o momento solicitante de cálculo e M_{Rd} o momento resistente de cálculo.

3. COMPARAÇÕES PROPOSTAS

Após o termino do último trabalho, tornou-se importante fazer a comparação da formulação proposta com algumas normas estrangeiras. Para isso foram escolhidas a norma norte-americana – AF&PA/ASCE 16-95/96 e o Eurocode 5/93.

3.1. Norma norte-americana – AF&PA/ASCE 16-95/96:

A norma norte americana trata o problema de estabilidade lateral calculando um momento resistente critico, definido pela seguinte fórmula:

$$M_{rd,x} = C_L W_x f_{bx} \quad (4)$$

em que:

W_x é o modulo de resistência no eixo x;

f_{bx} é o valor de resistência a flexão;

C_L é o fator de estabilidade lateral calculado pela seguinte expressão, com $C_b = 0,3$:

$$C_L = \frac{1 + \alpha_b}{2c_b} - \sqrt{\left(\frac{1 + \alpha_b}{2c_b}\right)^2 - \frac{\alpha_b}{c_b}} \quad (5)$$

em que:

$$\alpha_b = \frac{\phi_s M_e}{\lambda_t \phi_b M_x^*} \quad (6)$$

onde:

M_x é o momento resistente segundo o eixo x;

M_e é o momento de flambagem lateral calculado pela seguinte fórmula:

$$M_e = 2,40 \cdot E_{0,05} \cdot \frac{I_x}{L_e} \quad (7)$$

em que:

$E_{0,05}$ é o módulo de elasticidade;

I_y é o momento de inércia em y;

L_e é o comprimento de flambagem;

3.2. Eurocode 5/93:

O Eurocode analisa o problema de estabilidade lateral calculando um momento resistente crítico, definido pela seguinte fórmula:

$$M_{rd,x} = k_{crit} W_{x,f,m,x,d} \quad (8)$$

onde k_{crit} é um fator que leva em conta a resistência reduzida devida à flambagem lateral.

$$k_{crit} = \begin{cases} 1,0 & \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,40 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{para } 1,40 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

Para a análise da estabilidade do elemento estrutural é definido o índice de esbelteza relativa, calculado pela expressão:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{cod}}{\sigma_{c,crit,x}}} \quad (9)$$

O valor de $\sigma_{c,crit,x}$ é determinado por:

$$\sigma_{c,crit,x} = \frac{\pi^2 E_{0,05}}{\lambda_m^2} \quad (10)$$

4. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA (Java)

Após a elaboração de um formulário mais prático baseado em termos de momentos resistentes de cálculo tornou-se necessário à elaboração de um programa computacional para facilitar o dimensionamento de barras fletidas de madeira, e para tornar esse projeto viável foi escolhida a linguagem Java.

O programa foi baseado em uma interface que facilite a comunicação com o usuário, em que tenha um menu no qual se possa escolher o tipo de madeira que irá ser utilizada para o dimensionamento da peça, como na imagem da Figura 1.



Figura 1: Tela Inicial do programa

Então, ao selecionar a classe da madeira, o programa retorna com dados sobre a resistência da madeira, como a Figura 2.

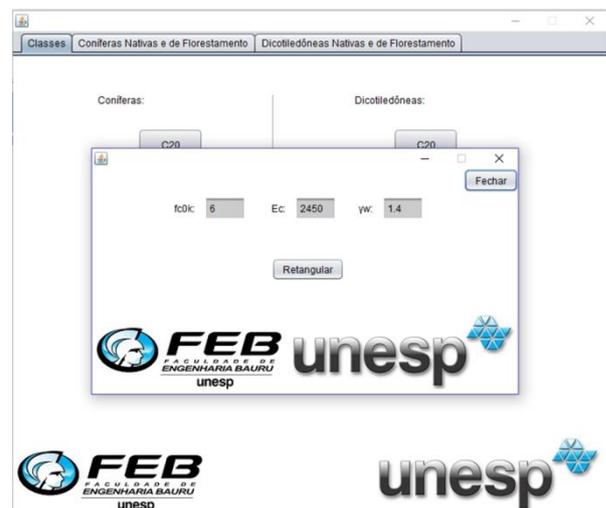


Figura 2: Tela de características das classes da madeira.

Após esses passos o usuário precisa inserir os dados da seção geométrica da madeira, o comprimento da barra e a carga a que ela está sendo solicitada; com isso o programa consegue verificar em termos de momento resistente de cálculo como na formulação proposta se a viga está bem dimensionada ou não. Segue exemplo a na Figura 3.



Figura 3: Tela final do programa com resultados esperados.

Após a execução do programa podemos então fazer a verificação $M_d \leq M_{Rd}$ e observar que a viga utilizada no exemplo está liberada para uso. Pois, atende os requisitos pré-estabelecidos pela formulação proposta em termos de momento resistente de cálculo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para elaborar a comparação entre todas as formulações vamos trabalhar com modelos gráficos e numéricos, supondo um caso de uma viga de madeira utilizada como elemento estrutural.

Sendo assim foi proposta uma viga de madeira simples da classe C60 do tipo Pinus, com carregamento uniformemente distribuído ao longo de seu comprimento. As suas características se apresentam na Tabela 1.

Tabela 1: Características principais de viga de madeira

H (cm)	B (cm)	E (kN/cm ²)	G (kN/cm ²)	W (cm ³)	f _{c0k} (MPa)
30	12	2450	122,5	1800	60

sendo que:

H: Altura da viga

B: Base da viga

E: Módulo de Elasticidade Transversal

G: Módulo de Elasticidade Longitudinal

W: Módulo de Resistência a Flexão

f_{c0k}: Resistência a compressão paralelas às fibras da madeira

Além disso adotamos para o coeficiente de modificação (K_{MOD}) o valor de 0,56 e para o coeficiente de ponderação da resistência a compressão da madeira (γ_w) o valor de 1,4.

Valor de $M_{Rd, máximo}$:

$$M_{Rd, máximo} = 1,13 \cdot 1,0 \cdot 1800 \cdot 2,4 = 4881,60 \text{ kN.cm}$$

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

A primeira comparação será feita com a norma americana, e ao analisarmos a formulação proposta por ela para a estabilidade lateral de vigas já percebemos a semelhança com a nossa

formulação, devido a um coeficiente C_L , que se assemelha com o coeficiente utilizado neste trabalho, E_1 . A análise comparativa entre as duas formulações se encontra na Figura 3.

Ao analisarmos o gráfico percebemos que a norma americana trata o problema de estabilidade lateral de forma diferente do modelo de cálculo proposto.

A norma americana reduz o momento crítico de flambagem de forma linear desde o menor comprimento da barra, sendo que o modelo proposto só reduz o momento crítico a partir do comprimento de 7,0 metros aproximadamente.

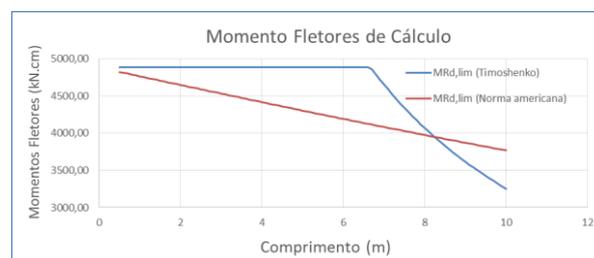


Figura 3 - Formulação Proposta x Norma Americana

Mas vale ressaltar na comparação que a formulação proposta mostra-se um modelo que tem uma fundamentação teórica convincente.

Eurocode 5/93

Agora será feita a comparação com o modelo europeu, onde também percebemos a semelhança com a formulação proposta devido a existência do índice K_{crit} . A análise comparativa entre os dois modelos se encontra na Figura 4.

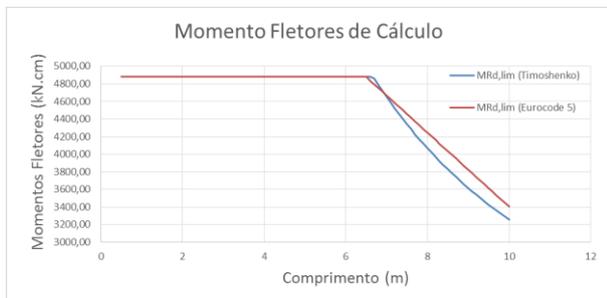


Figura 4 - Formulação Proposta x Eurocode 5.

O modelo europeu mostra uma grande semelhança entre o modelo proposto, onde o momento crítico de flambagem começa a decair a partir dos 7 metros de comprimento da barra de madeira. Vale ressaltar que as diferenças entre os momentos dos dois modelos não ultrapassam 10%.

Se torna importante ressaltar que o modelo proposto quando comparado com o modelo europeu ganha grande relevância pois a semelhança com um modelo já estabelecido é bastante importante.

Para finalizar esta análise, foi sugerida uma carga

de cálculo P_d de 25kN/m uniformemente distribuída ao longo do comprimento de uma viga, de acordo com o esquema da Figura 5 o que acarreta um momento máximo no meio do vão; assim, variando-se o comprimento da viga de 0 a 10 metros e comparando estes valores com os de momentos resistentes de cálculo para flambagem lateral obtidos conforme proposto no trabalho, obtém-se o diagrama da Figura 6.

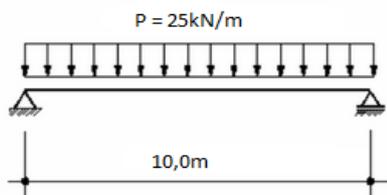


Figura 5 -: Esquema da viga

Pela análise de verificação que consta da norma brasileira, tem-se

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot f_{c0d}} \rightarrow \frac{10,0}{0,12} \leq \frac{0,56.2450}{10,55.(0,56.6,0/1,4)}$$

83,33 > 54,19 - a verificação não se confirma.

Ou seja, a viga com 10 metros, sem contraventamento lateral, não é aceitável do ponto de vista de flambagem lateral com torção.

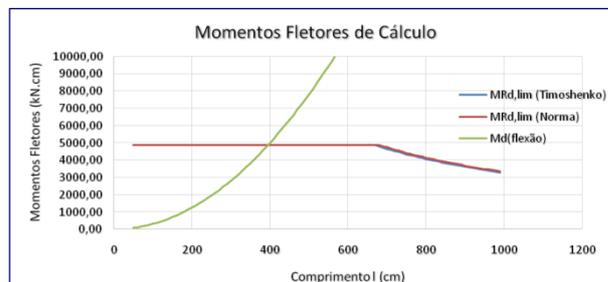


Figura 6 - Momentos fletores solicitantes e resistentes de cálculo.

Pela análise deste gráfico torna-se possível avaliar o comprimento admissível para esta viga. Em um comprimento da viga de aproximadamente 4 metros o momento solicitante se torna maior que o resistente de cálculo, indicando assim a inadequação da viga para este vão ou maior.

Verificando-se a viga para um vão de 4 metros tem-se um momento solicitante (M_{Sd}) igual a:

$$M_{Sd} = \frac{25.4^2}{8} = 5000\text{kN.cm}$$

Pela análise de verificação que consta da norma brasileira, tem-se:

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot f_{c0d}} \rightarrow \frac{4,0}{0,12} \leq \frac{0,56.2450}{10,55.(0,56.6,0/1,4)}$$

33,33 < 54,19 - a verificação se confirma.

Pela expressão 1 proposta, o momento fletor resistente de cálculo resulta em

$$M_{Rd} = 4881,60\text{kN.cm}$$

Sendo assim, como $M_{Sd} \cong M_{Rd}$, a estrutura encontra-se em segurança, com praticamente o mesmo valor numérico (o comprimento de 3,95 metros resultaria na igualdade), conforme observa-se no encontro das curvas no gráfico da Figura 6.

6. CONSIDERAÇÕES

Com a análise do trabalho proposto temos que o dimensionamento de elementos de madeira pode se tornar algo muito mais prático e racional para estudantes e engenheiros, pois ele traz um embasamento teórico e formas de cálculo em termos de momentos resistentes.

Sendo assim, a elaboração do programa computacional complementa esse trabalho de forma a trazer segurança e agilidade nesse procedimento, com uma linguagem simples e de fácil compreensão, trazendo benefícios para a comunidade acadêmica.

Após as comparações feitas com normas estrangeiras, podemos notar que a formulação proposta para a verificação de vigas de madeiras solicitadas por flexão tem bastante semelhança de dados obtidos com essas verificações já consolidadas no meio acadêmico, o que nos garante um grau de confiança para a sua utilização. Sendo que foi encontrada uma formulação eficiente e que propõe a simplificação do dimensionamento de barras fletidas de madeira.

Durante a execução e teste do programa, utilizando exemplos numéricos já prontos como referência, o programa se comportou como esperado, não acusando problemas de manipulação de dados e de processos de cálculo, fornecendo os valores esperados tanto da verificação final quanto dos cálculos intermediários inerentes à madeira, como propriedades geométricas da seção transversal e coeficientes requeridos pela norma NBR 7190:1997. O programa foi criado de modo que consiga futuramente receber mais informações como outras solicitações como de tração e de flexão, o que o tornará mais completo didaticamente.

O código-fonte e o programa podem ser adquiridos com os autores Marcus Vinicius (marcusvinicius_03@hotmail.com) ou Luttgardes de Oliveira Neto (lutt@feb.unesp.br).

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a UNESP e ao CNPq pelo auxílio na realização deste trabalho (Bolsa IC - PIBIC/CNPq - 2015/2016)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – 7190:1997. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997
ABNT – NBR8681:1984. Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro, 1984

Bodig, J., Jayne, B. A. Mechanics of wood and wood composites. New York. Van Nostrand Reinhold Company. 1982.

Calil Junior, C.; Lahr, Francisco. F. A. R.; Dias, A. A.. Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. Barueri :Manole, 2003. 160 p.

Deitel, H. M.; Deitel, P. J. Java Como Programar. 8ª edição. Pearson Prentice Hall, 2010.

Karlsen, G. G. Wooden structures. Moscou, Mir Publishers, 1976.

Pfeil, W; Pfeil M. Estruturas de Madeira. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.

Szücs C. A.; Terezo R. F.; Valle A.; Moraes P. D. Estruturas de Madeira, 2006.

<http://www.guj.com.br>, acesso em 2014.

javafree.uol.com.br, acesso em 2014.

1