

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



JEANDERSON MENEZES DE OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS DE SEÇÃO
TRANSVERSAL COMPOSTA JUSTAPOSTA COM LIGAÇÃO PREGADA
VIA PLANILHA ELETRÔNICA**

São Cristóvão – SE

2026

JEANDERSON MENEZES DE OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS DE SEÇÃO
TRANSVERSAL COMPOSTA JUSTAPOSTA COM LIGAÇÃO PREGADA
VIA PLANILHA ELETRÔNICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe – UFS, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos

São Cristóvão – SE

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



ATA DE DEFESA

Jeanderson Menezes de Oliveira

**Dimensionamento à Flexão de Vigas de Seção Transversal Composta Justaposta Com
Ligação Pregada via Planilha Eletrônica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como requisito para o título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: **21 de maio de 2026**

Banca Examinadora		Nota
Orientador(a): Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos (UFS)	–	8,0
Examinador(a): Prof. Dr. Higor Sérgio Dantas de Argôlo (UFS)	–	7,0
Examinador(a): Prof. Me. Marcílio Fabiano Goivinho da Silva (IFS)	–	7,5
Média Final:		7,5

Documento assinado digitalmente
 EMERSON FIGUEIREDO DOS SANTOS
Data: 30/05/2026 12:30:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos (UFS)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma planilha eletrônica para o dimensionamento à flexão de vigas de madeira com seção transversal simples e composta justaposta, ligadas por pregos, conforme a ABNT NBR 7190:2022. A ferramenta contempla vigas de seção simples, composta por duas peças e composta por três peças, considerando a interação parcial entre os elementos por meio de ligações semirrígidas. O procedimento de cálculo abrange a determinação das resistências de cálculo, das tensões normais e de cisalhamento, das forças solicitantes nos conectores e a verificação dos deslocamentos instantâneos e finais. A validação foi realizada por meio da comparação entre resultados obtidos analiticamente e aqueles gerados automaticamente pela planilha, observando-se elevada concordância entre os métodos, o que comprova a consistência e a confiabilidade da ferramenta desenvolvida.

Palavras-chave: Estruturas de madeira. Vigas de seção composta. Ligações pregadas. Dimensionamento estrutural. Planilha eletrônica.

ABSTRACT

This work presents the development of an electronic spreadsheet for the flexural design of timber beams with simple and built-up cross-sections connected by nails, according to the criteria established by ABNT NBR 7190:2022. The tool contemplates simple beams, built-up beams composed of two members, and built-up beams composed of three members, considering the partial interaction between the elements through semi-rigid connections. The calculation procedure includes the determination of design resistances, normal and shear stresses, internal forces acting on the connectors, and the verification of instantaneous and final deflections. The validation of the tool was carried out through the comparison between analytically obtained results and those automatically generated by the spreadsheet, showing a high agreement between the methods, which confirms the consistency and reliability of the developed model.

Keywords: Timber structures. Built-up beams. Nailed connections. Flexural design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de casas de madeira pré-moldadas.....	9
Figura 2 - Estrutura de madeira de seção composta unidas por pinos metálicos.....	20
Figura 3 - Disposição de seção transversal composta justaposta e distribuição de tensões utilizada pela NBR7190:2022.	21
Figura 4 - Ilustração do de falha Ia	25
Figura 5 - Ilustração do de falha Ib	26
Figura 6 - Ilustração do de falha Ic.....	26
Figura 7 - Ilustração do de falha IIa.....	26
Figura 8 - Ilustração do de falha IIb.....	27
Figura 9 - Ilustração do de falha III	27
Figura 10 - Procedimento para desbloqueio de macros no sistema operacional Windows	29
Figura 11 - Ativação das macros no Microsoft Excel.....	29
Figura 12 - Interface da planilha desenvolvida para a seleção do tipo de estrutura.....	30
Figura 13 - Interface da planilha desenvolvida para o preenchimento dos dados iniciais do dimensionamento.....	31
Figura 14 - Interface da planilha desenvolvida para o preenchimento dos dados de entrada da estrutura simples	31
Figura 15 - Interface da planilha desenvolvida para o preenchimento dos dados de entrada da estrutura composta por duas peças	32
Figura 16 - Ilustração de uma viga de madeira de seção composta justaposta com duas peças (tipo “T”) e, ao lado, o mecanismo de ligação, o prego.	32
Figura 17 - Interface da planilha desenvolvida para o preenchimento dos dados de entrada da estrutura composta por três peças	33
Figura 18 - Ilustração de uma viga de madeira de seção composta justaposta com três peças (tipo “T”) e, ao lado, o mecanismo de ligação, o prego.	33
Figura 19 - Interface da planilha desenvolvida para a exibição dos resultados do dimensionamento da estrutura.....	34
Figura 20 - Interface da planilha demonstrando a exclusão automática dos dados referentes ao pino de ligação.....	34

Figura 21 - Interface da planilha demonstrando a exclusão automática dos dados referentes ao pino de ligação e à seleção da madeira.....	35
Figura 22 - Interface da planilha demonstrando os dados de entrada empregados no comparativo dos resultados obtidos para a estrutura simples.....	37
Figura 23 - Interface da planilha demonstrando os dados de entrada empregados no comparativo dos resultados obtidos para a estrutura composta por 2 peças.....	42
Figura 24 - Interface da planilha demonstrando os dados de entrada empregados no comparativo dos resultados obtidos para a estrutura composta por 3 peças.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos	13
Tabela 2 - Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais.....	13
Tabela 3 - Definição de classes de carregamento e valores de K_{mod1}	14
Tabela 4 - Definição de classes de carregamento e valores de K_{mod2}	15
Tabela 5 - Ações permanentes diretas consideradas separadamente.	16
Tabela 6 - Ações permanentes diretas agrupadas.	16
Tabela 7 - Ações variáveis consideradas separadamente.....	17
Tabela 8 - Ações variáveis consideradas conjuntamente ^a	17
Tabela 9 - Valores dos fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para as ações variáveis.....	18
Tabela 10 - Materiais usados em pinos.....	24
Tabela 11 - Coeficiente de fluência (ϕ).....	28
Tabela 12 - Valores-limite de deslocamentos para elementos correntes fletidos.	28
Tabela 13 - Comparação entre os resultados obtidos manualmente e os gerados pela planilha automatizada para estrutura simples, conforme as fórmulas normativas da NBR 7190-1.....	40
Tabela 14 - Comparação entre os resultados obtidos manualmente e os gerados pela planilha automatizada para estrutura composta por 2 peças, conforme as fórmulas normativas da NBR 7190-1.....	49
Tabela 15 - Comparação entre os resultados obtidos manualmente e os gerados pela planilha automatizada para estrutura composta por 3 peças, conforme as fórmulas normativas da NBR 7190-1.....	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. METODOLOGIA	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1. Resistência de Cálculo.....	12
3.2. Carga de Cálculo	15
3.3. Vigas de seção simples: tensões normais e tensões de cisalhamento	18
3.4. Vigas de seção composta justaposta.....	19
3.5. Ligações pregadas.....	23
3.6. Flechas	27
4. Dimensionamento Automático via Planilha Eletrônica	29
4.1. Acesso à planilha e macros no Microsoft Excel	29
4.2. Inserção de dados nas células	29
4.3. Células interativas	30
4.4. Seleção do tipo de estrutura e preenchimento dos dados comum a todos os tipos de estrutura	30
4.5. Preenchimento dos dados para Seção simples	31
4.6. Preenchimento dos dados para estrutura composta por duas peças	31
4.7. Preenchimento dos dados para estrutura composta por três peças.....	32
4.8. Processamento dos dados.....	33
4.9. Redefinição dos dados de entrada.....	34
5. MODELOS DE APLICAÇÃO.....	35
5.1. Dados de entrada e comparativo dos resultados para estrutura simples	35
5.2. Dados de entrada e comparativo dos resultados para estrutura composta por 2 peças	40
5.3. Dados de entrada e comparativo dos resultados para estrutura composta por 3 peças	50
6. CONCLUSÃO	54
7. REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

A madeira teve papel importante na história da construção civil brasileira, sendo amplamente utilizada em cidades inteiras, como Londrina (PR) na década de 1930 (STANT, s.d.), devido à rapidez e praticidade de execução das obras. Com o tempo, a alvenaria ganhou espaço e a madeira acabou sendo deixada em segundo plano como material estrutural. Atualmente, apesar de ainda existirem crenças negativas e a escassez de profissionais especializados, o uso da madeira vem retomando destaque no setor. De acordo com Shigue (2018), os avanços tecnológicos e o processo de industrialização estão impulsionando o debate sobre o uso da madeira na construção civil, o que pode ser notado com o número crescente, embora ainda muito pequeno, de empresas que vêm atuando especificamente na área de produção de casas de madeira pré-moldadas, como as apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Exemplos de casas de madeira pré-moldadas



Fonte: STANT (s.d.).

O uso da madeira na construção civil apresenta diversos benefícios, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Por ser um material leve, de fácil manuseio e disponível em grande quantidade no Brasil, ela possibilita rapidez na execução das obras e redução significativa de custos (STANT, s.d.). As construções em madeira geram menos resíduos, principalmente orgânicos, quando comparadas às de alvenaria, contribuindo para um canteiro mais limpo e sustentável (STANT, s.d.). Além disso, a madeira possui propriedades isolantes que ajudam a manter o conforto térmico dos ambientes, tornando-os agradáveis em diferentes estações do ano. Sua versatilidade arquitetônica também permite a criação de projetos esteticamente diferenciados, com grande liberdade de formas e acabamentos. Quando proveniente de manejo sustentável, a

madeira se destaca ainda pelo menor impacto ambiental e pela baixa emissão de poluentes durante seu ciclo de vida. Adicionalmente, a madeira apresenta elevada relação resistência/peso específico, sendo um material estruturalmente eficiente, além de demandar menor consumo energético para a produção de 1 m³ quando comparada a materiais como o concreto e o aço (PFEIL, 2003). Estruturas de madeira também possuem excelente resistência ao fogo, devido à formação de uma camada superficial carbonizada que reduz a propagação do calor e preserva parcialmente a capacidade resistente do elemento estrutural (ARCHDAILY, 2020).

Entretanto, o material também apresenta algumas limitações. Entre elas, destacam-se a necessidade de manutenção periódica, especialmente com aplicação de verniz protetor, e a vulnerabilidade a insetos como cupins, exigindo cuidados específicos. A madeira também é sensível à umidade e pode apresentar deformações lentas ao longo do tempo (*creep*). Outro ponto é a menor resistência a desastres naturais, como enchentes e deslizamentos, em comparação a estruturas de concreto. Com o tempo, a madeira também pode apresentar ruídos naturais, embora geralmente discretos e ocasionais. De modo geral, quando utilizada de forma adequada e com manutenção correta, a madeira se mostra uma excelente alternativa construtiva, unindo eficiência, economia e sustentabilidade.

No âmbito estrutural, a madeira é empregada a partir de bitolas previamente definidas, ainda que apresente variações dimensionais conforme a espécie e a aplicação. De modo geral, as vigas de madeira utilizam seções simples, suficientes para solicitações usuais; entretanto, quando há necessidade de maior resistência ou rigidez, podem ser adotadas seções de maiores dimensões ou soluções estruturais específicas, de acordo com as exigências do projeto.

Para a construção de grandes estruturas e para o aumento da rigidez e desempenho estrutural, é comum o uso de vigas de seção composta. Essas vigas são elementos estruturais formados pela união de duas ou mais peças de madeira, que passam a atuar de forma conjunta. Essa associação aumenta o momento de inércia e a área da seção transversal e, conseqüentemente, a capacidade de resistir a esforços de flexão e deformações. O uso desse tipo de viga é indicado quando se busca maior rigidez e desempenho estrutural sem a necessidade de empregar peças únicas de grandes dimensões, que são mais difíceis de encontrar e de transportar. Além disso, as vigas compostas permitem melhor aproveitamento do material e podem ser executadas com técnicas simples de ligação, como parafusos, pregos ou chapas metálicas (Góes e Dias, 2003). Dessa forma, o emprego de vigas de seção composta representa uma solução eficiente, especialmente em projetos que exigem maior capacidade de carga e/ou menores deformações.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta automatizada, utilizando uma planilha eletrônica, para o dimensionamento de estruturas de

madeira com seções simples e compostas (formadas por duas e três peças), conforme as diretrizes estabelecidas na norma NBR 7190:2022 – Projeto de Estruturas de Madeira. A proposta busca facilitar e agilizar o processo de cálculo estrutural, tornando-o mais acessível a docentes, discentes e profissionais da área da engenharia civil. Por meio da inserção de dados de entrada, a planilha é capaz de realizar, automaticamente, os cálculos necessários, fornecendo as forças resistentes exigidas para o dimensionamento tanto da madeira quanto dos elementos de ligação, os pregos. Dessa forma, o trabalho visa contribuir para o aprimoramento das práticas de ensino e projeto de estruturas de madeira, promovendo maior eficiência, precisão e padronização nos cálculos, em conformidade com a norma técnica vigente.

2. METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza quantitativa e abordagem computacional, voltada ao desenvolvimento de uma ferramenta automatizada para o dimensionamento de vigas de madeira com seção transversal simples e composta justaposta, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022.

A metodologia adotada foi dividida em quatro etapas principais: levantamento bibliográfico e normativo, formulação do modelo de cálculo, desenvolvimento da planilha eletrônica e validação dos resultados.

Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica acerca do comportamento estrutural de vigas de madeira, das propriedades mecânicas do material, dos critérios de dimensionamento e das ligações pregadas em estruturas de madeira. Paralelamente, foram analisadas as prescrições normativas contidas na ABNT NBR 7190:2022, referentes ao dimensionamento de elementos submetidos à flexão, verificação de tensões normais e cisalhantes, rigidez efetiva de vigas compostas, deslocamentos e dimensionamento de ligações metálicas.

Na segunda etapa, foram definidas e organizadas as equações necessárias para o dimensionamento estrutural das vigas de madeira, contemplando estruturas de seção simples, composta por duas peças e composta por três peças. As formulações envolveram o cálculo das resistências de cálculo, esforços solicitantes, tensões atuantes, rigidez efetiva, forças nos conectores metálicos e verificação dos estados limites de serviço.

Posteriormente, foi desenvolvida uma planilha eletrônica no Microsoft Excel com utilização de fórmulas automatizadas e recursos de programação em VBA (Visual Basic for Applications), permitindo a inserção de dados de entrada pelo usuário e o processamento automático dos resultados. A ferramenta foi estruturada de forma interativa, contendo células

condicionais, menus suspensos, automação de cálculos e mecanismos de verificação visual dos resultados obtidos.

Por fim, realizou-se a validação da ferramenta desenvolvida por meio da comparação entre os resultados gerados automaticamente pela planilha e os resultados obtidos analiticamente a partir das equações previstas na ABNT NBR 7190:2022. Foram analisados diferentes tipos de seção transversal, incluindo vigas simples e vigas compostas justapostas com duas e três peças, permitindo verificar a consistência e a confiabilidade do modelo implementado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Resistência de Cálculo

A NBR 7190:2022 classifica as madeiras estruturais em classes de resistência que indicam suas propriedades mecânicas, considerando um teor de umidade de 12%. Essas classes, designadas por D20, D30, D40, D50 e D60 para madeiras de floresta nativa, referem-se às classes de resistência das madeiras folhosas, chamadas dicotiledôneas. O número associado à classe corresponde ao valor característico da resistência à compressão paralela às fibras $f_{c0,k}$ expresso em megapascal (MPa), em que o índice “c” indica compressão, o subscrito “0” refere-se à direção paralela às fibras e o sufixo “k” indica que se trata de um valor característico, conforme definição da ABNT NBR 7190:2022.

Além da resistência à compressão, a ABNT NBR 7190:2022 fornece os valores característicos da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, representada por $f_{v0,k}$, em que o índice “v” indica cisalhamento, o subscrito “0” refere-se à direção paralela às fibras e o sufixo “k” denota valor característico. A norma também estabelece o módulo de elasticidade médio na direção paralela às fibras, indicado por $E_{c0,med}$, no qual o índice “c” refere-se à solicitação de compressão, o subscrito “0” indica a direção paralela às fibras e o sufixo “med” representa valor médio. Esses parâmetros, juntamente com a densidade aparente da madeira referida ao teor de umidade de 12%, são utilizados como base para o dimensionamento estrutural. A referida norma também apresenta outros valores relacionados a outros tipos de madeira, como as coníferas (madeiras macias).

Esses parâmetros são fundamentais para o dimensionamento estrutural, pois permitem que projetistas e ferramentas de cálculo — como a planilha automatizada desenvolvida neste trabalho — selecionem as propriedades da madeira de acordo com a classe adequada. Assim, é possível garantir segurança e desempenho satisfatório nas análises de tensões e deformações.

A Tabela 1 apresenta as classes de resistência aplicáveis às madeiras do grupo das folhosas, conforme classificação adotada pela ABNT NBR 7190:2022. Para madeiras do grupo das coníferas, a norma estabelece classes de resistência específicas as quais devem ser empregadas quando o material estrutural pertencer a esse grupo, conforme a tabela 2.

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

Classes	f_{c0k} MPa	$f_{v0,k}$ MPa	$E_{c0,med}$ MPa	Densidade a 12 % kg/m ³
D20	20	4	10 000	500
D30	30	5	12 000	625
D40	40	6	14 500	750
D50	50	7	16 500	850
D60	60	8	19 500	1 000

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

Os valores apresentados correspondem a propriedades características obtidas a partir de ensaios realizados em corpos de prova isentos de defeitos, conforme os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 7190-3:2022. Todas as propriedades são referidas a um teor de umidade da madeira igual a 12%.

De acordo com a ABNT NBR 7190-1:2022, as propriedades de resistência e rigidez da madeira devem ser corrigidas em função do teor de umidade. Para madeiras com umidade entre 10 % e 25 %, os valores obtidos experimentalmente são ajustados para a condição padrão de 12 % de umidade, permitindo maior uniformidade na caracterização do material.

Tabela 2 - Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais

		Coníferas										Folhosas									
	Símbolo	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência MPa																					
Flexão	fb,k	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	ft,0,k	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	ft,90,k	0,4	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	fc,0,k	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	fc,90,k	2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	fv,k	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	4	3,4	4	4	4	4	4	4,5	5
Propriedades de rigidez GPa																					
Módulo de elasticidade a 0º médio	E0,m	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade a 0º característico	E0,05	4,7	5,4	6	6,4	6,7	7,4	7,7	8	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8
Módulo de elasticidade a 90º médio	E90,m	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33
Módulo de elasticidade transversal médio	Gm	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25
Densidade kg/m³																					
Densidade característica	pk	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900
Densidade média	pm	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
Nota 1	Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.																				
Nota 2	Valores referentes ao teor de umidade igual a 12%.																				

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

As classes de resistência fornecem, portanto, os valores característicos das propriedades mecânicas da madeira, que servem de base para o dimensionamento estrutural. Entretanto, esses valores precisam ser ajustados conforme as condições reais de uso da estrutura, uma vez que fatores como duração acumulada da variável principal da combinação considerada e umidade do ambiente influenciam significativamente o comportamento do material.

Para considerar essas variações, a NBR 7190:2022 define os coeficientes de modificação K_{mod} , que alteram os valores característicos das propriedades de resistência da madeira em função da classe de carregamento da estrutura e da classe de umidade admitida. A partir desses ajustes, obtêm-se os valores de resistência de cálculo, os quais são utilizados diretamente no dimensionamento estrutural.

O coeficiente global é obtido pelo produto entre os fatores parciais K_{mod1} e K_{mod2} , conforme a expressão:

$$K_{mod} = K_{mod1} \cdot K_{mod2} \quad \text{Equação 1}$$

A seguir, apresentam-se as Tabelas 3 e 4 com os valores correspondentes a K_{mod1} e K_{mod2} , respectivamente, conforme estabelecido na norma.

Tabela 3 - Definição de classes de carregamento e valores de K_{mod1}

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação		Tipos de madeira	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
Permanente	Permanente	Mais de dez anos	0,60	0,30
Longa duração	Longa duração	Seis meses a dez anos	0,70	0,45
Média duração	Média duração	uma semana a seis meses	0,80	0,65
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana	0,90	0,90
Instantânea	Instantânea	Muito curta	1,10	1,10

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

Tabela 4 - Definição de classes de carregamento e valores de K_{mod2}

Classes de umidade	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
1	1,00	1,00
2	0,90	0,95
3	0,80	0,93
4	0,7 ^a	0,90
^a Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4).		

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

Assim, a resistência de cálculo da madeira é determinada a partir do valor característico da propriedade considerada, multiplicado pelos coeficientes de modificação e dividido pelo coeficiente parcial de segurança do material, conforme as expressões a seguir:

$$f_{c0,d} = \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w} \cdot K_{mod1} \cdot K_{mod} \quad \text{Equação 2}$$

$$f_{v0,d} = \frac{f_{v0,k}}{\gamma_w} \cdot K_{mod1} \cdot K_{mod2} \quad \text{Equação 3}$$

em que $f_{c0,d}$ e $f_{v0,d}$ representam, respectivamente, as resistências de cálculo à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras; $f_{c0,k}$ e $f_{v0,k}$ são os correspondentes valores característicos; e o γ_w é o coeficiente de minoração da resistência do material.

Para os estados-limite últimos decorrentes de tensões normais, adota-se o valor básico do coeficiente de minoração $\gamma_w = 1,4$. Já para os estados-limite últimos decorrentes de tensões de cisalhamento, utiliza-se o valor básico $\gamma_w = 1,8$.

3.2. Carga de Cálculo

A carga de cálculo representa a combinação das ações que atuam na estrutura e é utilizada para a determinação dos esforços solicitantes de dimensionamento. Conforme a ABNT NBR 8681:2025, as ações consideradas no projeto estrutural são classificadas em ações permanentes e ações variáveis, incluindo, entre estas últimas, cargas de utilização, vento, temperatura e outras ações acidentais. A definição dos coeficientes associados a essas ações é apresentada a seguir.

As ações permanentes correspondem às solicitações que atuam continuamente sobre a estrutura ao longo de sua vida útil, como o peso próprio dos elementos estruturais, dos componentes construtivos e dos equipamentos fixos. A ABNT NBR 8681:2025 estabelece coeficientes de ponderação distintos para essas ações, considerando os efeitos favoráveis e desfavoráveis e o tipo de combinação adotada, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Ações permanentes diretas consideradas separadamente.

Combinação	Tipo de ação	Efeito desfavorável	Efeito favorável
Normal	Peso próprio de estruturas de aço e equipamentos	1,25	1,00
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas, de madeira e elementos construtivos industrializados ^a	1,30	1,00
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,35	1,00
	Elementos construtivos industrializados com adições in loco ^b	1,40	1,00
	Elementos construtivos em geral ^c	1,50	1,00
Especial ou de construção	Peso próprio de estruturas de aço e equipamentos	1,15	1,00
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas, de madeira e elementos construtivos industrializados ^a	1,20	1,00
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,25	1,00
	Elementos construtivos industrializados com adições in loco ^b	1,30	1,00
	Elementos construtivos em geral ^c	1,40	1,00
Excepcional	Peso próprio de estruturas de aço e equipamentos	1,10	1,00
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas, de madeira e elementos construtivos industrializados ^a	1,15	1,00
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,15	1,00
	Elementos construtivos industrializados com adições in loco ^b	1,20	1,00
	Elementos construtivos em geral ^c	1,30	1,00

^a Por exemplo, paredes e fachadas pré-moldadas e gesso acartonado.
^b Por exemplo, lajes com vigotas protendidas com adição de capeamento de concreto.
^c Por exemplo, paredes de alvenaria, seus revestimentos e contrapiso.

Fonte: ABNT NBR 8681:2025.

A norma permite que as ações permanentes sejam consideradas de forma separada ou agrupada, a depender do nível de detalhamento requerido na análise estrutural. No presente trabalho, visando a avaliação global do comportamento estrutural e a simplificação do procedimento de dimensionamento, adota-se a consideração das ações permanentes de forma conjunta. Dessa forma, utilizam-se os coeficientes de ponderação aplicáveis às ações permanentes diretas agrupadas, conforme indicado na Tabela 6.

Tabela 6 - Ações permanentes diretas agrupadas.

Combinação	Efeito	
	Desfavorável	Favorável
Normal	1,35	1,00
Especial ou de construção	1,25	1,00
Excepcional	1,15	1,00

Fonte: ABNT NBR 8681:2025.

De acordo com Martino (2023), as ações variáveis estão associadas ao uso da edificação, ao fluxo de pessoas e à atuação de agentes naturais, como o vento e a temperatura, caracterizando-se por apresentarem variações significativas ao longo do tempo de vida útil da estrutura. As ações variáveis, por sua vez, são aquelas cuja intensidade ou presença pode variar significativamente ao longo do tempo, incluindo as cargas de utilização, os efeitos do vento, as variações de temperatura e demais ações transitórias. Para essas ações, a ABNT NBR 8681:2025 também define coeficientes de ponderação distintos em função do tipo de combinação considerada.

Embora a norma apresente coeficientes específicos para a consideração individual das ações variáveis, conforme indicado na Tabela 7, neste trabalho adota-se o critério de consideração conjunta dessas ações. Nesse caso, aplica-se um único coeficiente de ponderação às ações variáveis

envolvidas, conforme estabelecido na Tabela 8, garantindo uma abordagem compatível com o modelo global de análise estrutural adotado.

Tabela 7 - Ações variáveis consideradas separadamente.

Combinação	Tipo de ação	Coefficiente de ponderação
Normal	Ações truncadas ^a	1,20
	Efeitos de temperatura devidos à variação térmica da atmosfera	1,20
	Ação do vento	1,40
	Demais ações e efeitos de temperatura gerados por equipamentos	1,50
Especial ou de construção	Ações truncadas ^a	1,10
	Efeitos de temperatura devidos à variação térmica da atmosfera	1,00
	Ação do vento	1,20
	Demais ações e efeitos de temperatura gerados por equipamentos	1,30
Excepcional	Ações e efeitos em geral	1,00

^a Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado na Tabela 6 se aplica a esse valor limite.

Fonte: ABNT NBR 8681:2025.

Tabela 8 - Ações variáveis consideradas conjuntamente ^a.

Combinação	Coefficiente de ponderação
Normal	1,50
Especial ou de construção	1,30
Excepcional	1,00

^a Quando as ações variáveis forem consideradas conjuntamente, o coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a todas as ações, devendo ser consideradas também conjuntamente as ações permanentes diretas. Nesse caso, permite-se considerar separadamente as ações indiretas como recalques de apoio e retração dos materiais e o efeito de temperatura.

Fonte: ABNT NBR 8681:2025.

Além dos coeficientes de ponderação, a ABNT NBR 8681:2025 estabelece fatores de combinação e de redução, representados por ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 , aplicáveis às ações variáveis, como visto na Tabela 9. Esses fatores têm por objetivo considerar a baixa probabilidade de ocorrência simultânea dos valores máximos das ações variáveis, sendo definidos em função do tipo de ação e da situação de projeto.

Tabela 9 - Valores dos fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para as ações variáveis.

Ações	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Cargas de utilização de edifícios			
Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^a	0,5	0,4	0,3
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,7	0,6	0,4
Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas, garagens e coberturas	0,8	0,7	0,6
Vento			
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0,0
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	1,0	1,0	0,6
Vigas de rolamentos de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
^a Edificações residenciais, de acesso restrito.			
^b Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.			
^c Para combinações excepcionais em que a ação transitória excepcional seja o fogo, o fator de redução ψ_2 pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7.			
^d No caso de silos e reservatórios, os fatores de combinação e redução devem ser considerados iguais a 1,0.			

Fonte: ABNT NBR 8681:2025.

A partir da aplicação da equação de combinação de ações definida pela ABNT NBR 8681:2025, utilizando os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação apresentados, é possível determinar os valores de cálculo dos esforços solicitantes, tais como o momento fletor e o esforço cortante, que serão empregados nas verificações de dimensionamento estrutural.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \gamma_{qj} \cdot \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k} \quad \text{Equação 4}$$

Em que F_d corresponde às combinações últimas normais; $F_{Gi,k}$ representa o valor característico das ações permanentes, diretas e indiretas; $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada principal na combinação; $\psi_{0j} \cdot F_{Qj,k}$ representa os valores reduzidos de combinação das demais ações variáveis; γ_{gi} corresponde aos coeficientes de ponderação das ações permanentes; e γ_{qi} refere-se aos coeficientes de ponderação das ações variáveis.

3.3. Vigas de seção simples: tensões normais e tensões de cisalhamento

As vigas de seção simples são elementos estruturais formados por uma única peça de madeira, responsável por resistir aos esforços de flexão, cisalhamento e normal. O comportamento dessas vigas está diretamente relacionado às propriedades de área, físicas e mecânicas da madeira, como módulo de elasticidade, resistência e densidade.

O dimensionamento de vigas simples segue indicação da NBR 7190:2022, que estabelece os critérios para verificação das tensões e deformações, garantindo segurança e desempenho adequado da estrutura.

Inicialmente, avaliam-se as tensões máximas atuantes $\sigma_{m\acute{a}x}$ na viga de seção simples. Ela ocorre na extremidade da seção transversal e é determinada por

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_d}{W} \quad \text{Equação 5}$$

em que M_d é o momento fletor atuante de cálculo, W é o módulo de resistência da seção transversal à direção paralela às fibras, em relação ao eixo central de inércia perpendicular ao plano de ação do momento fletor.

A condição de segurança é atendida quando $\sigma_{m\acute{a}x}$ é inferior à resistência de cálculo à compressão paralela às fibras da madeira, $f_{c0,d}$.

A verificação da tensão cisalhante é realizada conforme a ABNT NBR 7190:2022. Para vigas de seção retangular, a tensão cisalhante de cálculo é dada por

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V_d}{A} \quad \text{Equação 6}$$

onde V_d é a força cortante de cálculo e A a área da seção transversal. A condição de segurança é atendida quando τ_d é inferior à resistência de cálculo ao cisalhamento paralela às fibras da madeira, $f_{v0,d}$.

3.4. Vigas de seção composta justaposta

As vigas de seção composta justaposta são formadas pela união de duas ou mais peças de madeira que trabalham de forma parcialmente solidária na resistência aos esforços, como apresentado na Figura 2. Essa associação tem como principal objetivo aumentar o momento de inércia e a área da seção transversal, proporcionando maior rigidez e capacidade resistente sem a necessidade de empregar peças únicas de grandes dimensões.

Figura 2 - Estrutura de madeira de seção composta unidas por pinos metálicos.



Fonte: Maia e Góes (2017).

O comportamento estrutural desse tipo de viga depende da eficiência das ligações entre os elementos, geralmente realizadas por conectores metálicos, como pregos. A rigidez dessas conexões influencia diretamente nas tensões normal e cisalhante atuantes. Neste sentido, a NBR 7190:2022 baseia-se na determinação da rigidez efetiva, produto do módulo de elasticidade e do momento de inércia, onde se considera que a ligação entre as peças é do tipo semirrígida, onde os conectores (pregos, por exemplo) apresentam deformação por flexão quando do deslizamento entre as peças.

No dimensionamento das vigas de seção composta, o objetivo principal é a determinação das tensões normais máximas, das tensões cisalhantes máximas e das forças solicitantes nos conectores, grandezas estas diretamente influenciadas pela rigidez efetiva da seção. A tensão normal máxima atuante na extremidade do elemento i , resultante da ação do momento fletor de cálculo M_d , pode ser obtida pela superposição da tensão normal no centroide do elemento (σ_i) com a parcela de flexão na extremidade da peça (σ_m), para cada peça que compõe a seção, conforme abaixo:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_i + \sigma_{m,i} \quad \text{Equação 7}$$

A tensão normal no centroide do elemento i , considerando a interação parcial entre as peças, é expressa por:

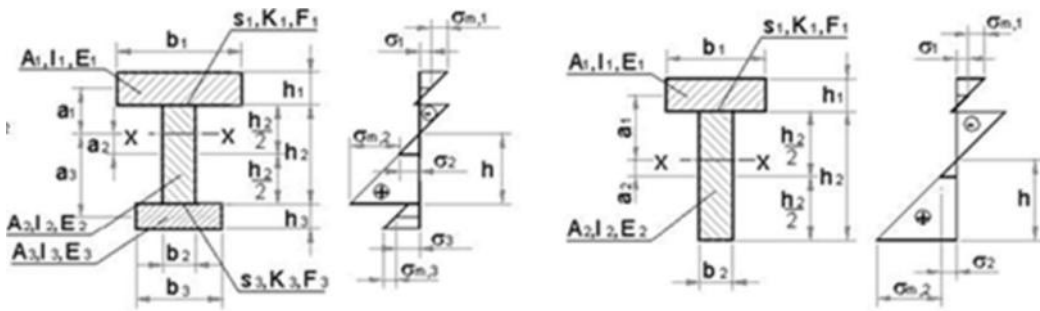
$$\sigma_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot \frac{M_d}{(EI)_{ef}} \quad \text{Equação 8}$$

Enquanto a parcela da tensão normal associada à flexão própria do elemento i , avaliada na extremidade da peça, é dada por:

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot \frac{M_d}{(EI)_{ef}} \quad \text{Equação 9}$$

Nessas expressões, E_i representa o módulo de elasticidade do elemento i , a_i é a distância entre o centroide da área do elemento e a linha neutra da seção composta, e $(EI)_{ef}$ corresponde à rigidez efetiva à flexão da viga. O índice i refere-se ao elemento constituinte da seção composta, podendo assumir valores até 3 (três), sendo 1 a peça do topo, 3 a peça da base e 2 a peça central, conforme a ABNT NBR 7190:2022, de acordo com a configuração geométrica apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Disposição de seção transversal composta justaposta e distribuição de tensões utilizada pela NBR7190:2022.



Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

A tensão cisalhante máxima na viga de seção composta ocorre, em geral, na peça central (2) onde a tensão normal é nula. Para o elemento central da seção composta, a tensão cisalhante máxima pode ser determinada por:

$$\tau_{2,máx} = (\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h^2) \cdot \frac{V_d}{b_2 \cdot (EI)_{ef}} \quad \text{Equação 10}$$

Em que V_d é a força cortante máxima de cálculo atuante na viga, e b_2 e h são, respectivamente, a largura e a distância entre a linha neutra e a extremidade da seção, conforme a figura 3.

As forças solicitantes nos conectores metálicos são responsáveis pela transferência de esforços entre os elementos da seção composta. Para a interface entre o elemento i (superior ou inferior) e o elemento central, a força atuante no conector é determinada por:

$$F_i = \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i \cdot s_i \cdot \frac{V_d}{(EI)_{ef}}, \text{ para } i = 1 \text{ e } 3 \quad \text{Equação 11}$$

Nessa equação, s_i corresponde ao espaçamento entre os conectores ao longo da viga. Observa-se que o aumento desse espaçamento implica elevação das forças solicitantes em cada elemento de ligação, o que reforça a necessidade de uma definição criteriosa do tipo e do arranjo dos conectores, a fim de assegurar o comportamento solidário da seção composta. Conforme recomenda a ABNT NBR 7190:2022, o espaçamento entre conectores pode ser uniforme ou

variável em função do esforço cortante atuante, devendo respeitar limites mínimo e máximo, usualmente definidos entre sete vezes o diâmetro do conector e até quatro vezes esse valor mínimo. Ressalta-se ainda que a redução do espaçamento contribui para o aumento da rigidez efetiva da ligação, refletindo diretamente no desempenho estrutural do conjunto. Conforme a ABNT NBR 7190:2022, pode-se ainda empregar um espaçamento efetivo equivalente, conforme expressão normativa específica:

$$S_{ef} = 0,75 \cdot s_{min} + 0,25 \cdot s_{max} \quad \text{Equação 12}$$

As expressões anteriores dependem da rigidez efetiva à flexão da seção composta, definida, para vigas de seção composta justaposta, por:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad \text{Equação 13}$$

Em que I_i é o momento de inércia do elemento ($I_i = b_i \cdot h_i^3 / 12$). As distâncias entre os centroides e a linha neutra a_i são dadas por:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{2 \cdot \sum_{i=1}^3 (\gamma_i \cdot E_i \cdot A_i)} \quad \text{Equação 14}$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) - a_2 \quad \text{Equação 15}$$

$$a_3 = \left(\frac{h_2 + h_3}{2} \right) + a_2 \quad \text{Equação 16}$$

O fator de redução da inércia γ_i é determinado em função da rigidez da ligação mecânica, do espaçamento entre conectores e do vão efetivo da viga, conforme:

$$\gamma_i = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{K_i \cdot L_{ef}^2} \right]} \text{ para } i = 1 \text{ e } 3 \quad \gamma_2 = 1 \quad \text{Equação 17}$$

Em que E_i representa o módulo de elasticidade do elemento i da seção transversal, A_i corresponde à área associada a esse elemento, e s_i é o espaçamento dos pregadores na interface entre os elementos conectados. O parâmetro K_i refere-se ao módulo de deslizamento da ligação entre os elementos, enquanto L_{ef} indica o vão efetivo da viga, adotado conforme o esquema estrutural: igual ao vão total para vigas biapoimadas, equivalente a $0,8L$ em vigas contínuas e igual a $2L$ no caso de vigas em balanço.

O módulo de deslizamento K_u , quando se encontra em ELU, é calculado a partir de 2/3 do K_{ser} , que, por sua vez, é determinado por meio da seguinte equação:

$$K_{ser} = \rho_{med}^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \quad \text{Equação 18}$$

Em que ρ_{med} é a densidade específica média em kg/m³; d é o diâmetro efetivo do Pregos instalados com pré-furação e parafusos de rosca soberba (ponta cônica), expresso em milímetros (mm); K_{ser} é a rigidez de serviço de uma seção de corte de um pino metálico, expresso em Newton por milímetros (N/mm) e K_u é a rigidez última de uma seção de corte de um pino metálico, expresso em Newton por milímetros (N/mm).

3.5. Ligações pregadas

As ligações são elementos fundamentais nas estruturas de madeira, pois garantem a transmissão dos esforços entre as peças estruturais, influenciando diretamente a rigidez, a resistência e a estabilidade global do conjunto. Entre os diferentes tipos de ligação utilizados, destacam-se as ligações pregadas, que são amplamente empregadas por apresentarem fácil execução, baixo custo e bom desempenho mecânico.

De acordo com a NBR 7190-1:2022, o comportamento das ligações pregadas depende de diversos parâmetros, como o diâmetro do prego, o tipo de madeira, a espessura das peças ligadas, a direção das fibras, e o número de elementos de fixação. Esses fatores influenciam diretamente a resistência da ligação, que é determinada a partir da força característica de um pino e da resistência característica da madeira.

Com base na NBR 7190:2022, apresenta-se a seguir o procedimento de dimensionamento das ligações pregadas para uma seção transversal de corte simples. A verificação da ligação pregada é realizada a partir da determinação da resistência de cálculo da ligação, a qual deve ser comparada com a força cisalhante de corte solicitante atuante na interface entre os elementos estruturais conectados. O dimensionamento é considerado satisfatório quando a resistência de cálculo da ligação é superior ou igual à força atuante no conector F_i , calculado no tópico anterior.

A resistência de cálculo da ligação é obtida a partir da resistência característica da ligação, conforme a expressão:

$$R_d = K_{mod1} \cdot K_{mod2} \cdot \frac{R_k}{\gamma_{lig}} \quad \text{Equação 19}$$

Em que K_{mod1} e K_{mod2} são os coeficientes de modificação, R_k é a resistência característica da ligação e γ_{lig} é o coeficiente de ponderação da resistência da ligação.

A resistência característica da ligação é determinada pelo produto entre a resistência característica de um pino metálico, o número de seções de corte por pino e o número efetivo de pinos na ligação, conforme:

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} \quad \text{Equação 20}$$

sendo $F_{v,Rk}$ a resistência característica ao cisalhamento de um único pino metálico, n_{sp} o número de seções de corte e n_{ef} o número efetivo de pinos atuantes na ligação.

A resistência característica de um pino metálico ao cisalhamento é obtida a partir da análise dos possíveis modos de falha da ligação. Para isso, é inicialmente necessário determinar o momento resistente característico do pino metálico, dado por:

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad \text{Equação 21}$$

em que $f_{u,k}$ é a resistência última característica à tração do aço do pino metálico, expressa em MPa, encontrada a partir da Tabela 10, e d é o diâmetro nominal do pino, expresso em milímetros.

Tabela 10 - Materiais usados em pinos.

ESPECIFICAÇÃO DO PINO	CLASSIFICAÇÃO	f_y, k MPa	f_u, k MPa	Diâmetro nominal mínimo
Prego liso com cabeça padrão ABNT NBR 6627	ABNT NBR 5589	-	635	$3,00 \geq \text{mm } d \geq 3,54 \text{ mm}$
		-	600	$3,55 \geq \text{mm } d \geq 4,99 \text{ mm}$
		-	490	$5,00 \geq \text{mm } d \geq 10,00 \text{ mm}$
Parafuso passante padrão ASTM	A307	250	415	$d \geq 3/8 \text{ pol ou } d \geq 10 \text{ mm}$
	A325	635	825	
	A490	895	1035	
Parafuso passante padrão ISSO 898-1	Classe 4.6	235	400	$d \geq 10 \text{ mm}$
	Classe 8.8	640	800	
	Classe 10.9	900	1000	
Parafuso de rosca soberba		250	415	$d \geq 3/8 \text{ pol ou } d \geq 9,5 \text{ mm}$

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

Define-se o comprimento de penetração do pino em cada elemento de madeira. Considerando o comprimento total do prego h , o comprimento de penetração na peça principal t_1 é igual à sua espessura, enquanto o comprimento de penetração na peça secundária t_2 é dado pela diferença entre o comprimento total do prego e a espessura da peça principal, respeitando-se o comprimento mínimo de penetração estabelecido pela norma, que é de 12 vezes o diâmetro.

Com base na densidade característica da madeira, calcula-se a resistência de embutimento característica de cada elemento, expressa por:

$$f_{ei,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \frac{\rho_k}{1,2} \quad \text{Equação 22}$$

Em que ρ_k é a densidade característica da madeira do elemento considerado. A partir das resistências de embutimento das peças conectadas, define-se o parâmetro adimensional β , correspondente à razão entre as resistências de embutimento das duas peças, conforme a seguir:

$$\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{e1,k}} \quad \text{Equação 23}$$

Com os valores do momento resistente do pino, das resistências de embutimento, dos comprimentos de penetração e do parâmetro β , são avaliados os diferentes modos de falha possíveis para ligações com pinos metálicos, conforme prescrições normativas. Para cada modo de falha considerando 1 plano de corte, determina-se um valor de resistência característica ao cisalhamento do pino. A resistência característica do pino $F_{v,Rk}$ é definida como o menor valor obtido entre todos os modos de falha analisados. Os modos de falha, com base na NBR 7190:2022, são expressos por:

- Ia

$$F_{v,Rk1} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad \text{Equação 24}$$

Figura 4 - Ilustração da falha Ia

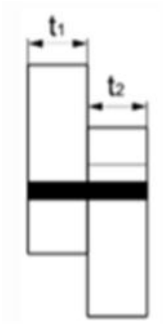


Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

- Ib

$$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta \quad \text{Equação 25}$$

Figura 5 - Ilustração da falha Ib



Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

- Ic

$$F_{v,Rk3} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1+\beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad E.26$$

Figura 6 - Ilustração da falha Ic



Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

- IIa

$$F_{v,Rk4} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2+\beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2+\beta) \cdot M_{y,k1}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad E.27$$

Figura 7 - Ilustração da falha IIa



Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

- IIb

$$F_{v,Rk5} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1+2\beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1+2\beta) \cdot M_{y,k1}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad E.27$$

Figura 8 - Ilustração da falha IIb



Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

- III

$$F_{v,Rk6} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1+\beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k1} \cdot f_{e1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad E.28$$

Figura 9 - Ilustração da falha III



Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

A contribuição do efeito de confinamento $F_{ax,Rk}$ foi considerada nula. Tal adoção baseia-se na recomendação da ABNT NBR 7190-1:2022, que estabelece que a contribuição desse efeito deve ser considerada somente mediante investigação experimental que comprove o fenômeno.

3.6. Flechas

A ABNT NBR 7190-1:2022 estabelece que as flechas em elementos estruturais de madeira devem considerar os deslocamentos instantâneos e os efeitos de fluência ao longo do tempo. O cálculo é realizado por meio das equações normativas que combinam as ações permanentes e variáveis, utilizando o coeficiente de fluência (φ) conforme o tipo de material e a classe de umidade, como apresentado na Tabela 11.

Para os deslocamentos instantâneos, desconsiderando os efeitos da fluência, é calculado conforme a seguinte equação:

$$\delta_{inst} = \sum_{i=1}^m \delta_{inst,Gi,k} + \delta_{inst,Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{1j} \delta_{inst,Qj,k} \quad \text{Equação 29}$$

Para a avaliação das flechas finais deve-se considerar a combinação quase permanente e os efeitos da fluência conforme as equações a seguir:

$$\delta_{fin} = \sum_{i=1}^m \delta_{fin,Gi,k} + \sum_{j=1}^n \delta_{fin,Qj,k} \quad \text{Equação 30}$$

Em que:

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

$$\delta_{fin,Qj,k} = \delta_{inst,Qj,k} + \delta_{creep,Qj,k} = \delta_{inst,Qj,k} \psi_2(1 + \phi) \quad \text{Equação 32}$$

Tabela 11 - 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 a classe de umidade 4.

Fonte: ABNT NBR 7190-1:2022.

Conforme a ABNT NBR 7190-1:2022, os elementos estruturais de madeira submetidos à flexão devem atender a valores-limite de deslocamentos verticais (flechas), visando ao atendimento dos Estados Limites de Serviço. Para os casos correntes, esses limites devem ser verificados de acordo com a Tabela 12.

Tabela 12 - 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 7190-1:2022.

Como em outras normas que contemplam valores-limite de deslocamentos para elementos fletidos, os valores são o dobro para as vigas em balanço.

Adicionalmente, a norma estabelece que as flechas instantâneas devidas apenas às ações variáveis não devem ultrapassar L/500 do vão ou L/250 em balanços, nem exceder o valor absoluto de 15 mm, especialmente na presença de elementos não estruturais frágeis.

4. Dimensionamento Automático via Planilha Eletrônica

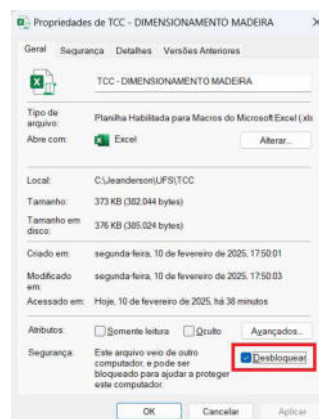
4.1. Acesso à planilha e macros no Microsoft Excel

Para utilizar a planilha e as macros no Microsoft Excel, é necessário desbloquear o arquivo no sistema operacional.

Se o arquivo estiver bloqueado pelo Windows, conforme a Figura 10 e 11, segue-se os passos abaixo:

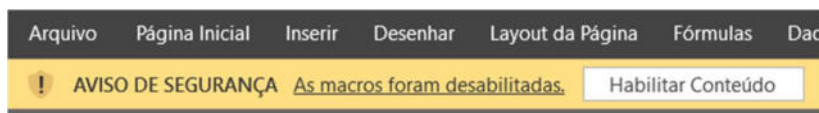
- Antes de abrir o arquivo Excel, clique com o botão direito nele e selecione "Propriedades".
- Na aba "Geral", marque a opção "Desbloquear" se disponível.
- Clique em "Aplicar" e depois em "OK".
- Ao abrir o arquivo, pode aparecer um aviso de segurança na parte superior. Clique em "Habilitar Conteúdo" para permitir o uso de macros.

Figura 10 - Procedimento para desbloqueio de macros no sistema operacional Windows



Fonte: Autoral.

Figura 11 - Ativação das macros no Microsoft Excel



Fonte: Autoral.

4.2. Inserção de dados nas células

Há duas maneiras de inserir dados nas células:

- Inserção Direta: Apenas valores numéricos são aceitos. Outros tipos de valores não podem ser utilizados.
- Seleção a partir de Lista: Ao selecionar a célula, um ícone no canto inferior direito indica a presença de uma lista suspensa, permitindo a escolha de uma opção fornecida.

Ressalta-se que a ordem de preenchimento das células deve ser seguida de forma rigorosa, pois a planilha possui macros e formatações condicionadas à sequência de inserção dos dados, conforme estabelecido para cada tipo de lançamento. O não cumprimento da sequência indicada pode resultar em inconsistências nos cálculos automáticos e nos resultados apresentados pela planilha.

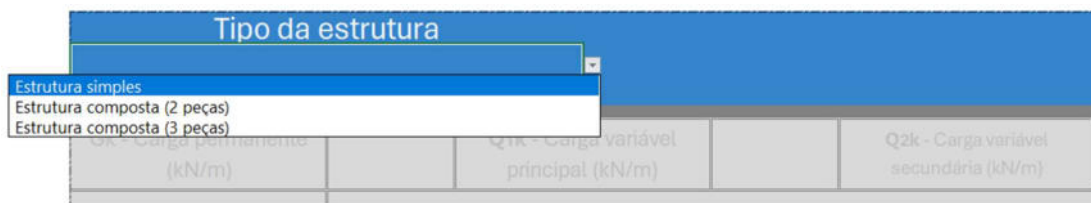
4.3. Células interativas

As células com texto sublinhado apresentam caráter interativo, possibilitando a realização de ações específicas mediante o clique, de acordo com a necessidade do usuário.

4.4. Seleção do tipo de estrutura e preenchimento dos dados comum a todos os tipos de estrutura

A primeira informação a ser fornecida, para desbloquear o restante da planilha e possibilitar o dimensionamento da estrutura desejada, é a escolha do tipo de seção transversal, que pode ser simples, composta por duas peças ou composta por três peças. A Figura 12 ilustra como essa escolha deve ser feita.

Figura 12 - Interface da planilha desenvolvida para a seleção do tipo de estrutura



Fonte: Autoral

Independentemente da escolha do tipo da seção selecionada — simples ou composta —, é necessário inserir os dados referentes à carga permanente, ao comprimento da viga e ao tipo de apoio, que pode ser biapoiado ou em balanço. Além disso, as cargas variáveis, divididas em carga variável principal e duas cargas variáveis secundárias, devem ser associadas a ações específicas, conforme as normas aplicáveis. Portanto, ao preencher cada carga variável, é fundamental selecionar corretamente a ação correspondente. A Figura 13 destaca essa seção em azul, ilustrando os campos de entrada de dados para as cargas e as opções de apoio, facilitando o preenchimento das informações necessárias.

Ressalta-se que, neste item, a planilha eletrônica considera exclusivamente a aplicação de cargas distribuídas uniformes, não contemplando, nesta versão, outros tipos de carregamento.

Figura 13 - Interface da planilha desenvolvida para o preenchimento dos dados iniciais do dimensionamento.

ENTRADA DE DADOS									
Ok - Carga permanente (kN/m)	Q1k - Carga variável principal (kN/m)	Q2k - Carga variável secundária (kN/m)	Q3k - Carga variável secundária (kN/m)	L - Vão (m)	Tipo de viga	Peça	Classe de madeira	Classe de carregamento	Tipo de madeira
Ação da Q1k							1		
Ação da Q2k							2		
Ação da Q3k							3		
Espaçamento do prego					Espaçamento entre as peças (mm)		Distância da borda da peça para o prego		
Catálogo	Diâmetro do prego (mm) - peça 1	Comprimento do prego (mm) - peça 1	Diâmetro do prego (mm) - peça 2	Comprimento do prego (mm) - peça 2	Peça 1	Peça 2	Tipo de processamento		

Fonte: Autoral

4.5. Preenchimento dos dados para Seção simples

Após o preenchimento das informações iniciais, para o tipo da seção simples, é necessário preencher apenas todas as células correspondentes à Peça 2, conforme destacado em azul na Figura 14. Todos os demais campos estão bloqueados para edição, garantindo que apenas os dados referentes à Peça 2 sejam inseridos.

Figura 14 - Interface da planilha desenvolvida para o preenchimento dos dados de entrada da estrutura simples

ENTRADA DE DADOS									
Ok - Carga permanente (kN/m)	L - Vão (m)	Tipo de viga	Peça	Classe de unidade	Classe de madeira	Classe de carregamento	Tipo de madeira	b - Base da peça (mm)	h - Altura da peça (mm)
			1				Madeira serrada		
			2						
			3						
Espaçamento do prego			Espaçamento entre as peças (mm)		Distância da borda da peça para o prego				
Catálogo	Diâmetro do prego (mm) - peça 1	Comprimento do prego (mm) - peça 1	Diâmetro do prego (mm) - peça 2	Comprimento do prego (mm) - peça 2	Tipo de processamento		Tipo de madeira		

Fonte: Autoral.

4.6. Preenchimento dos dados para estrutura composta por duas peças

Após inserir as informações iniciais, devem ser preenchidas as células relativas às Peças 1 e 2 — correspondentes, respectivamente, à mesa superior e à alma da estrutura — conforme mostrado na Figura 15. Todos os outros campos estão bloqueados, garantindo que somente as informações dessas duas peças sejam registradas.

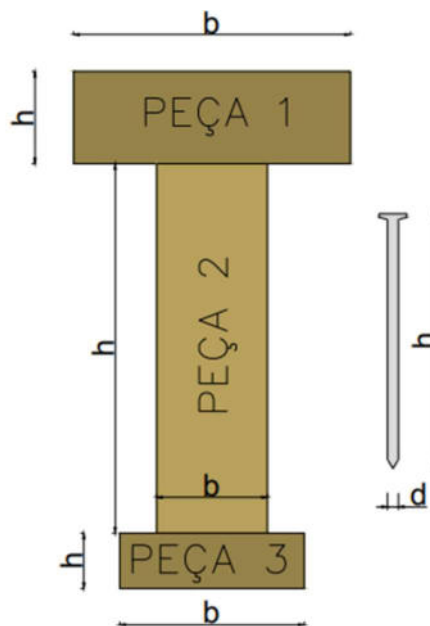
A sequência correta é a seguinte: Classe de unidade, Classe da madeira, Classe de carregamento, Base da peça b , Altura da peça h , Catálogo da escolha do prego, Diâmetro do prego para a peça 1 d , Comprimento do prego para a peça 1 h , Espaçamento do prego para a peça 1 e , por fim, o tipo de processamento. A Figura 16 ilustra a seção transversal da viga e o prego com suas respectivas dimensões.

Figura 17 - Interface da planilha desenvolvida para o preenchimento dos dados de entrada da estrutura composta por três peças

ENTRADA DE DADOS													
Tipo de estrutura	SP - Tabela de dados	SP - Tabela de dados	SP - Tabela de dados	SP - Tabela de dados	SP - Tabela de dados	SP - Tabela de dados	Peça	Classificação da madeira	Classificação da madeira	Classificação da madeira	Tipo de madeira	b - Base da peça (mm)	h - Altura da peça (mm)
SP - Tabela de dados							1						
SP - Tabela de dados							2						
SP - Tabela de dados							3						
Escolha da peça							e - Espessura dos pregos (mm)		f - Tipo de pregos de corte por prego				
Código	Dímetro (D) (mm)	Comprimento (L) (mm)	Dímetro (D) (mm)	Comprimento (L) (mm)	Peça 1	Peça 2	f - Número efetivo de pregos resistentes						
							Tipo de processamento						
							Valor do f para peça 1						
							Valor do f para peça 2						

Fonte: Autoral.

Figura 18 - Ilustração de uma viga de madeira de seção composta justaposta com três peças (tipo “I”) e, ao lado, o mecanismo de ligação, o prego.



Fonte: Autoral.

4.8. Processamento dos dados

Após a inserção de todos os dados necessários, sem exceção, deve-se clicar no botão chamado “Processar Dados CLIQUE AQUI”. Essa ação iniciará o processo de dimensionamento e entregará os resultados.

Conforme a Figura 19, observa-se que há formatação condicional dos resultados nas células mais pertinentes, destacadas pela cor verde, indicando que o dimensionamento está adequado dentro das restrições normativas. Caso algum dado de entrada não seja inserido corretamente ou, então, se os dados fornecidos não atendam às normas estabelecidas, fazendo com que algum resultado exceda o limite pré-determinado, uma mensagem de erro será exibida nas observações do projeto e a formatação condicional ficará destacada em vermelho, sendo necessária a redefinição dos dados de entrada.

Figura 19 - Interface da planilha desenvolvida para a exibição dos resultados do dimensionamento da estrutura

SAÍDA DE DADOS									
DADOS DE CÁLCULO									
Peça	BIL.d. (Mpa)	Mód. E (Mpa)	σmax - tensão normal máxima (MPa)	σmax - Tensão Máxima cisalhante(MPa)	Rd - Resistência de projeto do prego (N)	F - Força aplicada no prego (N)	ref - Número efetivo de pregos resistentes	Limite da flecha instantânea (mm)	δinst - Flecha instantânea total (mm)
1	25,71	2,87	4,93	1,06	2616,24	1948,48	2	6,0	3,9
2	25,71	2,87	4,43		-	-	-	Limite da flecha final (mm)	δfin - Flecha final total (mm)
3	25,71	2,87	4,24		2250,63	2145,28	1	13,3	4,3
OBSERVAÇÕES DE PROJETO									
Pessoa superior (peça 1) da estrutura de madeira serrada, classificada como C20, que forma uma Viga tripalizada e possui um número efetivo de 2 pregos (x) dispostos(x) transversalmente a cada 100mm ao longo da viga.									
Alma (peça 2) da estrutura de madeira serrada, classifiado como C20, que forma uma Viga tripalizada.									
Pessoa inferior (peça 3) da estrutura de madeira serrada, classificada como C20, que forma uma Viga tripalizada e possui um número efetivo de 1 prego(s) dispostos(x) transversalmente a cada 100mm ao longo da viga.									

Fonte: Autoral.

4.9. Redefinição dos dados de entrada

Para facilitar a exclusão organizada dos dados de entrada, foram desenvolvidos botões específicos na planilha, cada um projetado para redefinir determinadas seções. Destaca-se que o objetivo dos botões de redefinição é garantir que os dados sejam excluídos de acordo com a ordem correta. Portanto, recomenda-se o uso desses botões para apagar as seções correspondentes, em vez de realizar a exclusão manual. Além disso, o uso dos botões torna o processo mais prático e eficiente.

O primeiro botão, denominado "Apagar até a escolha do prego CLIQUE AQUI", tem como função apagar os dados presentes nas células relacionadas ao pino de ligação, que, neste caso, corresponde ao prego, conforme destacado em vermelho na Figura 20.

Figura 20 - Interface da planilha demonstrando a exclusão automática dos dados referentes ao pino de ligação

ENTRADA DE DADOS									
Tipo da estrutura									
Q1 - Carga permanente (kN/m)	Q1k - Carga variável principal (kN/m)	Q2 - Carga variável secundária (kN/m)	Q2k - Carga variável secundária (kN/m)	L - Vão (m)	Tipo de viga	Peça	Classes de madeira	Classes de madeira	Substituição da madeira
Auto da Q1						1			
Auto da Q2						2			
Auto da Q3						3			
Escolha do prego					e - Espaçamento dos pregos (mm)	Ref - Queda de sapatas de corte por prego	Ref - Número efetivo de pregos resistentes		
Catálogo	Diâmetro (Ø) (mm) peça 1	Comprimento (LFP) (mm) peça 1	Diâmetro (Ø) (mm) peça 2	Comprimento (LFP) (mm) peça 2	Peça 1	Peça 2	Tipo de processamento	Valor do Ref para peça 1	Valor do Ref para peça 2

Fonte: Autoral.

O segundo botão, denominado "Apagar até a escolha da madeira CLIQUE AQUI", tem como função apagar os dados presentes nas células relacionadas tanto ao pino de ligação quanto à escolha da madeira, incluindo suas propriedades e dimensões. As células mencionadas estão destacadas em vermelho na Figura 21.

Figura 21 - Interface da planilha demonstrando a exclusão automática dos dados referentes ao pino de ligação e à seleção da madeira

ENTRADA DE DADOS											
Tipo de estrutura		Qk - Carga variável principal (kN/m)	Qk - Carga variável secundária (kN/m)	Qk - Carga variável secundária (kN/m)	L - Vão (m)	Tipo de viga	Peça	Classes de madeira	Classes de madeira	Classes de madeira	Tipo de madeira
Árvores (Q1)							1				
Árvores (Q2)							2				
Árvores (Q3)							3				

Exatidão do projeto				e - Espaçamento dos pregos (mm)		Esp - Qualidade dos pregos de corte por projeto		Ref - Número efetivo de pregos resistentes	
Código	Diâmetro (Ø) (mm) peça 1	Comprimento (LPP) (mm) peça 1	Diâmetro (Ø) (mm) peça 2	Comprimento (LPP) (mm) peça 2	Peça 1	Peça 2	1	Tipo de processamento	Valor do Ref para peça 1

Fonte: Autoral.

O terceiro e último botão, denominado "Reiniciar", tem como função apagar todos os dados de entrada presentes na planilha, reiniciando-a completamente.

5. MODELOS DE APLICAÇÃO

Com o objetivo de validar a planilha desenvolvida e verificar sua coerência em relação aos métodos de cálculo previstos em norma, foi realizado um comparativo com os resultados de dimensionamento de estruturas de madeira de forma analítica. Para isso, foi considerada uma viga biapoiada com 2,50 m de vão, para a qual foram considerados três tipo de seção: simples; composta justaposta com duas peças (tipo “T”); composta justaposta com três peças (tipo “I”). Para a viga, independentemente do tipo de seção transversal, considera-se uma carga permanente de 2,00 kN/m; e carga variável principal de 1,50 kN/m. Para melhor explorar a versatilidade da planilha eletrônica, as peças serão compostas por tipos diferentes de madeira, com diferentes tipos de prego e espaçamentos.

5.1. Dados de entrada e comparativo dos resultados para estrutura simples

Os dados de entrada correspondem às informações necessárias para o processamento automático do dimensionamento na planilha. A Figura 22 ilustra a forma de inserção dos parâmetros referentes à estrutura simples, incluindo as cargas permanentes e variáveis, o vão da viga, as classes de madeira e umidade, bem como as dimensões das peças.

A seguir, apresenta-se o desenvolvimento analítico do dimensionamento de uma estrutura de madeira de seção simples, realizado conforme os critérios da ABNT NBR 7190:2022. São apresentadas as etapas de cálculo das propriedades geométricas, das tensões atuantes e da resistência das ligações pregadas, com o objetivo de comparar os resultados obtidos manualmente com aqueles gerados pela planilha eletrônica desenvolvida e, assim, verificar a consistência do modelo proposto.

Inicialmente, são consideradas as propriedades mecânicas e geométricas da viga de seção simples, formada por uma única peça de madeira, necessárias para a avaliação do seu

comportamento estrutural. A partir da classe de resistência da madeira adotada, determinam-se a resistência característica à compressão paralela às fibras $f_{c0,d}$, a resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras $f_{v0,d}$, o módulo de elasticidade médio paralelo às fibras $E_{c0,med}$ e a densidade aparente a 12% de umidade, conforme a ABNT NBR 7190:2022 demonstrado na Tabela 1.

Figura 22 - Interface da planilha demonstrando os dados de entrada empregados no comparativo dos resultados obtidos para a estrutura simples

ENTRADA DE DADOS																		
Tipo da estrutura Estrutura simples																		
Gk - Carga permanente (kN/m)	2,00	Q1k - Carga variável principal (kN/m)	1,50	Q2k - Carga variável secundária (kN/m)	0,30	Q3k - Carga variável secundária (kN/m)	0,25	L - Vão (m)	2,5	Tipo de viga	Viga biapoiada	Peça	Classes de umidade	Classes da madeira	Classe de carregamento	Tipo de madeira	b - Base da peça (mm)	h - Altura da peça (mm)
Ação da Q1k	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			Permanente	Madeira serrada		
Ação da Q2k	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral											2	1	D60			60,0	160,0
Ação da Q3k	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local											3						
Escolha do prego					s - Espaçamento dos pregos (mm)		nsp - Qtde de seções de corte por prego		Nef - Número efetivo de pregos resistentes									
Catálogo	Diâmetro (JP mm) peça 1	Comprimento (LPP mm) peça 1	Diâmetro (JP mm) peça 3	Comprimento (LPP mm) peça 3	Peça 1	Peça 3	1		Tipo de processamento		Valor do Nef para peça 1		Valor do Nef para peça 3					

Fonte: Autoral.

Para a seção simples escolhida, os valores dos parâmetros mencionados no parágrafo anterior são: $f_{c0,d} = 60 \text{ MPa}$; $f_{v0,d} = 8,0 \text{ MPa}$; $E_{c0,med} = 19500 \text{ MPa}$; e $\rho = 1000,00 \text{ kg/m}^3$.

São definidos os coeficientes de modificação K_{mod1} e K_{mod2} , obtidos por meio das Tabelas normativas 2 e 3, respectivamente.

Os coeficientes de modificação K_{mod1} e K_{mod2} são, respectivamente, 0,60 e 1,00.

De posse desses parâmetros, calculam-se os valores de cálculo das resistências à compressão paralela às fibras $f_{c0,d}$ e ao cisalhamento paralelo às fibras $f_{v0,d}$, conforme as expressões normativas.

$$f_{c0,d} = \frac{60,00 \cdot 0,60 \cdot 1,00}{1,40} = 25,71 \text{ MPa} \quad \text{Equação 33}$$

$$f_{v0,d} = \frac{8,00 \cdot 0,60 \cdot 1,00}{1,8} = 2,67 \text{ MPa} \quad \text{Equação 34}$$

Em seguida, procede-se à determinação das propriedades geométricas da seção transversal, sendo a área $A=b \cdot h$ e o momento de inércia $I=b \cdot h^3/12$, permitindo o cálculo da rigidez à flexão da viga, expressa por $(EI)_{ef} = E \cdot I$.

$$(EI)_{ef} = (19500 \cdot 2,05 \cdot 10^7) = 4,00 \cdot 10^{11} \quad \text{Equação 35}$$

Com a rigidez conhecida e a partir dos esforços solicitantes obtidos para a viga biapoiada, determinam-se as tensões normais máximas $\sigma_{m\acute{a}x}$ decorrentes da flexão e a tensão cisalhante máxima na seção τ_d .

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \cdot 19500 \cdot 160 \cdot \frac{4250000}{4,00 \cdot 10^{11}} \quad \text{Equação 36}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_{m,i} = 16,58 \quad \text{Equação 37}$$

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V_d}{A} = \frac{1,5 \cdot 6810}{9600} = 1,06 \text{ MPa} \quad \text{Equação 38}$$

Os esforços solicitantes de cálculo, representados pelo momento fletor (M_d) e pelo esforço cortante (V_d), foram determinados a partir da combinação das ações no Estado Limite Último (ELU). Os cálculos realizados são apresentados a seguir.

$$F_d = 1,35 \cdot 2,00 + 1,50 \cdot 1,50 + 1,50 \cdot 0,60 \cdot 0,30 + 1,50 \cdot 0,60 \cdot 0,25 \quad \text{Equação 39}$$

$$F_d = 5,445 \text{ kN/m}$$

Para o momento fletor (Md):

$$M_d = \frac{5,445 \cdot (2,50)^2}{8} = 4,25 \text{ kN/m} \quad \text{Equação 40}$$

Para o esforço cortante (Vd):

$$M_d = \frac{5,445 \cdot 2,50}{2} = 6,81 \text{ kN/m} \quad \text{Equação 41}$$

A verificação da segurança é realizada comparando-se as tensões solicitantes com as respectivas resistências de cálculo, sendo atendida a condição normativa quando as tensões atuantes se mantêm inferiores aos valores resistentes estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022.

Por fim, são avaliados os deslocamentos verticais da viga, com o cálculo da flecha instantânea δ_{instGk} associada às ações permanentes e variáveis e, posteriormente, da flecha final δ_{finGk} , incluindo os efeitos de fluência. Os valores obtidos são comparados aos limites normativos de deslocamento, verificando-se o atendimento aos critérios de desempenho em serviço.

Inicialmente, determinam-se os valores-limite de deslocamento para elementos correntes fletidos, referentes à flecha total instantânea e à flecha total final, os quais, com base na Tabela 11, correspondem, respectivamente, a 5,00 mm e 8,33 mm.

Os valores dos deslocamentos instantâneo e final são obtidos a partir das seguintes equações:

$$\delta_{instGk} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2,0 \cdot 1000 \cdot 2,5^4}{4,00 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-6}} = 0,00254 \text{ m} = 2,54 \text{ mm} \quad \text{Equação 42}$$

$$\delta_{instQ} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,5 \cdot 1000 \cdot 2,5^4}{4,00 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-6}} = 0,00191 \text{ m} = 1,91 \text{ mm} \quad \text{Equação 43}$$

$$\delta_{instQ2k} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,30 \cdot 1000 \cdot 2,5^4}{4,00 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-6}} \cdot 0,3 = 0,00011 \text{ m} = 0,11 \text{ mm} \quad \text{Equação 44}$$

$$\delta_{instQ} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,25 \cdot 1000 \cdot 2,5^4}{4,00 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-6}} \cdot 0,5 = 0,000159 \text{ m} = 0,16 \text{ mm} \quad \text{Equação 45}$$

$$\delta_{inst} = 2,54 + 1,91 + 0,11 + 0,16 = 4,72 \text{ mm} \quad \text{Equação 46}$$

Com base no deslocamento instantâneo e considerando os coeficientes de fluência, encontrados na Tabela 10, determina-se, na sequência, o deslocamento final da seção simples.

$$\delta_{finGk} = 2,54 \cdot (1 + 0,6) = 4,06 \text{ mm} \quad \text{Equação 47}$$

$$\delta_{finQ1k} = 1,91 \cdot (1 + 0,6) \cdot 0,3 = 0,92 \text{ mm} \quad \text{Equação 48}$$

$$\delta_{finQ2} = 0,11 \cdot (1 + 0,6) \cdot 0,0 = 0,00 \text{ mm} \quad \text{Equação 49}$$

$$\delta_{finQ3k} = 0,16 \cdot (1 + 0,6) \cdot 0,3 = 0,08 \text{ mm} \quad \text{Equação 50}$$

$$\delta_{fin} = 4,06 + 0,92 + 0,00 + 0,08 = 5,06 \text{ mm} \quad \text{Equação 51}$$

Com base no desenvolvimento analítico elaborado, apresenta-se a Tabela 13 com a comparação entre os resultados obtidos manualmente e aqueles gerados pela planilha eletrônica.

Tabela 13 - Comparação entre os resultados obtidos manualmente e os gerados pela planilha automatizada para estrutura simples, conforme as fórmulas normativas da NBR 7190-1.

Elemento	Fórmula Utilizada (Norma NBR)	Resultado Manual	Resultado automatizado	Diferença calculada (%)
$(EI)_{ef}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	$3,99 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$	$3,99 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$	0,00
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	7,03 MPa	7,03 MPa	0,00
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	1,13 MPa	1,13 MPa	0,00
$\delta_{inst \text{ total}}$	Tópico 8.1 (NBR7190-1)	7,47 mm	7,48 mm	0,13
$\delta_{fin \text{ total}}$	Tópico 8.1 (NBR7190-1)	7,47 mm	7,48 mm	0,13

Fonte: Autoral.

5.2. Dados de entrada e comparativo dos resultados para estrutura composta por 2 peças

Os dados de entrada correspondem às informações necessárias para o processamento automático do dimensionamento da estrutura composta na planilha. A Figura 23 apresenta o modo de inserção dos parâmetros relativos à estrutura formada por duas peças, incluindo as cargas permanentes e variáveis, o vão da viga, as classes de madeira e umidade, além das dimensões das seções e dos parâmetros de ligação entre os elementos.

A seguir, apresenta-se o desenvolvimento analítico do dimensionamento de uma estrutura de madeira de seção composta por duas peças justapostas, realizado conforme os critérios da

ABNT NBR 7190:2022. São apresentadas as etapas de cálculo das propriedades geométricas, das tensões atuantes e da resistência das ligações pregadas, com o objetivo de comparar os resultados obtidos manualmente com aqueles gerados pela planilha eletrônica desenvolvida e, assim, verificar a consistência do modelo proposto.

Inicialmente, são consideradas as propriedades mecânicas e geométricas de cada elemento da seção, necessárias para a avaliação do comportamento global da viga e das ligações entre as peças.

A partir da classe de resistência da madeira selecionada, encontram-se a resistência característica à compressão paralela às fibras $f_{c0,d}$; a resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras $f_{v0,d}$; o módulo de elasticidade médio na direção paralela às fibras e a densidade a 12 % (ρ), com manuseio da tabela 1.

Figura 23 - Interface da planilha demonstrando os dados de entrada empregados no comparativo dos resultados obtidos para a estrutura composta por 2 peças

ENTRADA DE DADOS																		
Tipo da estrutura																		
Estrutura composta (2 peças)																		
Gk - Carga permanente (kN/m)	2,00	Q1k - Carga variável principal (kN/m)	1,50	Q2k - Carga variável secundária (kN/m)	0,30	Q3k - Carga variável secundária (kN/m)	0,25	L - Vão (m)	2,5	Tipo de viga	Viga biapoiada	Peça	Classes de umidade	Classes da madeira	Classe de carregamento	Tipo de madeira	b - Base da peça (mm)	h - Altura da peça (mm)
Ação da Q1k	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 Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local											1	2	D60	Média duração	Madeira serrada	140,0	50,0
Ação da Q2k												2	1	D50			60,0	150,0
Ação da Q3k												3						
Escolha do prego						s - Espaçamento dos pregos (mm)		nsp - Qtde de seções de corte por prego			Nef - Número efetivo de pregos resistentes							
Catálogo	Diâmetro (JP mm) peça 1		Comprimento (LPP mm) peça 1		Diâmetro (JP mm) peça 3		Comprimento (LPP mm) peça 3		Peça 1	Peça 3	1	Tipo de processamento		Valor do nef para peça 1		Valor do nef para peça 3		
Gerdau	24 6,4		66 151,8						45,0			Obter o 'nef' otimizado automaticamente						

Fonte: Autoral.

Para a peça 1, mesa superior, os valores dos parâmetros mencionados no parágrafo anterior são: $f_{c0,d} = 60 \text{ MPa}$; $f_{v0,d} = 8,0 \text{ MPa}$; $E_{c0,med} = 19500 \text{ MPa}$; e $\rho = 1000,00 \text{ kg/m}^3$. Para a peça 2, alma, os valores são: $f_{c0,d} = 50 \text{ MPa}$; $f_{v0,d} = 7,0 \text{ MPa}$; $E_{c0,med} = 16500 \text{ MPa}$; e $\rho = 850,0 \text{ kg/m}^3$.

A partir da escolha da classe de carregamento, do tipo de madeira e da classe de umidade, encontram-se os coeficientes de modificação K_{mod} e K_{mod2} , com o auxílio das tabelas 2 e 3, respectivamente.

Para a peça 1, os coeficientes de modificação K_{mod1} e K_{mod2} são, respectivamente, 0,80 e 0,90. De forma análoga, para a peça 2 são, respectivamente, 0,80 e 1,00.

Com todos os parâmetros necessário encontrados, pode-se calcular o valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras $f_{c0,d}$ e o valor de cálculo da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras $f_{v0,d}$.

Peça 1 – mesa superior

$$f_{c0,d} = \frac{60,00 \cdot 0,80 \cdot 0,90}{1,40} = 30,86 \text{ MPa} \quad \text{Equação 52}$$

$$f_{v0,d} = \frac{8,00 \cdot 0,80 \cdot 0,9}{1,8} = 3,20 \text{ MPa} \quad \text{Equação 53}$$

Peça 2 – alma

$$f_{c0,d} = \frac{50,00 \cdot 0,80 \cdot 1,00}{1,4} = 28,57 \text{ MPa} \quad \text{Equação 54}$$

$$f_{v0,d} = \frac{7,00 \cdot 0,80 \cdot 1,00}{1,8} = 3,11 \text{ MPa} \quad \text{Equação 55}$$

Após a determinação dos valores de resistência de cálculo, procede-se, à determinação das tensões solicitantes, as quais serão posteriormente comparadas com as respectivas resistências, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022, sendo atendida a condição de segurança quando as tensões solicitantes são inferiores às resistências de cálculo.

À priori, encontra-se a rigidez última de uma seção de corte de um pino metálico K_u , expresso em Newton por milímetros (N/mm), para a mesa superior.

$$K_{ser} = 1000^{1,5} \cdot \frac{6,40}{23} = 8799,38 \text{ N/mm} \quad \text{Equação 56}$$

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot 8799,38 = 5866,25 \text{ N/mm} \quad \text{Equação 57}$$

Com isso, pode-se calcular o fator de redução da inércia do conjunto estrutural γ e a distância do centroide da área de cada elemento que compõe a seção transversal até a linha neutra.

Peça 1 – mesa superior

$$\gamma_1 = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot 19500 \cdot 7000 \cdot 45}{5866,25 \cdot 2500^2}\right]} = 0,3769 \quad \text{Equação 58}$$

$$a_1 = \left(\frac{50+150}{2}\right) - 24,44 = 75,56 \text{ mm} \quad \text{Equação 59}$$

Peça 2 – alma

$$\gamma_2 = 1$$

$$a_2 = \frac{0,3769 \cdot 19500 \cdot 7000 \cdot (140 + 50)}{2 \cdot [(0,3769 \cdot 19500 \cdot 7000) + (1 \cdot 16500 \cdot 9000)]}$$

$$a_2 = 24,44 \text{ mm} \quad \text{Equação 60}$$

Assim é possível realizar o cálculo da rigidez efetiva considerando a rigidez da ligação, conforme a seguir:

$$(EI)_{ef} = (19500 \cdot 1458333,33 + 0,3769 \cdot 19500 \cdot 7000 \cdot 75,56^2) + (16500 \cdot 16875000 + 1,0 \cdot 16500 \cdot 9000 \cdot 24,44^2)$$

$$(EI)_{ef} = 6,89 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 \quad \text{Equação 61}$$

Com todos os parâmetros encontrados, calcula-se a tensão normal no centroide do elemento (σ); a parcela da tensão normal na extremidade do elemento σ_m e a tensão máxima na extremidade do elemento $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Peça 1 – mesa superior

$$\sigma_1 = 0,3769 \cdot 19500 \cdot 75,56 \cdot \frac{4250000}{6,89 \cdot 10^{11}} = 3,43 \text{ MPa} \quad \text{Equação 62}$$

$$\sigma_{m,1} = 0,5 \cdot 19500 \cdot 50 \cdot \frac{4250000}{6,89 \cdot 10^{11}} = 3,01 \text{ MPa} \quad \text{Equação 63}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x,1} = 3,43 + 3,01 = 6,44 \text{ MPa} \quad \text{Equa\c{c}\~ao 64}$$

Pe\c{c}a 2 – alma

$$\sigma_2 = 1,0 \cdot 16500 \cdot 24,44 \cdot \frac{4250000}{6,89 \cdot 10^{11}} = 2,49 \text{ MPa} \quad \text{Equa\c{c}\~ao 65}$$

$$\sigma_{m,2} = 0,5 \cdot 16500 \cdot 150 \cdot \frac{4250000}{6,89 \cdot 10^{11}} = 7,63 \text{ MPa} \quad \text{Equa\c{c}\~ao 66}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x,2} = 2,49 + 7,63 = 10,12 \text{ MPa} \quad \text{Equa\c{c}\~ao 67}$$

Ap\~os o c\~alculo da tens\~ao normal, encontra-se a tens\~ao m\~axima cisalhante da se\c{c}\~ao $\tau_{2,m\acute{a}x}$.

$$\tau_{2,m\acute{a}x} = (0,3769 \cdot 19500 \cdot 7000 \cdot 75,56 + 0,5 \cdot 16500 \cdot 60 \cdot 99,44^2) \cdot \frac{6810}{60 \cdot 6,89 \cdot 10^{11}}$$

$$\tau_{2,m\acute{a}x} = 1,45 \text{ MPa} \quad \text{Equa\c{c}\~ao 68}$$

Observa-se que os valores das tens\~oes m\~aximas obtidos atendem aos crit\~erios estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022, uma vez que se mant\~em inferiores \~as respectivas resist\~encias de c\~alculo da se\c{c}\~ao.

Ap\~os os c\~alculos referentes \~a se\c{c}\~ao transversal da madeira, dimensiona-se o pino met\~alicos utilizado, o prego.

Primeiramente, encontra-se a tens\~ao aplicada no conector, a partir da seguinte f\~ormula:

$$F_1 = 0,3769 \cdot 19500 \cdot 7000 \cdot 75,56 \cdot 45 \cdot \frac{6810}{6,89 \cdot 10^{11}}$$

$$F_1 = 1728,98 \text{ N} \quad \text{Equa\c{c}\~ao 69}$$

Ap\~os a determina\c{c}\~ao da for\c{c}a solicitante atuante no conector, procede-se, na sequ\~encia, \~a determina\c{c}\~ao da resist\~encia de c\~alculo do pino, a qual ser\~a posteriormente comparada com o esfor\c{c}o solicitante, conforme os crit\~erios estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022.

Primeiramente, com o di\~ametro nominal do prego escolhido de 6,4 mm (d) e a resist\~encia \~ultima caracter\xedstica \~a tra\c{c}\~ao do a\c{c}o do pino met\~alico $f_{u,k}$, encontrada a partir da tabela 9, determina-se o momento resistente caracter\xedstico do pino met\~alico $M_{y,k}$.

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot 490 \cdot 6,4^{2,6} = 18339,41 \text{ Nmm} \quad \text{Equa\c{c}\~ao 70}$$

A partir do comprimento do prego h escolhido de 151,8 mm, obtém-se o comprimento de penetração na respectiva peça de madeira t_i . Utilizando a densidade característica da madeira ($\rho/1,2$), calcula-se a resistência de embutimento $f_{ei,k}$ na respectiva peça de madeira, expressa em MPa.

$$t_1 = 50,00 \text{ mm}$$

$$t_2 = 151,80 - 50,00 = 101,80 \text{ mm} \quad \text{Equação 71}$$

$$f_{e1,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 6,40) \cdot \frac{1000}{1,2} = 63,96 \text{ MPa} \quad \text{Equação 72}$$

$$f_{e2,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 6,40) \cdot \frac{850}{1,2} = 54,37 \text{ MPa} \quad \text{Equação 73}$$

$$\beta = \frac{54,37}{63,96} = 0,85 \quad \text{Equação 74}$$

Na sequência, são avaliados os seis modos de falha previstos para ligações entre elementos de madeira com pinos metálicos. A resistência de cálculo da ligação é determinada pelo menor valor obtido entre os modos analisados, conforme estabelecido pela ABNT NBR 7190:2022. Ressalta-se que $F_{ax,Rk}$ é igual a zero, portanto, foi desconsiderado das seguintes equações.

- Ia

$$F_{v,Rk} = 63,96 \cdot 50,00 \cdot 6,40$$

$$F_{v,Rk1} = 20467,20 \text{ N} \quad \text{Equação 75}$$

- Ib

$$F_{v,Rk} = 63,96 \cdot 101,80 \cdot 6,40 \cdot 0,85$$

$$F_{v,Rk2} = 35420,54 \text{ N} \quad \text{Equação 76}$$

- Ic

$$F_{v,Rk3} = \frac{63,96 \cdot 50 \cdot 6,40}{1 + 0,85} \cdot \left[\sqrt{0,85 + 2 \cdot 0,85^2 \cdot \left[1 + \frac{101,80}{50,00} + \left(\frac{101,80}{50,00} \right)^2 \right] + 0,85^3 \cdot \left(\frac{101,80}{50,00} \right)^2} - 0,85 \cdot \left(1 + \frac{101,80}{50,00} \right) \right]$$

$$F_{v,Rk3} = 12507,77 \text{ N}$$

Equação 77

- IIa

$$F_{v,Rk4} = 1,05 \cdot \frac{63,96 \cdot 50 \cdot 6,40}{2 + 0,85} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 0,85 \cdot (1 + 0,85) + \frac{4 \cdot 0,85 \cdot (2 + 0,85) \cdot 18339,41}{63,96 \cdot 6,40 \cdot 50^2}} - 0,85 \right]$$

$$F_{v,Rk4} = 7327,28 \text{ N}$$

Equação 78

- IIb

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{63,96 \cdot 101,80 \cdot 6,4}{1 + 2 \cdot 0,85} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 0,85^2 \cdot (1 + 0,85) + \frac{4 \cdot 0,85 \cdot (1 + 2 \cdot 0,85) \cdot 18339,41}{63,96 \cdot 6,40 \cdot 50^2}} - 0,85 \right]$$

$$F_{v,Rk5} = 12917,37 \text{ N}$$

Equação 79

- III

$$F_{v,Rk6} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85}{1 + 0,85}} \cdot \sqrt{2 \cdot 18339,41 \cdot 63,96 \cdot 6,40}$$

$$F_{v,Rk6} = 4271,58 \text{ N}$$

Equação 80

Com o valor do modo de falha obtido, 4271,58 N, encontra-se o valor de cálculo da resistência da ligação R_d a partir do valor característico da ligação R_k :

$$R_k = 4271,58 \cdot 1 \cdot 1$$

$$R_k = 4271,58 \text{ N} \quad \text{Equação 81}$$

$$R_d = 0,8 \cdot 0,9 \cdot \frac{4271,58}{1,4}$$

$$R_d = 2196,81 \text{ N} \quad \text{Equação 82}$$

Observa-se que a resistência de cálculo da ligação pregada atende aos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022, uma vez que se mantém superior ao esforço solicitante atuante no conector.

Após o dimensionamento da estrutura de madeira e da ligação dos pregos, pode-se calcular a flecha para a estrutura biapoiada.

Inicialmente, determinam-se os valores-limite de deslocamento para elementos correntes fletidos, referentes à flecha total instantânea e à flecha total final, os quais, com base na Tabela 11, correspondem, respectivamente, a 5,00 mm e 8,33 mm.

A partir dos valores-limite de deslocamento estabelecidos, procede-se ao cálculo dos deslocamentos da estrutura, considerando separadamente as contribuições decorrentes da carga permanente, da carga variável principal e das cargas variáveis secundárias, de modo a determinar os deslocamentos instantâneo δ_{inst} e final δ_{fin} , os quais serão posteriormente comparados com os limites admissíveis definidos em norma, devendo os valores obtidos manter-se inferiores aos respectivos limites para o atendimento aos critérios de segurança e de desempenho estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022.

Inicialmente, procede-se ao cálculo do deslocamento instantâneo da estrutura.

$$\delta_{instGk} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2,0 \cdot 1000 \cdot 2,5^4}{6,89 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-6}} = 0,001476 \text{ m} = 1,48 \text{ mm} \quad \text{Equação 83}$$

$$\delta_{instQ1k} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,5 \cdot 1000 \cdot 2,5^4}{6,89 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-6}} = 0,001107 \text{ m} = 1,11 \text{ mm} \quad \text{Equação 84}$$

$$\delta_{instQ2k} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,30 \cdot 1000 \cdot 2,5^4}{6,89 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-6}} \cdot 0,3 = 0,00007 \text{ m} = 0,07 \text{ mm} \quad \text{Equação 85}$$

$$\delta_{instQ3k} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,25 \cdot 1000 \cdot 2,5^4}{6,89 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-6}} \cdot 0,5 = 0,00009 \text{ m} = 0,09 \text{ mm} \quad \text{Equação 86}$$

$$\delta_{inst} = 1,48 + 1,11 + 0,07 + 0,09 = 2,75 \text{ mm} \quad \text{Equação 87}$$

Com base no deslocamento instantâneo e considerando os coeficientes de fluência, encontrados na Tabela 10, determina-se, na sequência, o deslocamento final da estrutura.

$$\delta_{finGk} = 1,48 \cdot (1 + 0,8) = 2,66 \text{ mm} \quad \text{Equação 88}$$

$$\delta_{finQ1k} = 1,11 \cdot (1 + 0,8) \cdot 0,3 = 0,60 \text{ mm} \quad \text{Equação 89}$$

$$\delta_{finQ2k} = 0,07 \cdot (1 + 0,8) \cdot 0,0 = 0,00 \text{ mm} \quad \text{Equação 90}$$

$$\delta_{finQ3} = 0,09 \cdot (1 + 0,8) \cdot 0,3 = 0,05 \text{ mm} \quad \text{Equação 91}$$

$$\delta_{fin} = 2,66 + 0,60 + 0,00 + 0,05 = 3,31 \text{ mm} \quad \text{Equação 92}$$

Observa-se que os valores de flecha instantânea e de flecha final obtidos para a estrutura atendem aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022, uma vez que se mantêm inferiores aos respectivos valores-limite admissíveis.

Com base no desenvolvimento analítico elaborado, apresenta-se a Tabela 14 com a comparação entre os resultados obtidos manualmente e aqueles gerados pela planilha eletrônica.

Tabela 14 - Comparação entre os resultados obtidos manualmente e os gerados pela planilha automatizada para estrutura composta por 2 peças, conforme as fórmulas normativas da NBR 7190-1.

Elemento	Fórmula Utilizada (Norma NBR)	Resultado Manual	Resultado automatizado	Diferença calculada (%)
K_{u1}	Tópico 7.1.12 (NBR7190-1)	4597,16 N/mm	4597,16 N/mm	0,00
γ_1	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	0,38	0,38	0,00
γ_2	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	1,00	1,00	0,00
a_1	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	75,56 mm	74,27 mm	1,71
a_2	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	24,44 mm	25,73 mm	5,27
$(EI)_{ef}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	$6,89 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$	$6,89 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$	0,05
σ_1	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	3,43 MPa	3,37 MPa	1,75
σ_2	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	2,49 MPa	2,62 MPa	5,22
$\sigma_{m,1}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	3,01 MPa	3,01 MPa	0,00
$\sigma_{m,2}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	7,63 MPa	7,64 MPa	0,13
$\sigma_{m\acute{a}x1}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	6,44 MPa	6,38 MPa	0,93

Elemento	Fórmula Utilizada (Norma NBR)	Resultado Manual	Resultado automatizado	Diferença calculada (%)
$\sigma_{m\acute{a}x2}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	10,12 MPa	10,26 MPa	1,38
$\tau_{2,m\acute{a}x}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	1,45 MPa	1,44 MPa	0,69
F_1	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	1728,98 N	1698,64 N	1,76
$F_{V,Rk1}$	Tópico 7.2 (NBR7190-1)	4271,58 N	4271,58 N	0,00
R_{d1}	Tópico 7.1.2 (NBR7190-1)	2196,81 N	2196,81 N	0,00
$\delta_{inst\ total}$	Tópico 8.1 (NBR7190-1)	2,75 mm	2,74 mm	0,36
$\delta_{fin\ total}$	Tópico 8.1 (NBR7190-1)	3,31 mm	3,31 mm	0,00

Fonte: Autoral.

5.3. Dados de entrada e comparativo dos resultados para estrutura composta por 3 peças

Os dados de entrada correspondem às informações necessárias para o processamento automático do dimensionamento da estrutura composta na planilha. A Figura 24 apresenta o modo de inserção dos parâmetros relativos à estrutura formada por três peças, incluindo as cargas permanentes e variáveis, o vão da viga, as classes de madeira e umidade, além das dimensões das seções e dos parâmetros de ligação entre os elementos.

Figura 24 - Interface da planilha demonstrando os dados de entrada empregados no comparativo dos resultados obtidos para a estrutura composta por 3 peças

ENTRADA DE DADOS																		
Tipo da estrutura																		
Estrutura composta (3 peças)																		
Gk - Carga permanente (kN/m)	2,00	Q1k - Carga variável principal (kN/m)	1,50	Q2k - Carga variável secundária (kN/m)	0,30	Q3k - Carga variável secundária (kN/m)	0,25	L - Vão (m)	2,5	Tipo de viga	Viga biapoiada	Peça	Classes de umidade	Classes da madeira	Classe de carregamento	Tipo de madeira	b - Base da peça (mm)	h - Altura da peça (mm)
Ação da Q1k	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 Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local											1	2	D50	Permanente	Madeira serrada	150,0	50,0
Ação da Q2k												2	1	D30			60,0	200,0
Ação da Q3k												3	2	D40			100,0	30,0
Escolha do prego							s - Espaçamento dos pregos (mm)	nsp - Qtde de seções de corte por prego			Nef - Número efetivo de pregos resistentes							
Catálogo	Diâmetro (JP mm) peça 1	Comprimento (LPP mm) peça 1	Diâmetro (JP mm) peça 3	Comprimento (LPP mm) peça 3	Peça 1	Peça 3	1			Tipo de processamento		Valor do Nef para peça 1		Valor do Nef para peça 3				
Gerdau	23 5,9	60 138	22 5,4	54 124,2	50,0	40,0				Obter o 'nef' otimizado automaticamente								

Fonte: Autoral.

Para o modelo estrutural composto por três peças, o desenvolvimento analítico do dimensionamento é realizado de forma análoga ao procedimento apresentado para a seção composta por duas peças, empregando-se as mesmas expressões normativas e a mesma sequência de verificação estabelecidas pela ABNT NBR 7190:2022. Assim, a fim de tornar a apresentação mais objetiva, expõem-se diretamente os resultados obtidos manualmente e aqueles gerados automaticamente pela planilha eletrônica. A Tabela 15, apresentada a seguir, reúne o comparativo entre os valores calculados por ambos os métodos, permitindo verificar a precisão, a coerência e a confiabilidade dos cálculos implementados para a seção composta por três peças.

Tabela 15 - Comparação entre os resultados obtidos manualmente e os gerados pela planilha automatizada para estrutura composta por 3 peças, conforme as fórmulas normativas da NBR 7190-1.

Elemento	Fórmula Utilizada (Norma NBR)	Resultado Manual	Resultado automatizado	Diferença calculada (%)
K_{u1}	Tópico 7.1.12 (NBR7190-1)	4238,01 N/mm	4238,00 N/mm	0,00
K_{u3}	Tópico 7.1.12 (NBR7190-1)	3214,93 N/mm	3214,89 N/mm	0,00
γ_1	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	0,30	0,30	0,00
γ_2	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	1,00	1,00	0,00
γ_3	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	0,54	0,54	0,00
a_1	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	115,52 mm	115,32 mm	0,17
a_2	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	9,48 mm	9,68 mm	2,11
a_3	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	124,48 mm	124,68 mm	0,16
$(EI)_{ef}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	$1,38 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$	$1,38 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$	0,00
σ_1	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	1,76 MPa	1,77 MPa	0,57
σ_2	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	0,35 MPa	0,36 MPa	2,86
σ_3	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	3,00 MPa	2,99 MPa	0,33
$\sigma_{m,1}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	1,27 MPa	1,27 MPa	0,00
$\sigma_{m,2}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	3,70 MPa	3,69 MPa	0,27
$\sigma_{m,3}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	0,67 MPa	0,67 MPa	0,00
$\sigma_{m\acute{a}x1}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	3,03 MPa	3,04 MPa	0,33

Elemento	Fórmula Utilizada (Norma NBR)	Resultado Manual	Resultado automatizado	Diferença calculada (%)
$\sigma_{m\acute{a}x2}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	4,05 MPa	4,04 MPa	0,25
$\sigma_{m\acute{a}x3}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	3,67 MPa	3,66 MPa	0,27
$\tau_{2,m\acute{a}x}$	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	0,60 MPa	0,59 MPa	1,67
F_1	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	1058,19 N	1060,85 N	0,25
F_3	Tópico 6.7.2 (NBR7190-1)	577,18 N	574,80 N	0,41
$F_{V,Rk1}$	Tópico 7.2 (NBR7190-1)	3281,67 N	3275,55 N	0,19
R_{d1}	Tópico 7.1.2 (NBR7190-1)	1265,79 N	1263,43 N	0,19
$F_{V,Rk3}$	Tópico 7.2 (NBR7190-1)	2721,39 N	2724,43 N	0,11
R_{d3}	Tópico 7.1.2 (NBR7190-1)	1049,68 N	1050,85 N	0,11
$\delta_{inst\ total}$	Tópico 8.1 (NBR7190-1)	1,36 mm	1,36 mm	0,45
$\delta_{fin\ total}$	Tópico 8.1 (NBR7190-1)	1,64 mm	1,65 mm	0,61

Fonte: Autoral.

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu comprovar a eficiência da planilha automatizada elaborada para o dimensionamento de estruturas de madeira. A ferramenta mostrou-se capaz de reproduzir com precisão os cálculos normativos previstos na NBR 7190:2022, otimizando o processo de verificação estrutural.

O comparativo entre os resultados obtidos manualmente e aqueles gerados pela planilha evidenciou a sua confiabilidade, uma vez que a maior diferença observada entre os valores foi inferior a 0,65%, resultado atribuído apenas a arredondamentos numéricos. Dessa forma, conclui-se que a planilha atende plenamente ao propósito de automatizar o dimensionamento de elementos estruturais de madeira, mantendo a precisão e a segurança exigidas pelas normas técnicas.

7. REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681:2025 — *Ações e segurança nas estruturas*. Rio de Janeiro, 2025.

GÓES, J. L. N.; DIAS, A. A. *Vigas pregadas de madeira com seção composta I*. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 24, p. 35–48, dez. 2003.

MAIA, B. B.; GÓES, J. L. N. *Resistência de ligações pregadas em madeira*. In: **CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA – CLEMCIMAD**, 2017, Junín. *Anais [...]*. Junín: UNNOBA, 2017.

MARTINO, G. *Entendendo estruturas: o que são cargas variáveis e permanentes?* ArchDaily Brasil, 8 fev. 2023. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/995154/entendendo-estruturas-o-que-sao-cargas-variaveis-e-permanentes>. Acesso em: 23 dez. 2025.

PFEIL, W. *Estruturas de madeira*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

STANT. *O uso da madeira na construção civil: quais são as melhores aplicações?* Disponível em: <https://www.stant.com.br/o-uso-da-madeira-na-construcao-civil-quais-sao-as-melhores-aplicacoes/>. Acesso em: 15 dez. 2025.

MARTINO, G. *Madeira e fogo: o que todo arquiteto deve saber sobre proteção contra incêndio em construções de madeira*. ArchDaily Brasil, 13 fev. 2020. Disponível em: [ArchDaily Brasil](#). Acesso em: 28 maio 2026.