

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE PEÇAS DE MADEIRA SUBMETIDAS À FLEXÃO

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR THE DESIGN TIMBER STRUCTURES SUBJECTED TO BENDING MOMENT

Gustavo Henrique dos Reis Rosa de Araújo¹, Lauren Karoline de Sousa Gonçalves²

¹Graduando na Faculdade de Engenharia Civil – FECIV, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, Brasil – gustavo.rosa@ufu.br

²Professora na Faculdade de Engenharia Civil – FECIV, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, Brasil – laurenkaroline@ufu.br

Resumo: A madeira possui utilização histórica na construção civil, sendo um dos principais materiais para obras de engenharia até o início do século XIX. Atualmente, a norma referente ao dimensionamento da madeira, ABNT NBR 7190:2022, foi atualizada e alguns de seus critérios de dimensionamento foram alterados. Para auxiliar o entendimento destas alterações, para usuários que já utilizavam a norma antiga e para usuários que pretendem aprender a nova, foi desenvolvido uma ferramenta computacional, nomeada de “WooDim” por meio da linguagem python, para dimensionar uma viga de madeira biapoiada, submetida à qualquer esforço de flexão devido a um carregamento distribuído. Por fim, validou-se a utilização da ferramenta computacional, com uma comparação dos valores obtidos de forma manual e pelo programa.

Palavras-chave: madeira, software, dimensionamento, flexão, momento fletor.

Abstract: Timber has a historical use in building construction, being one of the main materials for engineering works until the early 19th century. The Brazilian norm for timber design, ABNT NBR 7190:2022, was recently updated and some of design methods have been changed. To assist the learning of these changes, for users who already used the old norm and for users who intend to learn the updated norm, a software was developed, through python language and named of “WooDim”, to design a timber beam, when subjected to any bending moment due to distributed loading. Finally, the validation of the tool was obtained by comparing of the values obtained manually and by the program.

Keywords: Timber, software, design, bending moment.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material que apresenta diversas características favoráveis ao seu uso como elemento estrutural na construção civil, podendo destacar a sua relação resistência/peso, sua fácil obtenção de forma sustentável, a facilidade de manuseio do material e o seu bom isolamento térmico, entre outros (TRICHES JUNIOR, 2018). Seu plantio pode ser oriundo de áreas destinadas ao reflorestamento, e os produtos industrializados de madeira são obtidos de forma otimizada a partir da minimização de perdas (PFEIL, 2003).

Com relação à utilização da madeira no Brasil, Mello (2007) comenta sobre suas múltiplas finalidades, destacando seu uso em estruturas temporárias como cimbramentos e andaimes, em estruturas definitivas como coberturas, postes, dormentes, estacas e cruzetas. Além dessas finalidades, a madeira também pode ser empregada como elemento estrutural, como vigas, pilares e lajes, de edifícios de múltiplos pavimentos, galpões e pontes.

À medida que os avanços tecnológicos ocorrem, novas potencialidades de uso, mais sofisticadas, são desenvolvidas para a aplicação da madeira, e novas empresas vem empregando a madeira como material estrutural (BRITO, LEANDRO DURASSAT, 2014).

Em relação aos parâmetros normativos, os critérios de dimensionamento para estrutura de madeira foram atualizados conforme a ABNT NBR 7190:2022. A atualização da norma afeta, sumariamente, a forma que o dimensionamento era calculado anteriormente. Desta forma, torna-se necessário que novos estudos sejam elaborados com o propósito de informar os critérios atuais, seja para usuários da norma antiga que ainda não estão habituados com as alterações ou para novos usuários que pretendem aprender sobre o dimensionamento de uma estrutura de madeira.

Diante do exposto, foi realizado um estudo para compreender os principais fundamentos da norma de dimensionamento de estruturas de madeira ABNT NBR 7190:2022 e, a partir disto, desenvolveu-se uma ferramenta computacional por meio da linguagem de programação Python para dimensionar peças retangulares de madeira submetidas à flexão simples, flexão oblíqua, flexocompressão ou flexotração para vigas biapoiadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades mecânicas da madeira

O conhecimento das propriedades mecânicas do material é o primeiro passo para iniciar o dimensionamento de uma estrutura. A norma ABNT NBR 7190-4:2022 define os métodos de ensaio e amostragem para caracterização de peças estruturais de madeira, atribuídas a lotes que são considerados homogêneos. Segundo a norma ABNT NBR 7190-1:2022, um lote é considerado homogêneo quando o coeficiente de variação da resistência à flexão das peças for inferior a 20%.

As classes de resistência da madeira são propriedades mecânicas de peças padronizadas, sendo estas utilizadas na elaboração de projetos estruturais. Para a caracterização completa da madeira a fim de seu uso em estruturas, as seguintes propriedades devem ser determinadas por meio de ensaios: resistência à flexão, resistência à compressão paralela às fibras, resistência à tração paralela às fibras, resistência ao embutimento, módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, densidade básica (PFEIL, 2003).

A ABNT NBR 7190-1:2022 apresenta as propriedades citadas acima de acordo com duas categorias: Coníferas e Folhosas. Na Tabela 1 e na Tabela 2 foram definidas, respectivamente, as propriedades físicas e mecânicas para espécies de florestas nativas obtidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos e para peças estruturais.

Tabela 1 - Classes de Resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos.

Classes	f_{c0k}	f_{v0k}	$E_{c0,med}$	Densidade a 12%
	MPa	MPa	MPa	kg/m ³
D20	20	4	10000	500
D30	30	5	12000	625
D40	40	6	14500	750
D50	50	7	16500	850
D60	60	8	19500	1000
NOTA 1 Os valores desta Tabela foram obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190-3.				
NOTA 2 Valores referente ao teor de umidade de 12%.				
NOTA 3 Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na ABNT NBR 7190-3:2022, Tabela A.1.				

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022

Tabela 2 - Classes de Resistência definidas em ensaios de peças estruturais.

		Coníferas												Folhosas							
	Símbolo	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
Propriedades de resistência																					
Mpa																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	50	18	24	30	35	40	50	60	70	
Tração paralela	$f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	30	11	14	18	21	24	30	36	42	
Tração perpendicular	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
Compressão paralela	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	29	18	21	23	25	26	29	32	34	
Compressão perpendicular	$f_{c90,k}$	2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,2	7,5	7,8	8	8,1	8,3	9,3	11	13,5	
Cisalhamento	f_{vk}	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	3,4	4	4	4	4	4	4,5	5	
Propriedades de rigidez																					
Gpa																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	9,5	10	11	12	13	14	17	20	
Módulo de elasticidade a 0° característico	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6	6,4	6,7	7,4	7,7	8	8,7	9,4	10	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8	
Módulo de elasticidade a 90° médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33	
Módulo de elasticidade transversal	G_m	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25	
Densidade																					
kg/m³																					
Densidade característica	ρ_k	29	310	320	33	340	350	370	380	400	420	460	475	485	530	540	560	620	700	900	
Densidade média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	760	840	1080	
Nota 1 Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.																					
Nota 2 Valores referentes ao teor de umidade de 12%.																					

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022

A ABNT NBR 7190-1:2022 descreve os valores de cálculo como uma propriedade da madeira obtida a partir do valor característico, conforme indicado pela Equação (1).

$$X_d = k_{mod} \times \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (1)$$

onde X_k é o valor da resistência característica, γ_w é o coeficiente de minoração das propriedades da madeira, $\gamma_w = 1,4$ para estados-limite últimos (ELU) decorrentes de tensões normais, $\gamma_w = 1,8$ para ELU decorrentes de tensões de cisalhamento e $\gamma_w = 1,0$ para o estados-limite de serviço (ELS), e k_{mod} é o coeficiente de modificação que contempla influências não consideradas pelo coeficiente de minoração. O coeficiente k_{mod} é calculado conforme a Equação (2).

$$k_{mod} = k_{mod1} \times k_{mod2} \quad (2)$$

onde k_{mod1} é o coeficiente de modificação que depende da classe de carregamento e do tipo da madeira e k_{mod2} é o coeficiente de modificação que depende da classe de umidade e do tipo de madeira, sendo ambos os coeficientes obtidos por meio norma ABNT NBR 7190-1:2022. Ressalta-se que, conforme a norma ABNT NBR 7190:1997, o coeficiente

k_{mod} era multiplicado pelo coeficiente k_{mod3} que dependia da categoria da madeira e que foi removido do cálculo do coeficiente de modificação atual.

Ressalta-se que os valores especificados de resistência pela norma ABNT NBR 7190-1:2022 são referentes à umidade de equilíbrio de 12%. Para a caracterização de peças submetidas a uma umidade diferente do valor padrão, devem ser apresentados os valores corrigidos para a resistência (f_{12}) e módulo de elasticidade (E_{12}) conforme as Equações (3) e (4), respectivamente.

$$f_{12} = f_U \times \left[1 + \frac{3 \times (U - 12)}{100} \right] \quad (3)$$

$$E_{12} = E_U \times \left[1 + \frac{2 \times (U - 12)}{100} \right] \quad (4)$$

onde f_U e E_U são os valores de resistência e rigidez corrigidos para umidade de equilíbrio e U é o valor da umidade de equilíbrio em um intervalo entre 10% e 25%.

Além da correção do valor de resistência para umidade de equilíbrio, também deve ser considerada a inclinação α das tensões normais em relação às fibras da madeira. Segundo a ABNT NBR 7190-1:2022, a redução da resistência é calculada conforme a fórmula de Hankison – Equação (5) – quando α for maior que 6°.

$$f_{\alpha} = \frac{f_0 \times f_{90}}{f_0 \times \sin^2 \alpha + f_{90} \times \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

onde f_{α} é a resistência às tensões normais reduzida devido à inclinação das fibras da madeira, f_0 é a resistência às tensões normais paralelas às fibras da madeira, f_{90} é a resistência às tensões normais perpendiculares às fibras da madeira e α é o ângulo de inclinação correspondente à fibra da madeira escolhida.

2.2 Cálculo das ações atuantes

Ações são solicitações que provocam esforços ou deformações nas estruturas. Elas podem ser classificadas em ações permanentes, variáveis, excepcionais. As permanentes são solicitações que apresentam pouca variabilidade durante praticamente todo tempo de

vida da construção. As ações variáveis apresentam variações significativas durante o tempo de vida de construção, enquanto que as excepcionais são aquelas que possuem duração extremamente curta e probabilidade muito baixa de ocorrência. Vale salientar que as cargas acidentais representam as ações variáveis que são definidas a partir do uso da construção (ABNT NBR 8681:2003).

Para a determinação dos valores de cálculo das ações, deve-se considerar a probabilidade de atuação simultânea das ações acima. Desta forma, deve-se combiná-las a fim de obter a situação mais desfavorável para estrutura. A norma ABNT NBR 7190-1:2022 define o uso das combinações das ações para os estados-limite último (ELU) e de serviço (ELS) segundo a norma ABNT NBR 8681:2003.

De acordo com a ABNT NBR 8681:2003, existem três combinações de ações para os estados-limite último: combinações últimas normais, combinações últimas especiais ou de construção e combinações últimas excepcionais. O equacionamento para o cálculo das combinações é descrito, respectivamente, conforme as Equações (6), (7) e (8). Os fatores de combinação e redução para as ações variáveis consideradas no equacionamento são definidos pela norma NBR 8681:2003 foram apresentados na Tabela 3.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi,k} + \gamma_Q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k} \right] \quad (6)$$

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi,k} + \gamma_Q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j,ef} F_{Qj,k} \right] \quad (7)$$

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exec} + \gamma_q \sum_{j=1}^n \psi_0 F_{Qj,k} \quad (8)$$

onde γ_{Gi} é coeficiente de ponderação das ações permanentes, γ_Q é o coeficiente de ponderação das ações variáveis, $F_{Gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes, $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada como principal, $F_{Qj,k}$ é o valor característico das ações variáveis consideradas como secundárias, $F_{Q,exec}$ é o valor da ação transitória excepcional, ψ_0 e $\psi_{0,ef}$ são fatores de combinação que considera a possibilidade de ação simultânea das solicitações variáveis, sendo $\psi_{0,ef}$ igual ao fator ψ_0

adotado nas combinações normais, exceto quando a ação principal possuir tempo de curta duração. Neste caso, $\psi_{0,ef}$ possui o valor do fator ψ_2 .

Tabela 3 - Fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para as ações variáveis.

Ações	ψ_0	ψ_1	$\psi_2^{3), 4)}$
Cargas acidentais de edifícios			
Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹⁾	0,5	0,4	0,3
Locais em que há predominância de pesos e equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,7	0,6	0,4
Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento			
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura			
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos			
Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
Pontes rodoviárias	0,7	0,5	0,3
Pontes ferroviárias não especializadas	0,8	0,7	0,5
Pontes ferroviárias especializadas	1,0	1,0	0,6
Vigas de rolamentos de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
¹⁾ Edificações residenciais, de acesso restrito. ²⁾ Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ³⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero. ⁴⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução ψ_2 pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7.			

Fonte: ABNT NBR 8681:2003

Além das combinações para o ELU, é necessário calcular a combinação para o ELS. De acordo com a ABNT NBR 8681:2003 existem 3 combinações de ações para ELS: combinação quase permanente de serviço, combinação frequente de serviço e combinação rara de serviço. O equacionamento para o cálculo destas combinações é descrito, respectivamente, conforme as Equações (9), (10) e (11).

$$F_d = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{Qj,k} \quad (9)$$

$$F_d = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{Qj,k} \quad (10)$$

$$F_d = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{1j} F_{Qj,k} \quad (11)$$

onde ψ_1 e ψ_2 são fatores de redução de cargas variáveis apresentados anteriormente na Tabela 3, $F_{Gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes, $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada como principal, $F_{Qj,k}$ é o valor característico das ações variáveis consideradas como secundárias.

2.3 Dimensionamento das tensões normais e tangenciais

Após a definição das propriedades físicas da madeira e obtenção dos valores dos esforços atuantes, é necessário atender os critérios dados pela norma ABNT NBR 7190-1:2022 para peças submetidas à flexão. Ressalta-se que há vários tipos de esforços, como a flexão simples, flexão oblíqua, flexotração, flexocompressão e o esforço cortante.

Para peças submetidas à flexão simples reta cujo plano de ação contém o eixo central de inércia da seção transversal, a ABNT NBR 7190-1:2022 recomenda que a Equação (12) deve ser atendida como condição de segurança.

$$\frac{\sigma_{M,d}}{f_{m,d}} = \frac{\frac{M_d}{W}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (12)$$

onde $\sigma_{M,d}$ é o valor máximo da tensão atuante devido ao momento fletor, $f_{m,d}$ é o valor de cálculo da resistência, M_d é o valor de cálculo do momento fletor, W é o módulo de resistência da seção transversal em relação ao eixo central de inércia perpendicular ao plano de ação do momento fletor.

Vale mencionar que o valor de cálculo da resistência deve considerar os fatores de redução quando a inclinação das fibras entre peças de madeira for superior a 6° ou quando a umidade das peças for diferente de 12%, conforme equacionamento apresentado no item 2.1. Neste sentido, destaca-se que a ferramenta computacional contempla a redução da resistência $f_{m,d}$ para as condições mencionadas.

Para peças submetidas à flexão simples oblíqua, a ABNT NBR 7190-1:2022 recomenda que a Equação (13) seja atendida, considerando a mais rigorosa das condições de segurança.

$$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_m \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad e \quad k_m \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (13)$$

onde $\sigma_{Mx,d}$ é o valor da tensão máxima de cálculo devido ao momento fletor atuante na direção do eixo x, $\sigma_{My,d}$ é o valor da tensão máxima de cálculo devido ao momento fletor atuante na direção do eixo y e k_m é o coeficiente de correção, sendo $k_m = 0,7$ para seções retangulares e $k_m = 1,0$ para as demais seções transversais.

Para peças submetidas à flexotração e flexocompressão, a ABNT NBR 7190-1:2022 recomenda que as Equações (14) e (15), respectivamente, devem ser atendidas para a mais rigorosa das condições de segurança.

$$\frac{\sigma_{Nt0,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_m \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad e \quad \frac{\sigma_{Nt0,d}}{f_{t0,d}} + k_m \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (14)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_m \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad e \quad \left(\frac{\sigma_{Nc0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (15)$$

onde $\sigma_{Nt0,d}$ e $\sigma_{Nc0,d}$ são os valores de cálculo da tensão normal atuante devido à força normal de tração e compressão, respectivamente. E $f_{t0,d}$ e $f_{c0,d}$ são os valores da resistência de cálculo à tração e à compressão paralela às fibras, respectivamente.

Em relação às tensões tangenciais, pois peças que estão submetidas à flexão também geram uma força cortante, a condição de segurança deve ser verificada conforme Equação (16).

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S}{b \cdot I} \leq f_{v,0d} \quad (16)$$

onde V_d é o esforço cortante de cálculo, S é o momento estático da seção, $f_{v,0d}$ é o valor da resistência de cálculo de esforço cortante, b é a largura da seção em estudo, e I é o momento de inércia da seção transversal.

2.4 Verificação da estabilidade

A verificação de estabilidade deve ser realizada para peças comprimidas e flexocomprimidas. Componentes de treliças, sistemas de contraventamento, além de colunas de pilares são exemplos de peças que possuem o esforço de compressão ou flexocompressão como ações principais. (PFEIL, 2003).

Segundo Pfeil (2003), a análise da estabilidade deve ser realizada para peças esbeltas, pois sua resistência pode ser reduzida devido ao processo de flambagem por flexão:

“Curvaturas iniciais em peças esbeltas sob compressão axial ou deslocamentos laterais produzidos por ação de um momento fletor aplicado tendem a ser ampliados pelo esforço de compressão em um processo denominado flambagem por flexão, o qual reduz a resistência da peça em relação ao caso de uma peça curta.”

O cálculo do índice de esbeltez é realizado a partir da Equação (17), conforme indicado pela ABNT NBR 7190:2022.

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I}{A}}} \quad (17)$$

onde L_0 é o comprimento de flambagem, I é o momento de inércia na direção analisada, A é a área da seção transversal.

O comprimento de flambagem (L_0) é calculado pela Equação (18).

$$L_0 = K_E \cdot L \quad (18)$$

onde K_E é o coeficiente que depende das condições de vinculação das extremidades dos apoios e L é o comprimento da seção longitudinal analisada. A ABNT NBR 7190-1:2022 define os valores do coeficiente K_E para cada tipo de vinculação por meio da Tabela 4.

Tabela 4 - Valores dos coeficientes K_E

Modos de flambagem						
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Código das condições de extremidade		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre				
		Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida				
		Rotação livre e translações impedidas				
		Rotação impedida e translações livres				
		Rotação e translações livres				

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022

Para peças comprimidas e flexocomprimidas, deve-se calcular o índice de esbeltez relativa. Caso o índice seja inferior a 0,3, não é necessário efetuar a verificação de estabilidade. Caso o índice seja superior a 0,3, deve-se atender as condições de segurança referente a estabilidade.

A ABNT NBR 7190-1:2022 define as Equações (19) e (20) para os índices de esbeltez relativa, sendo, respectivamente, para o eixo x e y.

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (19)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (20)$$

onde λ_x e λ_y são, respectivamente, os índices de esbeltez em relação ao eixo x e y, $f_{c0,k}$ é o valor característico de resistência à compressão das fibras paralelas às fibras da madeira e $E_{0,05}$ é o valor característico do módulo de elasticidade medido na direção paralela às fibras da madeira.

Para o caso de esbeltez relativa superior a 0,3, deve-se atender as seguintes condições de segurança dadas pela Equação (21).

$$\frac{\sigma_{Nt0,d}}{k_{cx}f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_m \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad e \quad \frac{\sigma_{Nt0,d}}{k_{cy}f_{t0,d}} + k_m \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (21)$$

onde $\sigma_{Mx,d}$ e $\sigma_{My,d}$ são as tensões normais devido ao momento fletor de primeira ordem devido às forças laterais, excentricidades na aplicação das forças axiais, curvatura inicial da barra, deformações induzidas ou quaisquer outras situações em que há momentos fletores de primeira ordem atuando na peça. k_{cx} e k_{cy} são calculados conforme a Equação (22).

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad e \quad k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (22)$$

Ressalta-se que, na norma ABNT NBR 7190:1997, para verificação de segurança da estabilidade, não era necessário atribuir a equação os coeficientes k_{cx} e k_{cy} . Desta forma, a condição de segurança atual para a estabilidade é semelhante a condição de segurança da norma europeia EN 1995-1-1 EUROCODE 5: 2004.

onde k_x e k_y são calculados conforme as Equações (23) e (24).

$$k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c(\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2] \quad (23)$$

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2] \quad (24)$$

onde β_c é um coeficiente que depende do tipo de madeira utilizada. Sendo $\beta_c = 0,2$ para madeira maciça serrada e peças roliças e $\beta_c = 0,1$ para madeira lamelada e madeira laminada.

Além da verificação de estabilidade, para peças retangulares submetidas à flexão simples reta, também é necessário verificar a estabilidade lateral. Em um primeiro momento, calcula-se, por meio da Equação (25), se a verificação pode ser dispensada. Caso não seja possível, deve-se atender os requisitos da Equação (26).

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{0,ef}}{\beta_M f_{m,d}} \quad (25)$$

$$\sigma_{c,d} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\frac{L_1}{b} \beta_M} \quad (26)$$

onde L_1 é o comprimento definido como a distância entre pontos adjacentes da borda comprimida com deslocamentos laterais impedidos, b é a largura da seção transversal da peça, $E_{0,ef}$ é o módulo de elasticidade efetivo na direção paralela às fibras da madeira apresentado na Equação (27) e β_M apresentado na Equação (28), considerando $\gamma_f=1,4$ e $\beta_E=4$, ou obtido pela Tabela 5.

Ressalta-se que a norma ABNT NBR 7190-1:2022 informa que, a equação (26) é válida apenas para seções retangulares submetidas à flexão. Desta forma, para seções não retangulares, o estudo da estabilidade lateral deve ser realizado individualmente.

$$E_{0,ef} = K_{mod1} \cdot K_{mod2} \cdot E_{0,med} \quad (27)$$

$$\beta_M = \frac{4 \beta_E}{\pi \gamma_f} \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{3/2}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{1/2}} \quad (28)$$

Tabela 5 - Coeficiente de correção β_M para $\gamma_f=1,4$ e $\beta_E=4$

h/b	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
β_M	6	8,8	12,3	15,9	19,5	23,1	26,7	30,3	34	37,6	41,2	44,8	48,5	52,1	55,8	59,4	63	66,7	70,3	74

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022

2.5 Verificações de segurança no ELS

Além das condições de segurança devidos aos esforços no estado-limite último, é necessário realizar verificações de segurança em relação ao estado-limite de serviço. Segundo a ABNT NBR 7190-1:2022, para que a estrutura seja segura, deve-se satisfazer as condições de segurança para deslocamentos excessivos e vibrações excessivas. Para a verificação da deformação ao longo do tempo, a norma recomenda a utilização da combinação rara de serviço conforme a ABNT NBR 8681:2003:

“Considerando que a madeira possui características distintas de outros materiais de construção, como por exemplo, a significativa deformação ao longo do tempo (fluência), as verificações quanto aos critérios de segurança em estados-limite de serviço devem ser consideradas adotando a combinação rara de serviço conforme a ABNT NBR 8681 para a avaliação das flechas instantâneas (ABNT NBR 7190:2022).”

Desta forma, para o deslocamento instantâneo, ou seja, sem considerar os efeitos ao longo do tempo, é calculado conforme a Equação (29).

$$\delta_{inst} = \sum_{i=1}^m \delta_{inst,Gi,k} + \delta_{inst,Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_1 \delta_{inst,Qj,k} \quad (29)$$

onde $\delta_{inst,Gi,k}$ é a deformação instantânea devido aos esforços de cargas permanentes, $\delta_{inst,Q1,k}$ é a deformação instantânea devido aos esforços da carga variável principal, $\delta_{inst,Qj,k}$ são as deformações instantâneas devido aos esforços de cargas variáveis com coeficiente de redução.

Após o cálculo da flecha instantânea, deve-se calcular a flecha final, ou seja, considerar os efeitos ao longo do tempo. A ABNT NBR 7190:2022 recomenda considerar combinação quase permanente para o cálculo da flecha final, conforme a Equação (30).

$$\delta_{inst} = \sum_{i=1}^m \delta_{fin,Gi,k} + \sum_{j=2}^n \delta_{inst,Qj,k} \quad (30)$$

onde $\delta_{fin,Gi,k}$ e $\delta_{inst,Qj,k}$ são as deformações devido às cargas variáveis e permanentes para o efeito de fluência. O cálculo para obtenção destas deformações foi apresentado nas Equações (31) e (32).

$$\delta_{fin,Gi,k} = \delta_{inst,Gi,k} + \delta_{creep,Q,k} = \delta_{inst,G,k}(1 + \phi) \quad (31)$$

$$\delta_{fin,Qi,k} = \delta_{inst,Qi,k} + \delta_{creep,Q,k} = \delta_{inst,Q,k}\psi_2(1 + \phi) \quad (32)$$

onde $\delta_{creep,Q,k}$ é a deformação resultante dos efeitos de fluência e ϕ é o coeficiente de fluência que depende do tipo de material e da classe de umidade. Os valores para este coeficiente foram determinados considerando a Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficiente de Fluência (ϕ)

Material	Classes de umidade		
	(1)	(2 e 3)	(4)
Madeira serrada, MLC, MLCC, LVL e roliça	0,6	0,8	2,0 ^a
Compensado estrutural	0,8	1	2,5
OSB estrutural	1,5	2,25	-
^a Não é permitido o uso de MLCC para classe de umidade 4.			

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022

Para vigas biapoiadas submetidas a um carregamento distribuído, o deslocamento deve ser calculado conforme a Equação (33).

$$\delta_d = \frac{5 \times Q \times L^4}{384EI} \quad (33)$$

onde Q é o esforço solicitante de cálculo devido ao carregamento distribuído, E é o módulo de elasticidade médio a 0° e I é o momento de inércia na direção da aplicação do carregamento.

Após determinar o deslocamento final, é necessário verificar se o mesmo encontra dentro dos valores limites estipulados pela ABNT NBR 7190-1:2022. Os valores limites para flecha instantânea (δ_{inst}), flecha final (δ_{fin}) e flecha virtual final ($\delta_{net,fin}$) estão na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores-limite de deslocamentos para elementos correntes fletidos

Tipo de viga	δ_{inst}	δ_{fin}	$\delta_{net,fin}$
Vigas biapoiadas ou contínuas	L/300 a L/500	L/150 a L/300	L/250 a L/350
Vigas em balanço	L/150 a L/250	L/75 a L/150	L/125 a L/175

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2023

3. METODOLOGIA

Para implementar a ferramenta computacional, a metodologia foi dividida em duas partes: a primeira foi o dimensionamento de uma viga biapoiada conforme os parâmetros normativos, visando validá-la; e a segunda, foi sobre o desenvolvimento da própria ferramenta.

3.1 Dimensionamento de uma viga retangular e biapoiada submetida à flexão simples

O estudo realizado focou em um exemplo prático que envolveu uma viga de madeira serrada, com uma seção transversal de 6cm x 15cm com 200 cm de comprimento. O dimensionamento foi realizado manualmente utilizando as recomendações normativas apresentadas nos itens 2.1 a 2.5 deste trabalho.

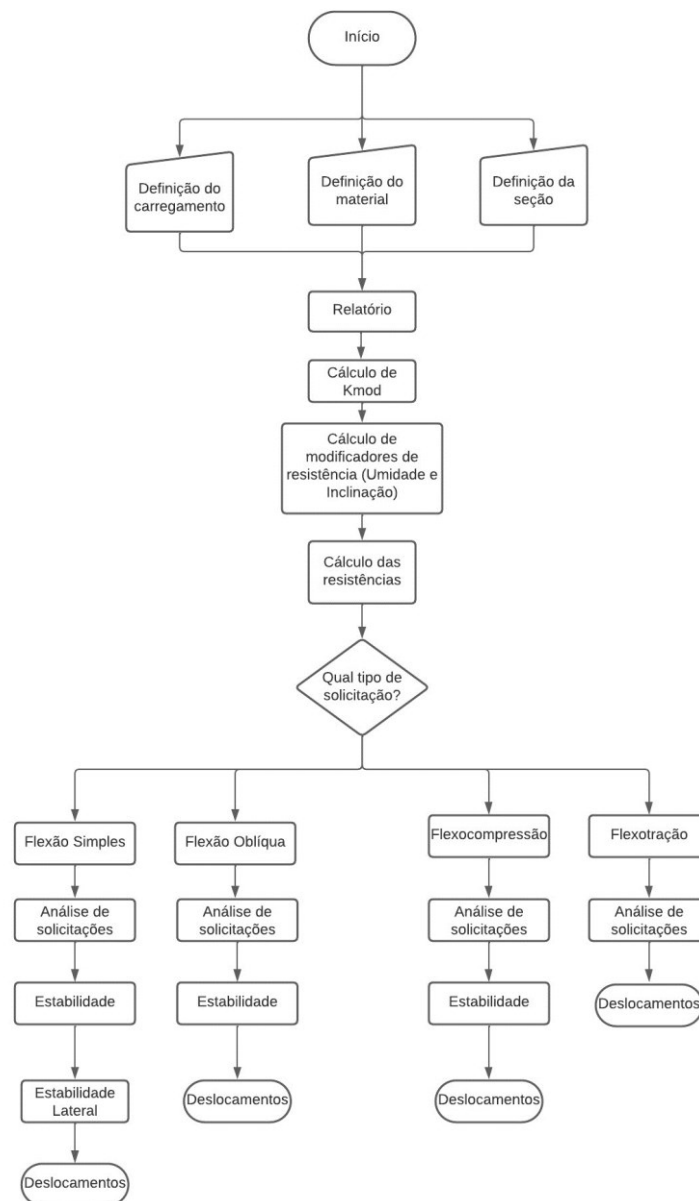
A seção de estudo foi submetida aos seguintes carregamentos: Para o carregamento permanente, a seção foi submetida a uma ação incidente de 2,0 kN/m na direção do eixo y, representativa de cargas constantes que não variam ao longo do tempo, como o próprio peso da madeira ou qualquer estrutura permanentemente fixa a ela. Já para o carregamento variável, submeteu-se a uma carga de 1,5 kN/m na direção do eixo y, oriunda da predominância de pessoas ou equipamentos fixos que podem ser adicionados ou removidos, gerando assim uma variação no carregamento. A madeira selecionada para esta análise foi a classe de resistência C35 e umidade de 15%, indicando suas propriedades mecânicas e de resistência específicas conforme os parâmetros normativos.

3.2 Implementação de uma ferramenta computacional

A ferramenta computacional, nomeada de “WooDim”, foi elaborada com algumas limitações de cálculo. O escopo do programa foi desenvolvido para dimensionar esforços solicitantes provenientes de carregamentos distribuídos e tensões axiais concêntricas em vigas biapoiadas. Ações provenientes de efeitos dinâmicos e temperatura, seções circulares ou compostas também não foram consideradas durante o desenvolvimento do programa.

Para implementação da ferramenta computacional, foi desenvolvido um fluxograma que definiu as orientações interpretadas pelo código do programa. Coutinho (2010) descreve que, de forma análoga a planejar um caminho a ser seguido, ao criar um programa, é necessário entender o ponto de partida, os marcos ao longo desse caminho e as possibilidades de trajeto. Frequentemente, seguir um fluxograma facilita o entendimento e desenvolvimento do código. O fluxograma apresentado na Figura 1 informa como a ferramenta computacional processa os parâmetros de entrada e gera o relatório final.

Figura 1 - Fluxograma de funcionamento da ferramenta computacional

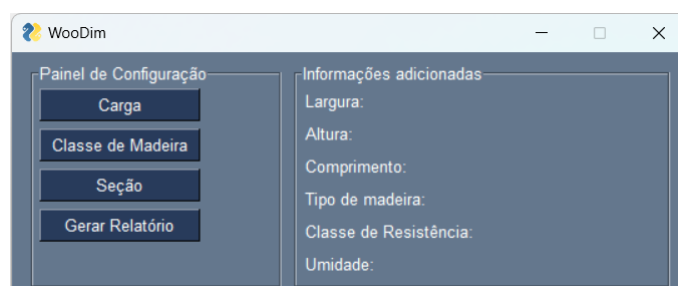


Fonte: Autor (2023)

Para o desenvolvimento do trabalho, os fatores determinantes que foram considerados para seleção da linguagem de programação foram a sua legibilidade, ou seja, facilidade ao ler e entender o código, o acesso gratuito ao *software* Python, e a grande quantidade de bibliotecas disponíveis para suporte ao desenvolvimento de ferramentas computacionais. Por fim, escolheu-se um compilador da linguagem computacional, Pycharm, com a capacidade de criar um ambiente virtual para o código e gerar um arquivo executável para que novos usuários consigam utilizar o programa.

A partir do fluxograma elaborado, desenvolveu-se toda linha de código do programa por meio da linguagem python. Sua interface, Figura 2, foi desenvolvida para que seja intuitiva e dinâmica, ou seja, a mesma será atualizada para cada informação que o usuário preencha no programa.

Figura 2 - Interface Inicial da ferramenta computacional



Fonte: Autor (2023)

4. RESULTADOS

4.1 Dimensionamento de uma viga retangular submetida à flexão simples

Com a finalidade de demonstrar a confiabilidade do *software*, optou-se por fazer o dimensionamento manual da seção do exemplo prático e, por fim, comparou-se os valores obtidos com o gerado pelo programa para verificar a similaridade dos valores.

4.1.1 Definição do carregamento

O cálculo das ações que incidem sobre a seção foram fundamentais para o dimensionamento da estrutura, pois foram utilizadas no programa para verificação dos

Estados-Limites Últimos e de Estados-Limites de Serviço. Para definição do carregamento do exemplo prático, utilizou-se a carga de 2,0 kN/m para o carregamento permanente, e 1,5 kN/m para o carregamento variável devido à predominância de pessoas ou equipamentos fixos. A Equação (34) informou o valor obtido para a combinação do ELU.

$$F_d = 1,3 \times 2,0 + 1,4 \times 1,5 = 4,7 \text{ kN/m} \quad (34)$$

4.1.2 Definição da classe do tipo de madeira

A definição das características físicas da madeira foi de suma importância para definição das resistências de cálculo da seção. Para o exemplo prático, optou-se por uma madeira serrada com classe de resistência C35 com índice de umidade de 15%. Considerando o carregamento permanente informado no item anterior e a classe de umidade II, tem-se que o coeficiente K_{mod} é apresentado na Equação (35).

$$K_{mod} = 0,6 \times 0,9 = 0,54 \quad (35)$$

Além do coeficiente de modificação das propriedades da madeira, foi necessário calcular a redução da resistência (f_{12}) e do módulo de elasticidade (E_{12}) devido à umidade, conforme Equações (36) e (37). Foi considerado, para o exemplo prático, a umidade relativa de 15%:

$$f_{12} = f_u \times \left[1 + \frac{3 \times (15 - 12)}{100} \right] \rightarrow f_u = f_{12} \times 0,917 \quad (36)$$

$$E_{12} = E_u \times \left[1 + \frac{2 \times (15 - 12)}{100} \right] \rightarrow f_u = f_{12} \times 0,943 \quad (37)$$

Assim, foi considerado a classe da madeira C35, desta forma, foi obtido-se as resistências de cálculo à flexão e ao cisalhamento pelas Equações (38) e (39), respectivamente, e a rigidez pela Equação (40).

$$f_{b,d} = 0,54 \times \frac{35}{1,4} \times 0,917 = 12,38 \text{ MPa} = 1,24 \text{ kN/cm}^2 \quad (38)$$

$$f_{v,d} = 0,54 \times \frac{2,8}{1,8} \times 0,917 = 0,99 \text{ MPa} = 0,09 \text{ kN/cm}^2 \quad (39)$$

$$E_{0,ef} = 0,54 \times 13000 \times 0,943 = 6620 \text{ MPa} = 662 \text{ kN/cm}^2 \quad (40)$$

4.1.3 Definição da seção analisada

As dimensões da seção analisada possuem relevância tanto para resistência da peça, quanto para estabilidade da mesma. Para o exemplo prático, foi escolhido uma seção transversal de 6,0cm de largura, 15,0cm para a altura e 2,0m de comprimento. Desta forma, foi possível obter as características geométricas da seção transversal. A área e o momento de inércia nas direções do eixo x e y para a seção de estudo foram calculadas nas Equações (41), (42) e (43).

$$A = 6 \times 15 = 90 \text{ cm}^2 \quad (41)$$

$$I_x = \frac{6 \times 15^3}{12} = 1687,5 \text{ cm}^2 \quad (42)$$

$$I_y = \frac{15 \times 6^3}{12} = 270 \text{ cm}^2 \quad (43)$$

4.1.4 Tensão normal, cisalhante e estabilidade

Determinou-se o momento e a tensão de cálculo devido ao momento fletor na direção do eixo y, a partir das Equações (44), (45), (46) e (47), respectivamente.

$$M_d = \frac{4,7 \times 2^2}{8} = 2,35 \text{ kN.m} = 235 \text{ kN.cm} \quad (44)$$

$$V_d = \frac{4,7 \times 2}{2} = 4,7 \text{ kN} \quad (45)$$

$$\sigma_{f,d} = \frac{235 \times 15/2}{1687,5} = 1,04 \text{ kN/cm}^2 \quad (46)$$

$$\sigma_{v,d} = \frac{4,7 \times 1,5}{90} = 0,078 \text{ kN/cm}^2 \quad (47)$$

Assim, como a tensão devido ao momento fletor foi inferior a resistência de cálculo, os parâmetros considerados no estudo atenderam aos critérios normativos de segurança da ABNT NBR 7190-1:2022 para flexão simples e esforço cortante, conforme Equações (48) e (49).

$$\frac{1,04}{1,24} = 0,838 < 1 \quad (48)$$

$$\frac{0,078}{0,09} = 0,867 < 1 \quad (49)$$

Além da verificação de segurança da flexão simples, foi necessário analisar a estabilidade. Desta forma, calculou-se o índice de esbeltez da seção de estudo, conforme as Equações (49) e (50).

$$\lambda_x = \frac{200}{\sqrt{\frac{270}{90}}} = 115,47 \quad (49)$$

$$\lambda_y = \frac{200}{\sqrt{\frac{1687,5}{90}}} = 46,2 \quad (50)$$

Em seguida, calculou-se o índice de esbeltez relativo para os eixos x e y. O resultado foi apresentado nas Equações (51) e (52).

$$\lambda_{rel,x} = \frac{115,47}{\pi} \sqrt{\frac{25}{8700}} = 1,97 \quad (51)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{46,2}{\pi} \sqrt{\frac{25}{8700}} = 0,788 \quad (52)$$

Com o índice de esbeltez relativo encontrado, foi calculado os coeficientes k_x e k_y , conforme as Equações (53) e (54). Com os coeficientes obtidos, calculam-se os coeficientes k_{cx} e k_{cy} , informados nas equações (55) e (56).

$$k_x = 0,5 \times [1 + 0,2 \times (1,97 - 0,3) + (1,97)^2] = 2,61 \quad (53)$$

$$k_y = 0,5 \times [1 + 0,2 \times (0,78 - 0,3) + (0,78)^2] = 0,85 \quad (54)$$

$$k_{cx} = \frac{1}{2,61 + \sqrt{(2,61)^2 - (1,97)^2}} = 0,23 \quad (55)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{0,85 + \sqrt{(0,85)^2 - (0,78)^2}} = 0,86 \quad (56)$$

Após a determinação dos coeficientes mencionados, verificou-se a condição de segurança para estabilidade da ABNT NBR 7190-1:2022, conforme as Equações (57) e (58).

$$\frac{0,00}{0,23 \times 0,89} + \frac{1,04}{1,24} + 0,7 \times \frac{0,00}{1,24} = 0,838 \leq 1 \quad (57)$$

$$\frac{0,00}{0,86 \times 0,89} + \frac{0,00}{1,24} + 0,7 \times \frac{1,04}{1,24} = 0,587 \leq 1 \quad (58)$$

Por fim, foi feita a análise da necessidade de verificação da estabilidade lateral. Como a relação entre o comprimento L_1 pela largura b , Equação (57), foi inferior à condição estabelecida pela Equação (25), a verificação da estabilidade lateral foi dispensada.

$$\frac{L_1}{b} = 33,33 < \frac{6622,24}{10,52 \times 12,4} = 50,76 \quad (57)$$

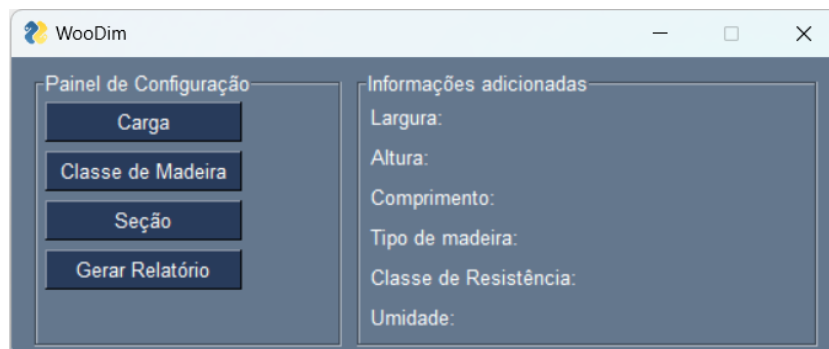
4.2 Utilização da ferramenta computacional

4.2.1 Interface inicial

A ferramenta computacional foi desenvolvida com uma interface simples, com 3 entradas para preenchimento dos respectivos formulários: carregamento, classe da

madeira e dimensões da seção transversal. Além da entrada para os formulários, conforme a Figura 3, a interface ainda possui uma opção para gerar o relatório. Ao adicionar as informações necessárias, a interface principal foi desenvolvida para atualizar os dados, preenchendo as informações adicionais de dimensões e classe da madeira.

Figura 3 - Interface da Ferramenta computacional

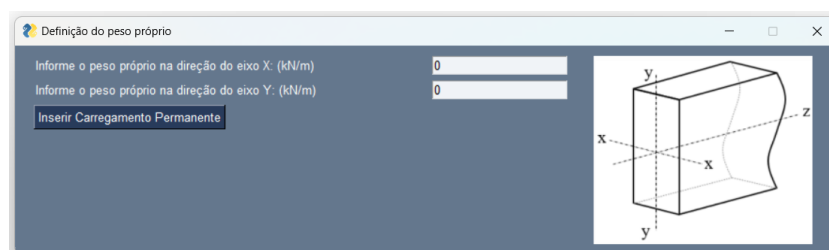


Fonte: Autor (2023)

4.2.2 Interface de preenchimento de dados

O primeiro formulário que foi preenchido refere-se ao carregamento incidente na seção transversal. O mesmo foi dividido em 3 interfaces que representam, respectivamente, o carregamento referente ao peso próprio, o carregamento referente à carga permanente, e o carregamento variável. As Figuras 4, 5 e 6, representam as respectivas interfaces comentadas anteriormente.

Figura 4 - Formulário de preenchimento do peso próprio



Fonte: Autor (2023)

Ao finalizar o formulário dos carregamentos incidentes na seção, a combinação das ações foi calculada pelo programa e poderá ser analisada por meio do relatório final, elaborado pela ferramenta computacional. Em seguida, foi preenchido o formulário de

entrada das informações relativas à classe da madeira e algumas de suas propriedades que interferem na resistência da peça. Na figura 7, foi apresentado a interface de preenchimento das informações referentes classe da madeira.

Figura 5 - Formulário de preenchimento do carregamento permanente

Fonte: Autor (2023)

Figura 6 - Formulário de preenchimento do carregamento variável

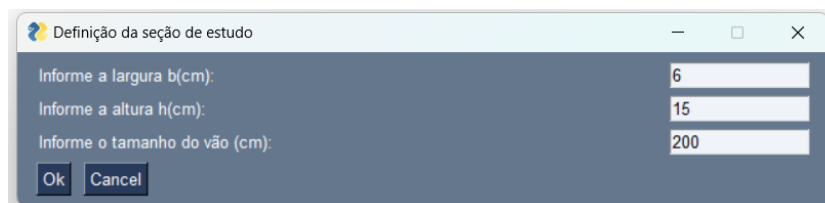
Fonte: Autor (2023)

Figura 7 - Formulário de preenchimento do tipo de madeira

Fonte: Autor (2023)

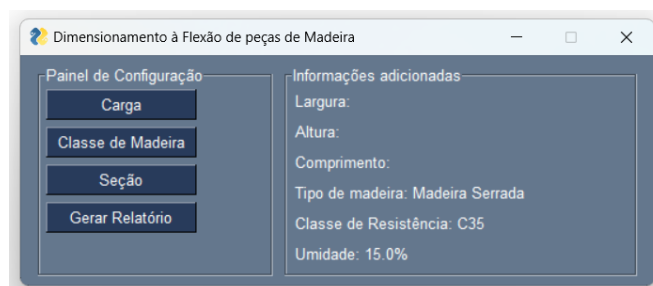
O último formulário preenchido foi o referente às dimensões da seção escolhida. Os dados do exemplo prático foram inseridos no programa, conforme a Figura 8. Ao finalizar o formulário, tornou-se possível notar que o campo de informações adicionadas foi atualizado, conforme a Figura 9.

Figura 8 - Formulário de preenchimento da seção transversal analisada



Fonte: Autor (2023)

Figura 9 - Interface principal atualizada com informações referente à Classe da Madeira



Fonte: Autor (2023)

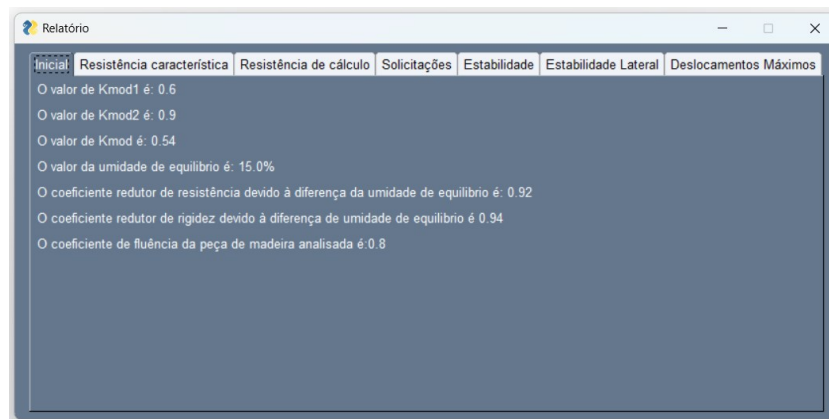
4.2.3 Relatório Final

Ao finalizar os formulários de carregamento, tipo de madeira e dimensões da seção transversal, foi desenvolvido o relatório final para verificar as condições do exemplo prático. Com o propósito de organizar todas as informações geradas pelo relatório, criou-se uma divisão dos dados calculados por meio de abas de acesso na interface. Por exemplo, para acessar o relatório de estabilidade, basta acessar a aba nomeada com este nome para que a interface seja atualizada com os respectivos valores.

A primeira janela do relatório, disponível na Figura 10, apresentou informações dos coeficientes de modificação que influenciam a resistência da madeira. Além disso, é informado o coeficiente de fluência da peça que é utilizada para as verificações de segurança do ELS.

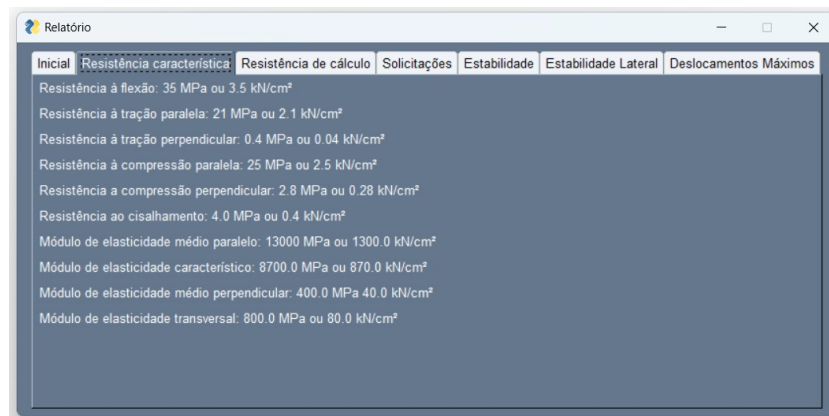
As janelas de resistência característica e resistência de cálculo informaram todos os valores da resistência da peça e seus respectivos módulos de elasticidade. A resistência de cálculo foi obtida conforme a Equação 1, que considerou o coeficiente modificador K_{mod} e o coeficiente de minoração γ_w . Na Figura 11 e Figura 12, foram apresentados, respectivamente, as janelas de resistência característica e resistência de cálculo.

Figura 10 - Janela de dados iniciais do Relatório Final



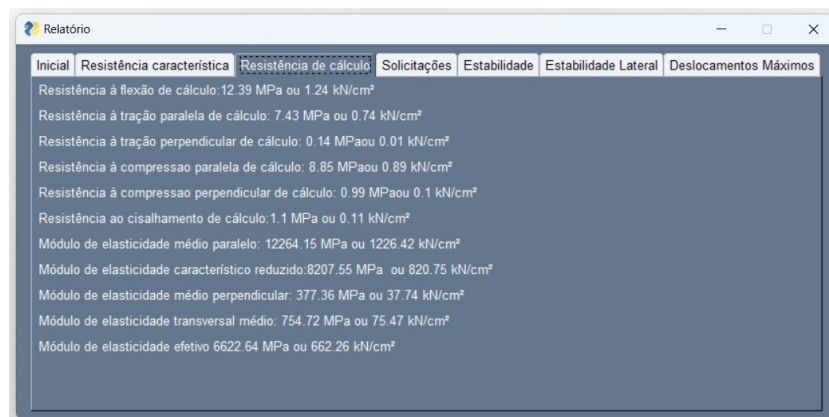
Fonte: Autor (2023)

Figura 11 - Janela da Resistência característica do Relatório final



Fonte: Autor (2023)

Figura 12 - Janela da Resistência de cálculo do Relatório final



Fonte: Autor (2023)

Por fim, a janela referente a verificação dos esforços resistentes, nomeada como “Solicitações”, informou a tensão proveniente da combinação das ações incidentes na seção transversal, conforme a ABNT NBR 8681:2003, e considerou as condições de segurança exigidas pela ABNT NBR 7190-1:2022. A janela de esforços resistentes, Figura 13, informou o tipo de solicitação na seção transversal, flexão simples em torno do eixo y, para o exemplo prático, e os valores das tensões em kN/cm². Por fim, para o caso da Flexão Simples, foi feita a verificação conforme o item 6.3.4 da ABNT NBR 7190-1:2022.

Figura 13 - Janela de esforços resistentes do Relatório final

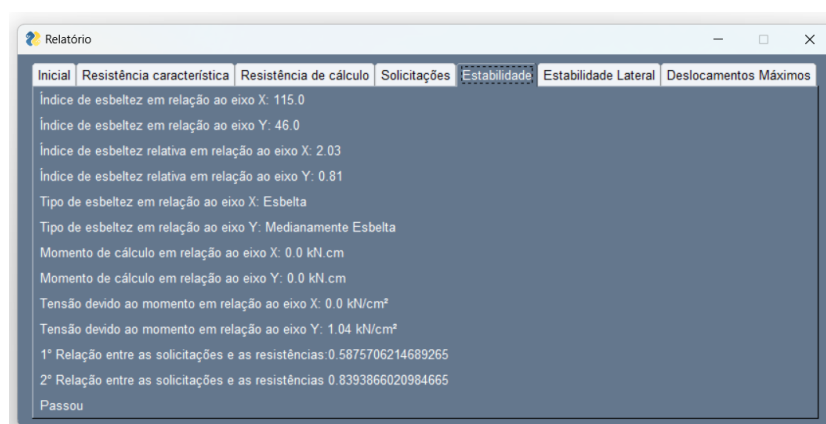


Fonte: Autor (2023)

Além da verificação dos esforços resistentes, foi necessário verificar a estabilidade da seção de estudo. A ferramenta computacional verificou a estabilidade conforme os itens 6.5 da ABNT NBR 7190-1:2022. Para a estabilidade lateral, a verificação foi realizada conforme o item 6.5.6 da mesma norma. Para o exemplo prático, os dados de estabilidade e estabilidade lateral, disponibilizados na Figura 14 e Figura 15.

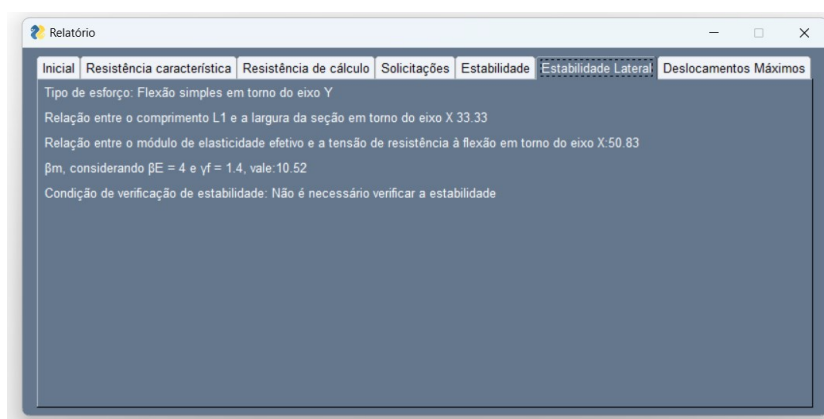
Todas as verificações informadas anteriormente, foram feitas para os Estados-Limites Últimos. A NBR 7190-1:2022 recomenda verificação de deslocamentos excessivos e vibrações excessivas para o Estado-Limite de Serviço. A ferramenta computacional calculou os deslocamentos excessivos da estrutura e verificou sua condição de segurança, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 14 - Janela de verificação da Estabilidade do Relatório final



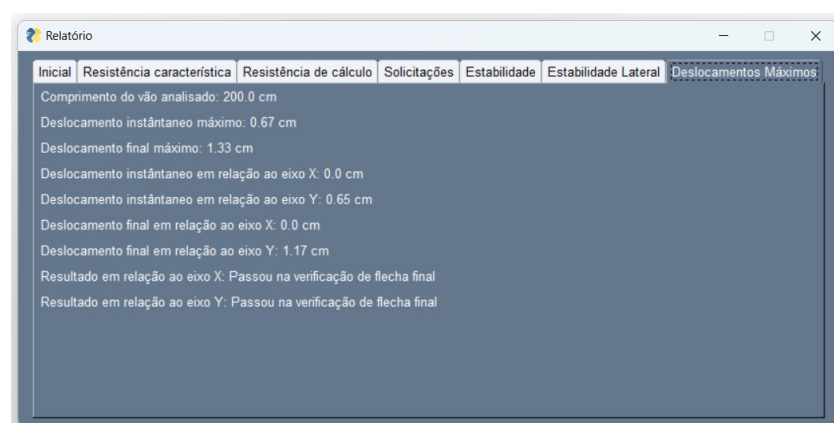
Fonte: Autor (2023)

Figura 15 - Janela da verificação da estabilidade lateral do Relatório final



Fonte: Autor (2023)

Figura 16 - Janela de deslocamentos excessivos do Relatório Final



Fonte: Autor (2023)

A partir dos relatórios finais da ferramenta, comparou-se os resultados fornecidos com aqueles obtidos via cálculo manual. Conforme apresentado por meio da Tabela 8, os

valores calculados manualmente foram próximos dos valores fornecidos pelo programa. Desta forma, para flexão simples, o programa alcançou seu objetivo.

Tabela 8 – Resultados obtidos manualmente confrontados com os resultados do programa

Resultados obtidos para o dimensionamento do exemplo prático		
Dados	Resultado Manual	Resultado da ferramenta computacional
$f_{b,k}$ (kN/cm ²)	3,5	3,5
$f_{v,k}$ (kN/cm ²)	0,28	0,28
K_{mod}	0,54	0,54
$f_{b,d}$ (kN/cm ²)	1,258	1,25
$f_{v,d}$ (kN/cm ²)	0,09	0,1
$E_{0,ef}$ (kN/cm ²)	662	662,26
λ_x	115,47	115
λ_y	46,2	46
$\sigma_{f,d}$ (kN/cm ²)	1,04	1,04
$\sigma_{v,d}$ (kN/cm ²)	0,078	0,0783

Fonte: Autor (2023)

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo, a elaboração de uma ferramenta computacional, por meio da linguagem de programação Python, capaz de realizar cálculos de dimensionamento de vigas biapoiadas de madeira submetidas ao momento fletor devido a um carregamento distribuído. A fim de garantir a confiabilidade da ferramenta, foi elaborado um exemplo prático, apresentado no item 4.1 deste trabalho, com dimensões e solicitações, e obteve-se os esforços solicitantes e resistentes na seção transversal proposta.

A ferramenta computacional foi elaborada com o propósito de ser intuitiva para o cálculo e auxiliar novos usuários a entender o dimensionamento de peças madeiras submetidas à flexão, conforme a ABNT NBR 7190-1:2022. A partir de dados de entrada, o programa foi capaz de definir qual tipo de carregamento, valores de resistência, coeficiente de modificação e informar para o usuário, com rapidez, características definidas pela norma de dimensionamento.

Os resultados obtidos pelo programa foram próximos dos obtidos por meio de cálculos manuais. Porém, é preciso entender a extensão da aplicação da ferramenta. Para casos que se diferem do escopo apresentado, não se recomenda utilizar a ferramenta.

Além das verificações para peças submetidas à flexão, a ferramenta computacional foi elaborada para que, no futuro, seja capaz de calcular peças submetidas apenas compressão e tração, sendo que atualmente, foi desenvolvida para de informar a resistência característica e de cálculo destes tipos de esforços. Portanto, a fim de contribuir com a progressão de pesquisas e aplicações nesta área, recomenda-se:

- Realizar mais estudos sobre as solicitações de peças de madeira e incorporar o cálculo a ferramenta;
- Expandir os limites da ferramenta para carregamentos variados e que considerem cargas pontuais incidindo sobre o vão da seção transversal;
- Inserir no código a formulação para dimensionamento dos elementos de ligação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de madeira: **NBR 7190-1**. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de madeira: **NBR 7190-4**. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ações e segurança nas estruturas - Procedimento: **NBR 8681**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

BRITO, L. D. **Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação**. Orientador: Carlito Calil Junior. 2014. Tese de Doutorado (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18122014-090958/publico/2014DO_LeandroDussarratBrito.pdf> Acesso em: 23 dez. 2022.

MELLO, R. L. **Construção de madeira Materias de construção Projeto arquitetônico**. Orientador: Paulo Castilho Lima. 2007. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Nacional de Brasília, [S. l.], 2007. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/3133>> Acesso em: 22 dez. 2022.

MENEZES, N. **Introdução à programação com Python: Algoritmos e lógica de programação para iniciantes**. 2º. ed. São Paulo: Novatec, 2010.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 8ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

TRICHES JUNIOR, O. A. **Elementos estruturais em madeira: desenvolvimento de programa computacional de dimensionamento**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.