

Dimensionamento de elementos estruturais de madeira solicitados à compressão: procedimentos e automatização

Design of wooden structural elements by axial compression: procedures and automation

Natan Kameya ¹

Luttgardes de Oliveira Neto ²

Resumo: A Norma Técnica Brasileira ABNT-NBR 7190: 1997 - Projeto de Estruturas de Madeira - apresenta procedimentos de dimensionamento de elementos estruturais de madeira para vários tipos de esforços de solicitação. Os esforços axiais são tratados por tensões resistentes, com base no método das tensões admissíveis. Este trabalho propõe uma ferramenta alternativa para o procedimento de projeto de elementos estruturais de madeira considerando as formulações apresentadas pela referida norma. Esta proposta permite a automatização de etapas do procedimento de projeto e um uso prático e lógico pelo engenheiro estrutural. Exemplos numéricos são apresentados para avaliar o procedimento proposto.

Palavras-Chave: Estruturas de madeira, Programação computacional, linguagem Java, dimensionamento de elementos estruturais.

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. Axial efforts are treated by resistant stresses, based on method of the admissible stresses. This work proposes an alternative tool for design procedure of timber structural elements considering the formulations presented by Brazilian Code. 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.

Keywords: Wooden structures, Computational programming, Java language, design of structural elements.

1: Engenheiro Civil

Faculdade de Engenharia – Bauru - Universidade Estadual Paulista (UNESP)

e-mail: kameya7@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 Engenharia de Estruturas é a área responsável pela análise do comportamento e dimensionamento dos componentes estruturais de edificações e de obras diversas na Engenharia Civil. O engenheiro responsável pelos cálculos estruturais deve, portanto, conhecer programas computacionais que modelem estruturas, calculem os esforços em seus elementos componentes e, finalmente, façam o dimensionamento destes elementos estruturais, segundo as normas técnicas vigentes. Poucos programas comerciais se propõem a realizar todas estas etapas. Na impossibilidade de acesso fácil a esses programas, um programa computacional que realize os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira, seguindo a norma técnica brasileira, é uma ferramenta de grande utilidade didática e profissional.

Procurando por uma linguagem de programação ideal para o projeto, optou-se pelo Java devido ao seu fácil acesso e disseminação na internet. Ela possui características como a orientação a objetos e portabilidade que facilitam a execução deste trabalho. O programa NetBeans possui a ferramenta swing, facilitando algumas etapas da programação.

O trabalho apresenta um capítulo referente à linguagem computacional escolhida, outro contendo os dados e formulário referentes à normativa de dimensionamento de barras comprimidas, finalizando com a apresentação de telas do programa computacional.

Para verificação dos cálculos compararam-se os resultados obtidos do programa com os critérios de verificação da NBR 7190:1997 e exemplos numéricos.

2 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO JAVA

Discorre-se um pouco sobre a linguagem de programação e software de programação utilizado.

2.1 Java

Desde seu lançamento, em maio de 1995, a plataforma Java foi adotada mais rapidamente do que qualquer outra linguagem de programação na história da computação. Em 2004, ela atingiu a marca de três milhões de desenvolvedores em todo mundo, continuou crescendo e atualmente é uma referência no mercado de desenvolvimento de software, tornou-se popular pelo seu uso na internet e hoje possui seu ambiente de execução presente em navegadores, mainframes, sistemas

operacionais, celulares, palmtops, cartões inteligentes etc.

A linguagem de programação Java foi projetada tendo em vista objetivos como orientação a objetos, portabilidade, recursos de rede, segurança, além de possuir vantagens como sintaxe similar a C/C++, simplicidade na especificação, tanto na linguagem quanto no ambiente de execução, distribuída com vasto conjunto de bibliotecas, facilidade para criação de programas distribuídos e multitarefa, desalocação de memória automática por processo de coletor de lixo e carga dinâmica de código.

2.2 NetBeans

O NetBeans IDE é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) gratuito e de código aberto para desenvolvedores de software nas linguagens Java, C, C++, PHP, Groovy, Ruby, entre outras. Ele auxilia programadores a escrever, compilar, 'debugar' e instalar aplicações, e foi arquitetado em forma de uma estrutura reutilizável que visa simplificar o desenvolvimento e aumentar a produtividade, pois reúne em uma única aplicação todas estas funcionalidades. Totalmente escrita em Java, mas que pode suportar qualquer outra linguagem de programação. Também suporta linguagens de marcação como XML e HTML, direcionada à portabilidade, o que torna possível fazer um programa para os atuais aparelhos móveis (iphone, smartphone e tablet), com suporte ao Java e para as plataformas mais utilizadas atualmente, tais como Windows, Mac OS e Linux.

O aplicativo NetBeans IDE, escolhido para o desenvolvimento do projeto, é um produto sofisticado que possui funções parecidas com o 'drag and drop' do Delphi, conhecido como 'swing' em Java, facilitando a elaboração de programas, proporcionando a utilização em um ambiente de desenvolvimento visual, a linguagem compilada orientada a objetos e uma tecnologia para a composição de banco de dados escaláveis.

3 DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS DE MADEIRA

Apresentam-se neste capítulo os dados e procedimentos que constam na norma NBR 7190:1997 para a verificação e dimensionamento de barras de madeira.

3.1 Compressão paralela às fibras

Na questão do comprimento de flambagem, o índice de esbeltez, de acordo com a NBR 7190:1997, é definido por l/r , onde l é o

comprimento efetivo de flambagem da barra e r o raio de giração mínimo de sua seção transversal.

Tendo em mãos o índice de esbeltez, determina-se em qual dos 3 casos a peça está localizada:

- $0 < \lambda \leq 40$: Peças curtas;
- $40 < \lambda \leq 80$: Peças medianamente esbeltas;
- $80 < \lambda \leq 140$: Peças esbeltas;

Para as peças comprimidas curtas ($0 < \lambda \leq 40$) não há a necessidade de redução de resistência devido ao fenômeno de flambagem. Sua resistência é igual à resistência da seção transversal A , verificada como uma compressão simples.

Para peças medianamente esbeltas ($40 < \lambda \leq 80$), a resistência é afetada pela presença do fenômeno de flambagem, não podendo ocorrer a verificação como compressão simples, sendo exigida a verificação de flexo-compressão. Sua ruptura não mais ocorre por esmagamento da madeira mas por flexão decorrente à perda de estabilidade global.

A segurança deve ser estabelecida em relação ao estado limite último de instabilidade, verificando-se no ponto mais comprimido da seção transversal a inequação:

$$\frac{\sigma_{Nd}}{\sigma_{fcod}} + \frac{\sigma_{Md}}{\sigma_{fcod}} \leq 1 \quad (1)$$

onde σ_{Nd} : tensão normal devido a esforço axial de compressão centrada; σ_{Md} tensão normal devido a esforço de momento fletor; e σ_{fcod} : tensão resistente de cálculo, compressão paralela às fibras.

Para o cálculo da tensão σ_{Md} , utiliza-se:

$$M_d = N_d \times e_1 \times \frac{F_E}{F_E - N_d} \quad (2)$$

com

$$F_E = \frac{\pi^2 \times E_{c0,ef} \times I}{L_{fl}^2} \quad (3)$$

onde I : momento de inércia da seção transversal no plano de flambagem; $E_{c0,ef}$ dado pela equação: $E_{c0,ef} = k_{mod} \times E_{c0,m}$; e $E_{c0,m}$: valor médio do módulo de elasticidade obtido de ensaios de compressão paralela às fibras; L_{fl} : comprimento de flambagem da barra no plano de análise.

Se a barra não estiver sob ação de um momento fletor inicial, as barras devem ser verificadas considerando apenas a existência de imperfeições geométricas das peças (incluindo excentricidades construtivas de carga), considerado através de uma excentricidade accidental:

$$e_1 = e_a \quad (4)$$

onde

$$e_a = \frac{L_{fl}}{300} \leq \frac{h}{30}$$

No caso da barra estar sob ação de um momento M_{id} , a excentricidade do projeto deve ser expressa como:

$$e_1 = e_a + e_i \quad (5)$$

onde

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_d}$$

O dimensionamento de peças esbeltas ($80 < \lambda \leq 140$) é feito de forma semelhante às peças medianamente esbeltas, mas com a inclusão do efeito de fluência da madeira nos deslocamentos laterais da coluna, acrescentando uma parcela à parcela do momento de projeto. A excentricidade complementar de fluência é dada pela expressão:

$$e_c = (e_{ig} + e_a) \times \left[\exp\left(\frac{\varphi \times N_g^*}{F_E - N_g^*}\right) \right] \quad (6)$$

onde

φ : coeficiente de fluência; $e_{ig} = M_{igd}/N_d$: excentricidade inicial oriunda do momento devido à carga permanente g ; $e_a = l_{fl}/300 > h/20$; h = altura da seção transversal em relação ao plano de verificação;

$$N_g^* = N_g + (\psi_1 + \psi_2) \times N_q \quad (7)$$

onde

N_q e N_g : valores característicos dos esforços normais oriundos, respectivamente, de carga permanente g e variável q , e ψ_1 e ψ_2 dados no item 5.4.6 da norma NBR7190 com $\psi_1 + \psi_2 \leq 1$.

Segundo a norma o coeficiente de fluência φ tem valores definidos abaixo:

Tabela 1: Coeficiente de fluência φ

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

Fonte: NBR 7190:1997

4 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

Utilizando o programa NetBeans e a praticidade da função swing nele presente, desenvolveu-se o projeto.

Caso haja o interesse sobre como foi feito, ou o passo a passo do desenvolvimento do programa computacional, basta entrar em contato com um dos autores relacionados.

5 EXEMPLOS NUMÉRICOS

Uma coluna de seção simples retangular cujas dimensões são de 12x16 centímetros. Verificar a segurança da coluna no estado limite último para o comprimento de flambagem de 200 centímetros e para as seguintes situações de projeto: combinação normal de ações com esforços axiais de compressão $N_g=42$ kN (permanente) e $N_g=45$ kN (variável de utilização), classe de umidade 2 (Pfeil, 2003).

5.1 Cálculo segundo a NBR 7190/97

Propriedades Geométricas:

$$\text{Área: } A = 12 \times 16 = 192 \text{ cm}^2$$

Raio de giração mínimo:

$$r_x = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{16}{\sqrt{12}} = 4,62 \text{ cm}$$

$$r_y = \frac{b}{\sqrt{12}} = \frac{12}{\sqrt{12}} = 3,46 \text{ cm}$$

Portanto, $r_{\min} = r_y = 3,46$ cm.

Inércia em relação ao eixo de menor giração:

$$I_y = \frac{h \times b^3}{12} = \frac{16 \times 12^3}{12} = 2304 \text{ cm}^4$$

Índice de esbeltez:

$$\lambda = \frac{L_{fl}}{r} = \frac{200}{3,46} = 57,8$$

Portanto, peça medianamente esbelta ($40 < \lambda \leq 80$)

$$W_y = \frac{h \times b^2}{6} = \frac{16 \times 12^2}{6} = 384 \text{ cm}^4$$

Propriedades Mecânicas:

Para classe de carregamento de longa duração, classe de umidade 2 e considerando a dicotiledônea *Eucalyptus citriodora*, tem-se:

$$k_{\text{mod}} = 0,7 \times 1,00 \times 0,8 = 0,56;$$

$$f_{c0,d} = k_{\text{mod}} \times \frac{f_{c0,k}}{\gamma_{wc}} = 0,56 \times \frac{0,7 \times 62,0}{1,4} = 17,4 \text{ MPa};$$

$$E_{c0,ef} = k_{\text{mod}} \times E_{c0,m} = 0,56 \times 18421 = 10316 \text{ MPa}$$

Combinações de ações do estado limite último:

$$N_d = 1,4 \times 42 + 1,4 \times 45 = 121,8 \text{ kN}$$

A excentricidade é dada por:

$$e_a = \frac{L_{fl}}{300} \text{ ou } e_a = \frac{h}{30}$$

Na qual:

$$e_a = \frac{L_{fl}}{300} = \frac{200}{300} = 0,67 \text{ cm} >$$

$$> e_a = \frac{h}{30} = \frac{12}{30} = 0,4 \text{ cm}$$

Portanto, $e_a = 0,67$ cm.

A carga crítica F_E é dada por:

$$F_E = \frac{\pi^2 \times E_{c0,ef} \times I}{L_{fl}^2} = \frac{\pi^2 \times 1032 \times 2304}{200^2} = 586,68 \text{ kN}$$

O momento fletor é dado por:

$$M_d = N_d \times e_a \times \frac{F_E}{F_E - N_d} = 121,8 \times 0,67 \times \frac{586,68}{586,68 - 121,8} = 102,99 \text{ kN.cm}$$

Portanto, fazendo a verificação de segurança:

$$\frac{N_d}{A \times f_{c0d}} + \frac{M_d}{W \times f_{c0d}} \leq 1 \Rightarrow \frac{121,8}{192 \times 1,74} + \frac{102,99}{384 \times 1,74} = 0,519 \leq 1$$

5.2 Cálculo segundo programa desenvolvido

Apresenta-se, a seguir, a sequência de utilização para a resolução do exercício proposto anteriormente, porém, utilizando-se o programa computacional desenvolvido.

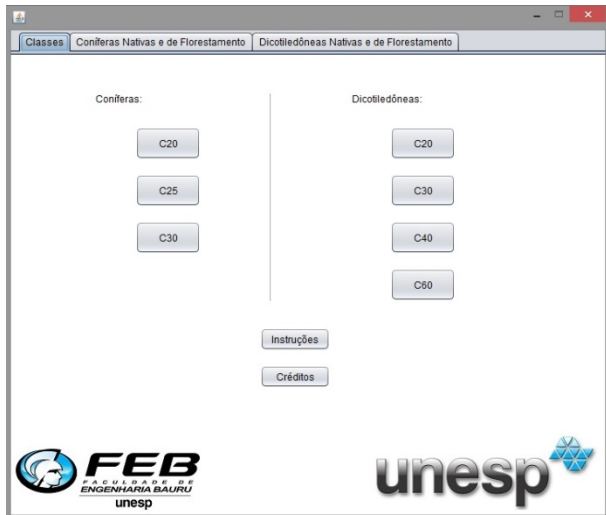


Figura 1 – Escolha da madeira por classes. Fonte: Autor



Figura 2 – Escolha da madeira por espécie. Fonte: Autor



Figura 3 – Escolha da seção transversal. Fonte: Autor

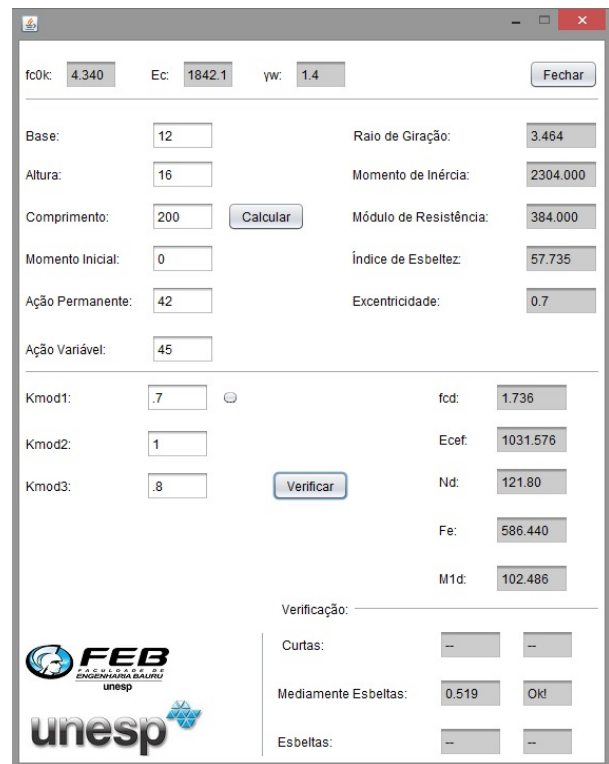


Figura 4 – Inserção dos dados, cálculos intermediários e resultado final, barra de seção transversal retangular. Fonte: Autor

Nas figuras 5 e 6 estão apresentadas telas com possibilidades de visualização de instruções.

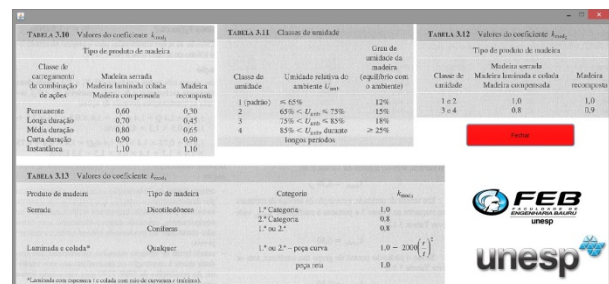


Figura 5 – 'Tooltip' das tabelas de K_{mod} . Fonte: Autor

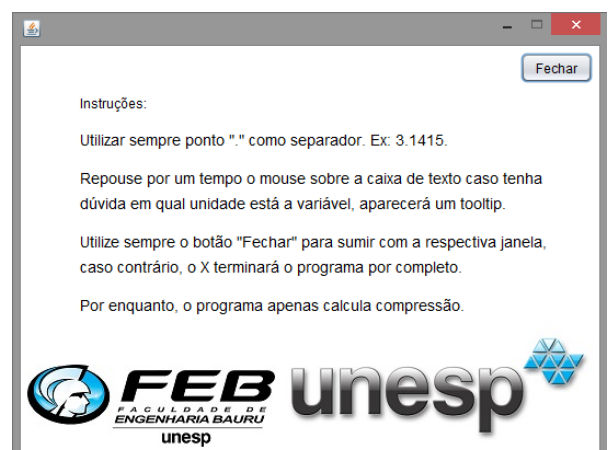


Figura 6 – Tela de instruções. Fonte: Autor

Os resultados finais de procedimentos de cálculo estão expostos no destaque inferior da tela após clique no botão ‘verificar’, com verificação da condição da barra analisada.

Caso a verificação não se confirme, o programa apresentará falha, bastando modificar os valores inseridos anteriormente e repetir o processo de cálculo (Figura 7).

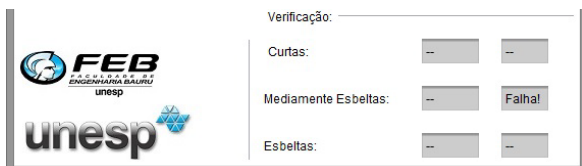


Figura 7 – Exemplo de falha na verificação. Fonte: Autor

A Figura 8 mostra outro exemplo numérico, apresentando a tela com os resultados de verificação de uma coluna de seção circular (Pfeil, 2003).

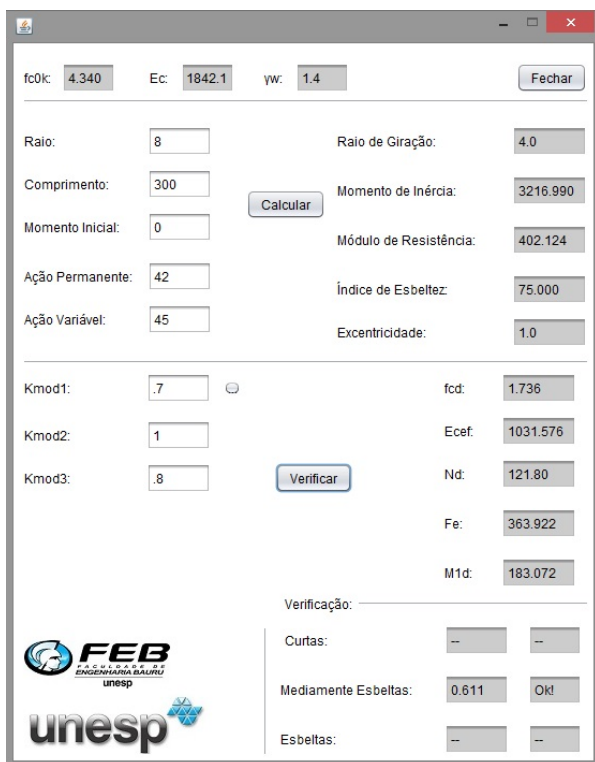


Figura 8 – Inserção dos dados, cálculos intermediários e resultado final, barra de seção transversal circular. Fonte: Autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 Natan Kameya (kameya7@hotmail.com) ou Luttgardes de Oliveira Neto (lutt@feb.unesp.br).

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNESP – Faculdade de Engenharia – Bauru pelo apoio na publicação deste trabalho e a todos os envolvidos no projeto.

8 FINANCIAMENTO

Bolsa IC - PIBIC/PIBITI/CNPq - 2013/2014

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997
- CALIL JUNIOR, C.; LCHAR, F. F. A. R.; DIAS, A. A. Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. Barueri: Manole, 2003.
- DEITEL, H. M.; DEITEL, P. J. Java – como programar. Pearson Prentice Hall, 2010.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.
- SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, A.; MORAES, P. D. Estruturas de Madeira, p. 1-186, 2006.