



2024

Ligações Pregadas em Estruturas de Madeira: Verificação Automatizada da Resistência de Cálculo

Christian Santos Bueno ^a; Trindade, C. A. ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, christian.bueno@ufms.br

^b Professor Orientador, Doutora em Engenharia Civil, christiane.trindade@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma planilha eletrônica no software Excel para automatizar a verificação dos cálculos de resistência de ligações pregadas em estruturas de madeira, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7190/2022 – Projeto de Estruturas de Madeira. A utilização de conexões com pregos é comum em estruturas de madeira devido à facilidade de execução e economia de materiais, porém a determinação da capacidade de resistência dessas ligações pode ser complexa e sujeita a erros, especialmente em processos manuais. A planilha proposta visa simplificar esse processo, permitindo que o usuário insira parâmetros específicos como o tipo de madeira, espessuras das peças conectadas, densidades e o diâmetro dos pregos. Com base nesses dados, a planilha calcula automaticamente as forças resistentes das ligações e apresenta os resultados de acordo com as exigências normativas, garantindo maior precisão e eficiência na análise. Este recurso se mostra relevante para engenheiros e profissionais da construção civil, proporcionando uma ferramenta prática para o dimensionamento de conexões em madeira, com potencial para minimizar o tempo de trabalho e reduzir riscos de falhas estruturais.

Palavras-chave: ABNT NBR 7190/22; resistência de ligações pregadas; estruturas de madeira; Excel; engenharia civil.

ABSTRACT

This study aims to develop an automated Excel spreadsheet to calculate the resistance of nailed and pinned connections in timber structures, in accordance with the ABNT NBR 7190:2022 standard. Timber connections with nails are widely used in construction due to their simplicity and cost-effectiveness, but determining their resistance capacity can be complex and prone to errors in manual calculations. The proposed spreadsheet streamlines this process by allowing users to input specific parameters such as wood type, density, thickness of the connected pieces, and nail diameter. Based on these inputs, the tool automatically calculates the resistant forces of the connections, strictly adhering to the requirements of the Brazilian standard. This approach not only reduces calculation errors but also enhances efficiency and accuracy in the analysis of timber connections. The development of this tool incorporates the theoretical principles outlined in the ABNT NBR 7190:2022 into automated formulas, ensuring reliable assessments of joint strength across varying material and geometric properties. By facilitating compliance with regulatory standards, this resource provides engineers, researchers, and construction professionals with a practical solution for the safe and efficient design of timber structures, promoting the broader adoption of timber in civil construction.

Keywords: ABNT NBR 7190/22; nailed connection resistance; timber structures; Excel; civil engineering.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de madeira têm desempenhado um papel fundamental na construção civil ao longo da história, sendo amplamente utilizadas devido à sua versatilidade e sustentabilidade. Sendo um material renovável, as características mecânicas da madeira permitem que ela possa ser aplicada em diferentes tipos de sistemas estruturais, desde pequenas construções até grandes projetos arquitetônicos. No entanto, o desempenho das estruturas de madeira está intimamente ligado à eficiência das suas ligações, uma vez que estas desempenham um papel crucial nas possibilidades de solução, na transmissão dos esforços e na estabilidade global da estrutura.

Entre os diversos tipos de ligações que podem ser utilizadas, as ligações pregadas destacam-se pela simplicidade de execução, baixo custo e eficiência em condições de cargas adequadas. Contudo, o dimensionamento dessas ligações exige cálculos precisos, baseados em normas técnicas, como a ABNT NBR 7190:2022 – *Projeto de Estruturas de Madeira*, e em dados geométricos e de resistência dos

materiais empregados. Diante do avanço das tecnologias digitais e da crescente necessidade de otimização nos processos de projeto, a automação assertiva de cálculos estruturais apresenta-se como solução indispensável para engenheiros e projetistas. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e apresentar uma planilha em Excel capaz de automatizar os cálculos de resistência e verificação de ligações pregadas, através da entrada dos dados definidos e necessários ao cálculo estabelecidos pelo usuário, e em conformidade com a ABNT NBR 7190:2022.

A proposta visa proporcionar maior celeridade e precisão na obtenção dos resultados necessários ao dimensionamento, reduzindo o tempo despendido em cálculos manuais, permitindo testes e verificações instantâneas e apresentando um complemento ao uso de softwares que podem exigir o dimensionamento e detalhamento em um tempo mais considerável para atingir os mesmos resultados

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Em ligações pregadas de madeira, existem restrições e recomendações de uso tanto para o tipo de madeira, quanto para o tipo de prego que será utilizado na ligação. Portanto, faz-se necessário o conhecimento dos materiais disponíveis e de uso permitido pela ABNT NBR 7190:2022. Os pregos utilizados na ligação não devem possuir diâmetro inferior a 3mm. Já o seu diâmetro máximo, é determinado através da comparação entre cinco vezes o diâmetro efetivo adotado, e a espessura da peça de madeira mais delgada da ligação, não devendo esta última, ser ultrapassada em hipótese alguma. Esta relação pode ser melhor entendida através da fórmula 1 e pela figura 1.

$$3\text{mm} \leq d_{ef} \leq \frac{t}{5} \quad (1)$$

Onde:

d_{ef} : diâmetro efetivo do prego [mm];

t : espessura da peça de madeira mais delgada na ligação [mm].

Em ligações pregadas, também é necessário realizar o pré-furo do prego na madeira, podendo variar seu diâmetro conforme o tipo da madeira, determinado pelas fórmulas 2 ou 3:

$$d_0 = 0,85 \times d_{ef} \quad (\text{Conífera}) \quad (2)$$

$$d_0 = 0,98 \times d_{ef} \quad (\text{Dicotiledônea}) \quad (3)$$

Onde:

d_0 : diâmetro do pré-furo [mm];

d_{ef} : diâmetro efetivo do prego [mm].

Figura 1 – Tabela de Pregos Comerciais

Tabela - Pregos

DESIGNAÇÃO	MEDIDAS EM MILÍMETROS		DESIGNAÇÃO	MEDIDAS EM MILÍMETROS	
	DIÂMETRO	COMPRIMENTO		DIÂMETRO	COMPRIMENTO
5x5	1,0	11,5	18x24	3,4	55,2
6x6	1,1	13,8	18x27	3,4	62,1
7x7	1,2	16,1	18x30	3,4	69,0
8x8	1,3	18,4	18x33	3,4	75,9
9x9	1,4	20,7	18x36	3,4	82,8
10x10	1,5	23,0	19x27	3,9	62,1
10x12	1,5	27,6	19x30	3,9	69,0
11x11	1,6	25,3	20x30	4,4	69,0
12x12	1,8	27,6	20x33	4,4	75,9
12x15	1,8	34,5	20x36	4,4	82,8
13x15	2,0	34,5	20x42	4,4	96,6
13x18	2,0	41,4	21x33	4,9	75,9
13x21	2,0	48,3	21x36	4,9	82,8
14x15	2,2	34,5	21x42	4,9	96,6
14x18	2,2	41,4	21x45	4,9	103,5
14x21	2,2	48,3	22x42	5,4	96,6
15x15	2,4	34,5	22x45	5,4	103,5
15x18	2,4	41,4	22x48	5,4	110,4
15x21	2,4	48,3	23x54	5,9	124,2
16x18	2,7	41,4	23x60	5,9	138,0
16x21	2,7	48,3	24x60	6,4	138,0
16x24	2,7	55,2	25x66	7,0	151,8
16x27	2,7	62,1	26x72	7,6	165,6
17x21	3,0	48,3	26x84	7,6	193,2
17x24	3,0	55,2	26x96	7,6	220,8
17x27	3,0	62,1			
17x30	3,0	69,0			

Fonte: TRINDADE, Christiane Areias. Notas de aula: estruturas de madeira., 4ª edição. 2022. 92p

A ABNT NBR 7190:2022 traz o uso de um coeficiente de modificação em diversos tipos de cálculo, inclusive para ligações pregadas. O coeficiente de modificação é determinado pela fórmula 4 e através das figuras 2, 3 e 4.

$$K_{mod} = K_{mod1} \times K_{mod2} \quad (4)$$

Onde:

K_{mod} : coeficiente de modificação;

K_{mod1} : coeficiente parcial de modificação devido a classe de carregamento e tipo de material empregado;

K_{mod2} : coeficiente parcial de modificação devido a classe de umidade e tipo de material empregado.

Figura 2 – Classes de Umidade

Tabela 1 – Classes de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio máxima da madeira U_{eq}
1	$U_{amb} \leq 65 \%$	12 %
2	$65 \% < U_{amb} \leq 75 \%$	15 %
3	$75 \% < U_{amb} \leq 85 \%$	18 %
4	$U_{amb} > 85 \%$ durante longos períodos	$\geq 25 \%$

Fonte: ABNT NBR 7190:2022

Figura 3 – Valores de k_{mod2} Tabela 5 – 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)	
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70 ^a	0,90

^a Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4).

Fonte: ABNT NBR 7190:2022.

Figura 4 – Classes de Carregamento (k_{mod1})Tabela 4 – 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 7190:2022.

A densidade característica da madeira é definida pela fórmula 5, e pelas figuras 5 ou 6:

Onde:

ρ_k : densidade característica da madeira [kg/m³];
 $\rho_{méd}$: densidade média da madeira [kg/m³].

$$\rho_k = \frac{\rho_{méd}}{1,2} \quad (5)$$

Figura 5 – Classes de Resistência – Dicotiledôneas

Tabela 2 – 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

NOTA 1 Os valores desta Tabela foram obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190-3.
 NOTA 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %.
 NOTA 3 Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na ABNT NBR 7190-3:2022, Tabela A.1.

Fonte: ABNT NBR 7190:2022.

Figura 6 – Classes de Resistência – Coníferas

Quadro 1.3. Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais

		Coníferas												Folhosas								
		Símbolo	C14	C15	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência (MPa)																						
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70	
Tração paralela	$f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42	
Tração perpendicular	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
Compressão paralela	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34	
Compressão perpendicular	$f_{c90,k}$	2,0	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	8,0	8,1	8,3	9,3	11	13,5	
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0	
Propriedades de rigidez (GPa)																						
Módulo de elasticidade a 0º médio	$E_{0,m}$	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	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8	
Módulo de elasticidade a 90º médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33	
Módulo de elasticidade Transversal médio	G_m	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25	
Densidade (kg/m³)																						
Densidade característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900	
Densidade Média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080	

Fonte: NBR 7190-1/2022

Fonte: ABNT NBR 7190:2022.

Para que seja possível estabilizar a ligação pregada, é necessário conhecer a resistência da madeira ao embutimento ($f_{e,k}$) em que a mesma está submetida:

Para pregos com diâmetro menor que 8mm:

- Sem pré-furo

$$f_{e,k} = 0,082 \times \rho_k \times d_{ef}^{-0,3} \quad (6)$$

- Com pré-furo

$$f_{e,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times d_{ef}) \times \rho_k \quad (7)$$

Para pregos com diâmetro maior que 8mm:

$$f_{e0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times d_{ef}) \times \rho_k \quad (8)$$

$$f_{e\alpha,k} = \frac{f_{e0,k}}{k_{90} \times \sin^2\alpha + \cos^2\alpha} \quad (9)$$

Onde:

$f_{e,k}$: resistência característica ao embutimento em qualquer direção em relação às fibras [MPa];

$f_{e0,k}$: resistência característica ao embutimento paralelo em relação às fibras [MPa];

$f_{e\alpha,k}$: resistência característica ao embutimento em uma direção inclinada de um ângulo α em relação às fibras [MPa];

ρ_k : densidade característica da madeira [kg/m³];

d_{ef} : diâmetro efetivo do prego [mm];

k_{90} : coeficiente que depende das fórmulas a seguir;
 α : ângulo da força aplicada em relação às fibras da madeira [°].

- Para coníferas:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \times d_{ef} \quad (10)$$

- Para painéis de LVL

$$k_{90} = 1,30 + 0,015 \times d_{ef} \quad (11)$$

- Para dicotiledôneas

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \times d_{ef} \quad (12)$$

Onde:

k_{90} : coeficiente usado para determinar $f_{e\alpha,k}$;

d_{ef} : diâmetro efetivo do prego [mm].

Foi mencionado anteriormente que a madeira está submetida ao embutimento na ligação. Com relação ao prego, o mesmo está submetido à flexão, e sua capacidade de resistência também é necessária.

$$M_{yk} = 0,3 \times f_{u,k} \times d_{ef}^{2,6} \quad (13)$$

Onde:

M_{yk} : momento resistente do pino metálico [N.mm];

$f_{u,k}$: resistência última característica à tração do aço do pino metálico [MPa];

d_{ef} : diâmetro efetivo do prego [mm].

Figura 7 – Especificação de Pinos Metálicos

Tabela 13 – Materiais usados em pinos metálicos

Especificação do pino metálico	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 ≥ mm d ≥ 3,54 mm
		-	600	3,55 ≥ mm d ≥ 4,99 mm
		-	490	5,00 ≥ mm d ≥ 10,00 mm
Parafuso passante padrão o ASTM	A307	250	415	d ≥ 3/8 pol ou d ≥ 10 mm
	A325	635	825	
	A490	895	1 035	
Parafuso passante padrão ISO 898-1	Classe 4.6	235	400	d ≥ 10 mm
	Classe 8.8	640	800	
	Classe 10.9	900	1 000	
Parafuso de rosca soberba		250	415	d ≥ 3/8 pol ou d ≥ 9,5 mm

Fonte: ABNT NBR 7190:2022.

A resistência da ligação está diretamente ligada a quantidade de pregos utilizados, à quantidade de seção de corte e à sua resistência característica, que já leva em consideração a densidade característica da madeira utilizada.

$$n_o = 8 + \frac{2}{3} \times (n - 8) \quad (14)$$

$$n_{ef} = \sum n_o \quad (15)$$

$$R_{k,ligação} = \sum R_{k,cada\ ligação} \quad (16)$$

$$R_k = F_{V,Rk} \times n_{sp} \times n_{ef} \quad (17)$$

$$R_d = K_{mod} \times \frac{R_k}{\gamma_{lig}} \quad (18)$$

Onde:

n_o : número convencional de pinos em cada linha;

n_{ef} : número efetivo de pinos por ligação;

R_k : resistência característica da ligação [N];

$F_{V,Rk}$: resistência característica de um prego [N];

n_{sp} : quantidade de seções de corte por prego;

R_d : valor de cálculo da resistência da ligação [N];

K_{mod} : coeficiente de modificação;

γ_{lig} : 1,4.

Para determinar a resistência característica do prego, a ABNT NBR 7190:2022 apresenta 10 modos de cálculo que são utilizados conforme a situação de corte, sendo escolhido o de menor resultado. Uma interpretação dos seus modos de falha pode ser encontrada na planilha auxiliar presente na pasta de trabalho do Excel.

• Para pinos em situação de corte simples:

$$F_{v,Rk1} = f_{e1,k} \times t_1 \times d_{ef} \quad (19)$$

$$F_{v,Rk2} = f_{e1,k} \times t_2 \times d_{ef} \times \beta \quad (20)$$

$$F_{v,Rk3} = \frac{f_{e1,k} \times t_1 \times d_{ef}}{1 + \beta} \times \left[\sqrt{\beta + 2 \times \beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \times \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \times \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (21)$$

$$F_{v,Rk4} = 1,05 \times \frac{f_{e1,k} \times t_1 \times d_{ef}}{2 + \beta} \times \left[\sqrt{2 \times \beta(1 + \beta) + \frac{4 \times \beta(2 + \beta) \times M_{y,k}}{f_{e1,k} \times d_{ef} \times t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (22)$$

$$F_{v,Rk5} = 1,05 \times \frac{f_{e1,k} \times t_2 \times d_{ef}}{1 + 2 \times \beta} \times \left[\sqrt{2 \times \beta^2(1 + \beta) + \frac{4 \times \beta(1 + 2 \times \beta) \times M_{y,k}}{f_{e1,k} \times d_{ef} \times t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (23)$$

$$F_{v,Rk6} = 1,15 \times \sqrt{\frac{2 \times \beta}{1 + \beta}} \times \sqrt{2 \times M_{y,k} \times f_{e1,k} \times d_{ef}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (24)$$

- Para pinos em situação de corte duplo:

$$F_{v,Rk1} = f_{e1,k} \times t_1 \times d_{ef} \quad (25)$$

$$F_{v,Rk2} = 0,5 \times f_{e1,k} \times t_2 \times d_{ef} \times \beta \quad (26)$$

$$F_{v,Rk3} = 1,05 \times \frac{f_{e1,k} \times t_1 \times d_{ef}}{2 + \beta} \times \left[\sqrt{2 \times \beta \times (1 + \beta) + \frac{4 \times \beta \times (2 + \beta) \times M_{y,k}}{f_{e1,k} \times d_{ef} \times t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (27)$$

$$F_{v,Rk4} = 1,15 \times \sqrt{\frac{2 \times \beta}{1 + \beta}} \times \sqrt{2 \times M_{y,k} \times f_{e1,k} \times d_{ef}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (28)$$

$$\beta = \frac{f_{e1,k}}{f_{e2,k}} \quad (29)$$

Onde:

t_1 .: espessura da peça de madeira 1 [mm];
 t_2 .: espessura da peça de madeira 2 (ou t_p , caso $t_p < t_2$ em corte simples) [mm];
 $f_{e1,k}$: resistência característica ao embutimento [MPa];
 d_{ef} : diâmetro efetivo do prego [mm];

β : relação entre resistências ao embutimento das peças 1 e 2;
 $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$: efeito de confinamento;
 $M_{y,k}$: momento resistente do pino metálico [N.mm].

3. MÉTODO

O desenvolvimento da planilha exigiu uma integração criteriosa entre células, fórmulas e parâmetros, de forma a garantir que cada resultado fosse calculado e apresentado automaticamente. Portanto, as fórmulas presentes nas células foram configuradas para retornar os resultados através de verificações adicionais, testando as condições e restrições estabelecidas pelas normas técnicas. Logo, essas verificações consideram as circunstâncias específicas de cada situação, com base nos parâmetros normativos e nas escolhas realizadas pelo usuário, permitindo alertas e validações que direcionam o preenchimento correto das próximas informações.

A estrutura da planilha foi organizada em dois tipos de campos: alteráveis e inalteráveis. Os campos alteráveis, representados por células brancas, permitem que o usuário insira dados manualmente ou selecione opções por meio de caixas de seleção (listas suspensas ou botões de controle). Já os campos inalteráveis correspondem aos resultados calculados automaticamente com base nas entradas feitas pelo

usuário, e são destacados com cores específicas conforme indicado na legenda presente no final planilha para facilitar a identificação.

Para garantir a correspondência exata das fórmulas descritas na norma, foram empregadas fórmulas intrínsecas e de estrutura simples no Excel, como SE, SEERRO, E, PROCV e MÍNIMO. Apesar da simplicidade estrutural, as fórmulas tiveram que ser otimizadas para atender à complexidade do dimensionamento e das verificações normativas de maneira eficiente. Durante a etapa de validação e testes, foi utilizado auxílio de inteligência artificial (IA) para assegurar que os cálculos estivessem corretos e em conformidade com a norma. A IA também desempenhou papel fundamental na simplificação das fórmulas, tornando-as mais didáticas e fáceis de compreender, além de permitir ajustes mais ágeis, caso necessário.

A integração entre as fórmulas e o layout da planilha foi projetada para oferecer uma interface intuitiva e

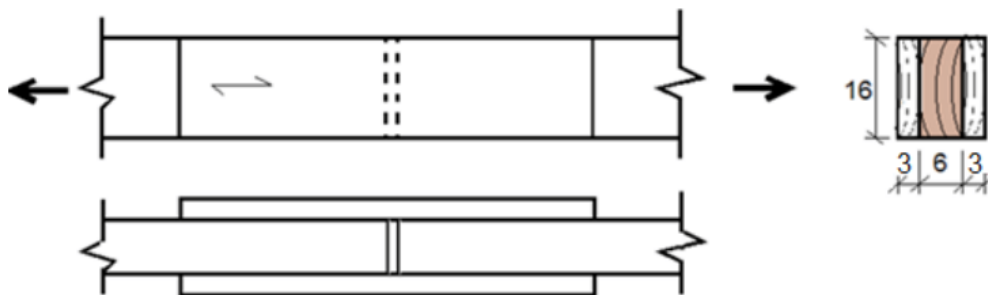
progressiva ao usuário, minimizando erros de preenchimento e assegurando resultados confiáveis para diferentes cenários de análise e dimensionamento. Para que o uso da planilha seja ainda mais imersivo, foi criada uma planilha auxiliar localizada nas abas inferiores do mesmo arquivo contendo tabelas para consulta e exemplificações dos modos de falhas, todos baseados na ABNT NBR 7190/22.

Para que fosse possível validar os resultados, foram utilizados como parâmetro de comparação os valores obtidos em exercício feito manualmente pelo docente

responsável pela disciplina de Estruturas de Madeira, pertencente à grade curricular do curso de Engenharia Civil da UFMS. O esquema do exercício está apresentado acima da figura 8.

Exercício: Dimensione e detalhe a ligação da barra de 6 cm x 16 cm de madeira classe D40 dicotiledôneas, para suportar uma força de tração de cálculo de 40 kN, utilizando pregos, cuja especificação deve ser feita a partir da tabela. A peça faz parte de uma estrutura que será construída em uma região com umidade relativa do ar em torno de 70%.

Figura 8 – Esquema do Exercício Proposto



Fonte: Docente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos por meio da planilha elaborada e por meio de cálculos manuais para validação da planilha. Serão apresentados os resultados considerando as situações de corte simples e corte duplo.

4.1. Resultados para situação de corte duplo (Cálculo Manual)

Os resultados a seguir foram obtidos por meio de cálculo manual. As figuras 9 e 10 trazem o detalhe desta ligação.

$$t_1 = 30\text{mm};$$

$$t_2 = 60\text{mm};$$

$$d_{ef\ min} = 3\text{mm};$$

$$d_{ef} \leq \frac{t}{5} \therefore d_{ef} \leq 6\text{mm};$$

Adotado prego 23 x 54 para situação de corte duplo, onde $d_{ef} = 5,9\text{mm}$ e $l = 124,2\text{mm}$;

$$f_{u,k} = 490\text{MPa};$$

$$M_{y,k} = 14.843,40\text{ N}\cdot\text{mm};$$

$$\text{Madeira D40} \rightarrow \rho_{med} = 750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \therefore \rho_k = 625 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$$

$$f_{e1,k} = f_{e2,k} = 48,23\text{ Mpa};$$

$$F_{v,Rk1} = 8.540\text{ N};$$

$$F_{v,Rk2} = 8.540\text{ N};$$

$$F_{v,Rk3} = 3.487\text{ N};$$

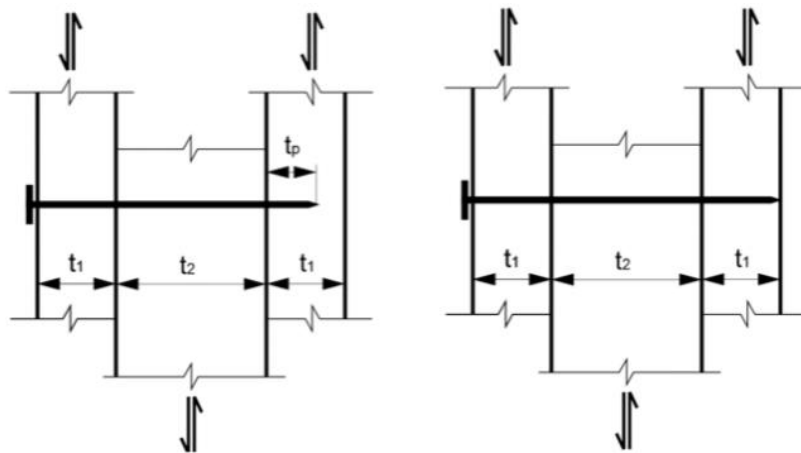
$$F_{v,Rk4} = 3.342\text{ N (Menor valor de } F_{v,Rk});$$

$$n_{ef} = 14\text{ pregos};$$

$$R_K = 93,5760\text{ kN};$$

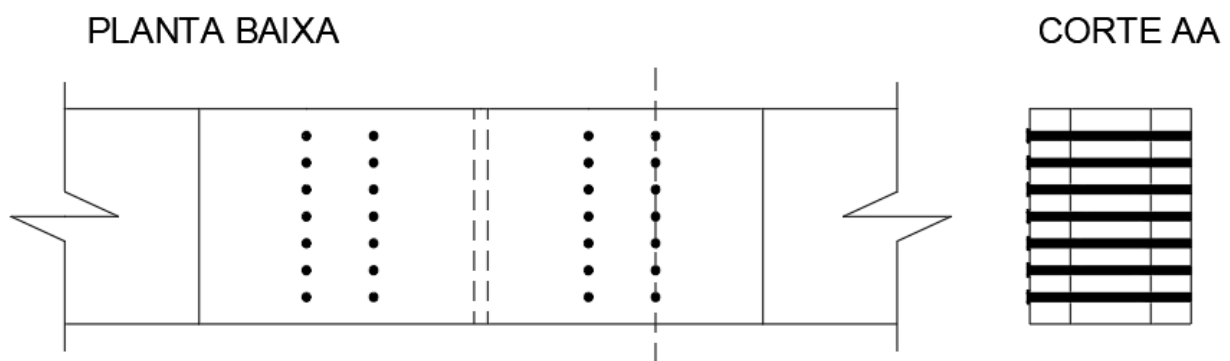
$$R_d = 42,1092\text{ kN}.$$

Figura 9 – Exemplo de Corte Duplo em Ligação de Madeira



Fonte: ABNT NBR 7190:2022.

Figura 10 – Detalhe em Corte Duplo



Fonte: Autor (2024).

4.2. Resultados para situação de corte duplo (Cálculo Automatizado)

Para atingir os resultados, em ambas situações de corte, o preenchimento da planilha tem início através das seguintes seleções:

- Grupo da Madeira;
- Classe de Umidade (Conforme figura 2);
- Classe de Resistência (Conforme figura 5 ou 6. Em casos de um único tipo de madeira utilizado, a classe de resistência 1 e 2 devem ser iguais);
- Classe de Carregamento e Tipo de Madeira (Conforme figura 4);
- Existência de pré-furo (Obrigatório para pregos com Diâmetro > 8mm).

Na sequência, deve ser preenchido/escolhido:

- Diâmetro do prego (Conforme figura 1);

- Resistência $f_{u,k}$ (Conforme figura 7);
- Tipo de corte;
- Comprimento do prego (Conforme figura 1);
- Espessura da madeira t_1 ;
- Espessura da madeira t_2 ;
- Ângulo 1 de solicitação dos esforços em relação às fibras (se houver);
- Ângulo 2 de solicitação dos esforços em relação às fibras (se houver);
- Utilização de painéis LVL;
- Efeito de confinamento $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (se houver);
- Quantidade de pregos presentes em cada linha (Para apenas uma face em caso de corte simples que possui pregos nos dois lados da ligação)
- Esforço de solicitação;

Ao seguir as etapas de preenchimento, têm-se a planilha montada com todos os resultados calculados automaticamente. As figuras 11 e 12 apresentam os dados inseridos e os resultados obtidos para a situação de corte duplo.

Figura 11 – Planilha Desenvolvida – Corte Duplo (1º Trecho)

Grupo da Madeira	Informe o ϕ do prego (mm)
Dicotiledônea	5,9
Classe de Umidade	OK!
2	ϕ do Pré-furo (mm)
Classe de Resistência (Madeira 1)	5,782
D40	Informe a Resistência $f_{u,k}$ (MPa)
Classe de Resistência (Madeira 2)	490
D40	OK!
Classe de Carregamento	Escolha o tipo de corte:
Longa Duração	Duplo
Tipo de Madeira	Comprimento de prego cabeça cônica (mm)
Serrada/Laminada/Colada/Compensada	124,2
Kmod1	Informe o valor de t1 (mm)
0,70	30
Kmod2	Informe o valor de t2 (mm)
0,90	60
Kmod	Valor de tp (mm)
0,63	34,2
ρ_{k1} (kg/m³)	tp deve ser = t1 (30 mm) ou está ultrapassando a ligação
625,00	Ângulo 1 da solicitação dos esforços (°)
ρ_{k2} (kg/m³)	0,00
625,00	Ângulo 2 da solicitação dos esforços (°)
Possui Pré-Furo?	0,00
Sim	

Fonte: Autor (2024).

Figura 12 – Planilha Desenvolvida – Corte Duplo (2º Trecho)

Resist. ao embutimento característica $f_{e1,k}$ (MPa)	LINHA	QTDE PREGOS	$F_{v,Rk1}$ (N)
48,23	1	2	8536,05
Resist. ao embutimento característica $f_{e2,k}$ (MPa)	2	2	$F_{v,Rk2}$ (N)
48,23	3	2	8536,05
Serão utilizados Painéis LVL?	4	2	$F_{v,Rk3}$ (N)
Não	5	2	3486,32
k90	6	2	$F_{v,Rk4}$ (N)
0,99	7	2	3342,31
Resist. ao embutimento inclinado $f_{e\alpha,k1}$ (MPa)	8		$F_{v,Rk5}$ (N)
do prego é menor que 8mm ou $\alpha = 0$	9		As ligações são de corte de duplo
Resist. ao embutimento inclinado $f_{e\alpha,k2}$ (MPa)	10		$F_{v,Rk6}$ (N)
do Pregos é menor que 8mm ou $\alpha = 0$	11		As ligações são de corte de duplo
O valor de Beta é:	12		Resistência Característica da Ligação R_k (kN)
1,00	13		93,58
Momento Resistente do Pino (M_{yk}) em [N.mm]	14		Resistência da Ligação R_d (kN)
14843,37	15		42,11
Quantidade de seções de corte por pino (n_{sp})	nef	14,00	Esforo de Solicitação (kN)
2			40,00
Caso tenha, informe $F_{ax,RK}$			A ligação é resistente ao esforço!
0,00			

LEGENDA	COR
PREENCHIMENTO AUTOMÁTICO	
CAMPO A SER PREENCHIDO/SELECIONADO	BRANCO
REVISAR	
MENOR VALOR	
RESULTADO FINAL	

Fonte: Autor (2024).

4.3. Resultados para situação de corte simples (Cálculo Manual)

Os resultados a seguir foram obtidos por meio de cálculo manual. As figuras 13 e 14 trazem o detalhe desta ligação.

$$t_1 = 30mm;$$

$$t_2 = 60mm;$$

$$d_{ef\ min} = 3mm;$$

$$d_{ef} \leq \frac{t}{5} \therefore d_{ef} \leq 6mm;$$

Adotado prego 18 x 33 para situação de corte simples, onde $d_{ef} = 3,4mm$ e $l = 75,9mm$;

$$f_{u,k} = 635\ MPa;$$

$$M_{yk} = 4.589\ N.\ mm;$$

$$\text{Madeira D40} \rightarrow \rho_{med} = 750\ \frac{kg}{m^3} \therefore \rho_k = 625\ \frac{kg}{m^3};$$

$$f_{e1,k} = f_{e2,k} = 49,51\ MPa;$$

$$F_{v,Rk1} = 5.049,80\ N;$$

$$F_{v,Rk2} = 7.726,10\ N;$$

$$F_{v,Rk3} = 2.744,60\ N;$$

$$F_{v,Rk4} = 1.924,50\ N;$$

$$F_{v,Rk5} = 2.808,10\ N;$$

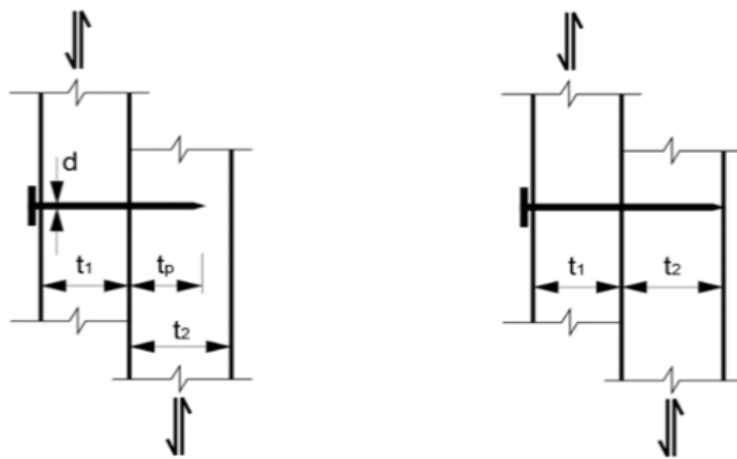
$$F_{v,Rk6} = 1.429,40\ N\ (\text{Menor valor de } F_{v,Rk});$$

$$n_{ef} = 64\ pregos;$$

$$R_k = 91,4816\ kN;$$

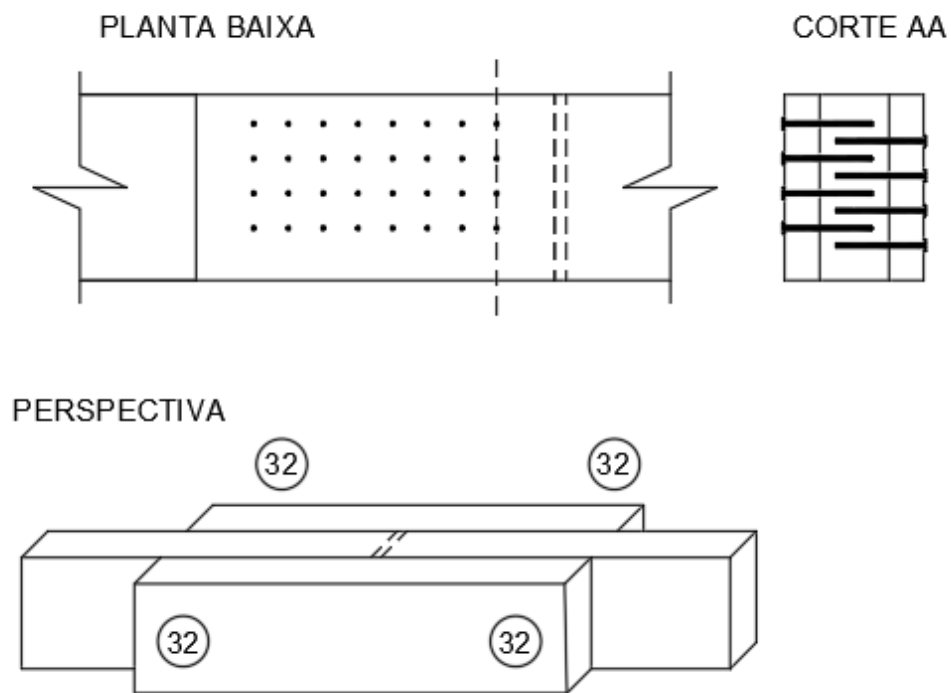
$$R_d = 41,1667\ kN.$$

Figura 13 – Exemplo de Corte Simples em Ligação de Madeira



Fonte: ABNT NBR 7190:2022.

Figura 14 – Exemplo em Corte Simples



Fonte: Autor (2024).

4.4. Resultados para situação de corte simples (Cálculo Manual)

Ao realizar o preenchimento dos dados de maneira análoga ao item 4.2, têm-se a planilha montada com todos os resultados calculados automaticamente. As figuras 11 e 12 apresentam os dados inseridos e os resultados obtidos para a situação de corte simples.

Figura 15 – Planilha Desenvolvida – Corte Simples (1º Trecho)

Grupo da Madeira	Informe o α do prego (mm)
Dicotiledônea	3,4
Classe de Umidade	OK!
2	α do Pré-furo (mm)
Classe de Resistência (Madeira 1)	3,332
D40	Informe a Resistência f_u,k (MPa)
Classe de Resistência (Madeira 2)	635
D40	OK!
Classe de Carregamento	Escolha o tipo de corte:
Longa Duração	Simples
Tipo de Madeira	Comprimento de prego cabeça cônica (mm)
Serrada/Laminada Colada/Compensada	75,9
Kmod1	Informe o valor de t1 (mm)
0,70	30
Kmod2	Informe o valor de t2 (mm)
0,90	60
Kmod	Valor de t_p (mm)
0,63	45,9
ρ_{k1} (kg/m³)	OK!
625,00	Ângulo 1 da solicitação dos esforços (°)
ρ_{k2} (kg/m³)	0,00
625,00	Ângulo 2 da solicitação dos esforços (°)
Possui Pré-Furo?	0,00
Sim	

Fonte: Autor (2024).

Figura 16 – Planilha Desenvolvida – Corte Simples (2º Trecho)

Resist. ao embutimento característica $f_{e1,k}$ (MPa)	LINHA	QTDE PREGOS	F_v, R_{k1} (N)
49,51	1	8	5049,77
Resist. ao embutimento característica $f_{e2,k}$ (MPa)	2	8	F_v, R_{k2} (N)
49,51	3	8	7726,14
Serão utilizados Painéis LVL?	4	8	F_v, R_{k3} (N)
Não	5	8	2744,55
k90	6	8	F_v, R_{k4} (N)
0,95	7	8	1924,55
Resist. ao embutimento inclinado $f_{e\alpha,k1}$ (MPa)	8	8	F_v, R_{k5} (N)
do prego é menor que 8mm ou $\alpha = 0$	9		2808,13
Resist. ao embutimento inclinado $f_{e\alpha,k2}$ (MPa)	10		F_v, R_{k6} (N)
do prego é menor que 8mm ou $\alpha = 0$	11		1429,41
O valor de Beta é:	12		Resistência Característica da Ligação R_k (kN)
1,00	13		91,4825
Momento Resistente do Pino (M_{yk}) em [N.mm]	14		Resistência da Ligação R_d (kN)
4589,23	15		41,1671
Quantidade de seções de corte por pino (nsp)	nef	64,00	Esforo de Solicitação (kN)
1			40,00
Caso tenha, informe F_{α}, R_k			A ligação é resistente ao esforço!
0,00			

LEGENDA	COR
PREENCHIMENTO AUTOMÁTICO	
CAMPO A SER PREENCHIDO/SELECIONADO	BRANCO
REVISAR	
MENOR VALOR	
RESULTADO FINAL	

Fonte: Autor (2024).

4.5. Exemplificação de Alertas ou Não Cumprimento da ABNT NBR 7190:2022.

Como mencionado em 3. *Método*, a planilha foi elaborada respeitando as condições da ABNT NBR 7190:2022, e, portanto, há alertas que serão emitidos caso algum campo seja preenchido de modo a não atender os critérios da mesma, as figuras 17 e 18 trazem exemplos desses alertas:

Figura 17 – Planilha Desenvolvida – Exemplo de Alerta em Corte Duplo (1º Trecho)

Grupo da Madeira	Dicotiledônea	Informe o nº do prego (mm)	2
Classe de Umidade	2	do prego não pode ser inferior a 3mm	
Classe de Resistência (Madeira 1)	D40	do Pré-furo (mm)	
Classe de Resistência (Madeira 2)	D40	do prego não pode ser inferior a 3mm	
Classe de Carregamento	Longa Duração	Informe a Resistência fu,k (MPa)	635
Tipo de Madeira	Serrada/Laminada Colada/Compensac	do prego não pode ser inferior a 3mm	
Kmod1	0,70	Escolha o tipo de corte:	Duplo
Kmod2	0,90	Comprimento de prego cabeça cônica (mm)	100
Kmod	0,63	Informe o valor de t1 (mm)	30
ρk1 (kg/m³)	625,00	Informe o valor de t2 (mm)	60
ρk2 (kg/m³)	625,00	Valor de tp (mm)	10
Possui Pré-Furo?	Sim	tp deve ser pelo menos igual a 24 mm	
		Ângulo 1 da solicitação dos esforços (°)	0,00
		Ângulo 2 da solicitação dos esforços (°)	0,00

Fonte: Autor (2024).

Figura 18 – Planilha Desenvolvida – Exemplo de Alerta em Corte Duplo (2º Trecho)

Resist. ao embutimento característica $f_{e1,k}$ (MPa)	LINHA	QTDE PREGOS	$F_{v,Rk1}$ (N)
50,23	1	2	3013,50
Resist. ao embutimento característica $f_{e2,k}$ (MPa)	2	2	$F_{v,Rk2}$ (N)
50,23	3	2	3013,50
Serão utilizados Painéis LVL?	4	2	$F_{v,Rk3}$ (N)
Não	5	2	1094,77
k90	6	2	$F_{v,Rk4}$ (N)
Do prego não pode ser inferior a 3mm	7	2	553,95
Resist. ao embutimento inclinado $f_{e\alpha,k1}$ (MPa)	8		$F_{v,Rk5}$ (N)
do prego é menor que 8mm ou $\alpha = 0$	9		As ligações são de corte de duplo
Resist. ao embutimento inclinado $f_{e\alpha,k2}$ (MPa)	10		$F_{v,Rk6}$ (N)
do Prego é menor que 8mm ou $\alpha = 0$	11		As ligações são de corte de duplo
O valor de Beta é:	12		Resistência Característica da Ligação R_k (kN)
1,00	13		15,5107
Momento Resistente do Pino (M_{yk}) em [N.mm]	14		Resistência da Ligação R_d (kN)
1154,98	15		6,9798
Quantidade de seções de corte por pino (nsp)	nef	14,00	Esforço de Solicitação (kN)
2			40,00
Caso tenha, informe $F_{ax,RK}$			A ligação não resiste ao esforço!
0,00			

LEGENDA	COR
PREENCHIMENTO AUTOMÁTICO	
CAMPO A SER PREENCHIDO/SELECIONADO	BRANCO
REVISAR	
MENOR VALOR	
RESULTADO FINAL	

Fonte: Autor (2024).

4.6. Discussão

Para facilitar a validação e comparar os resultados obtidos para ambas as situações de corte, simples e duplo, foram montadas as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Tabela de Resultados em Corte Duplo

	ρ_k ($\frac{kg}{m^3}$)	$f_{e1,k}$ (MPa)	M_{yk} (N.mm)	$F_{v,Rk1}$ (N)	$F_{v,Rk2}$ (N)	$F_{v,Rk3}$ (N)	$F_{v,Rk4}$ (N)	R_K (kN)	R_d (kN)
Manual	625	48,23	14.843,40	8.540,00	8.540,00	3.487,00	3.342,00	93,5760	42,1092
Planilha	625	48,23	14.843,37	8.536,05	8.536,05	3.486,32	3.342,31	93,5847	42,1131

Fonte: Autor (2024).

Tabela 2 – Tabela de Resultados em Corte Simples

	ρ_k ($\frac{kg}{m^3}$)	$f_{e1,k}$ (MPa)	M_{yk} (N.mm)	$F_{v,Rk1}$ (N)	$F_{v,Rk2}$ (N)	$F_{v,Rk3}$ (N)	$F_{v,Rk4}$ (N)	$F_{v,Rk5}$ (N)	$F_{v,Rk6}$ (N)	R_K (kN)	R_d (kN)
Manual	625	49,51	4.589,00	5.049,80	7.726,10	2.744,60	1.924,50	2.808,10	1.429,40	91,4816	41,1667
Planilha	625	49,51	4.589,23	5.049,77	7.726,14	2.744,55	1.924,55	2.808,13	1.429,41	91,4825	41,1671

Fonte: Autor (2024).

Com base nos valores apresentados nas tabelas 1 e 2, pode-se observar que os resultados obtidos pela planilha foram consistentes em relação aos cálculos esperados, tanto para situação de corte duplo, quanto para situação de corte simples. As eventuais diferenças verificadas restringem-se à quantidade de casas decimais ou aos critérios de arredondamento utilizados, os quais não comprometem a precisão ou a funcionalidade da ferramenta. Esses aspectos evidenciam que a planilha cumpre integralmente o propósito para o qual foi desenvolvida, fornecendo resultados confiáveis e alinhados às diretrizes normativas aplicáveis.

Além disso, a automação dos cálculos através do Excel se mostrou eficaz, garantindo agilidade e minimizando erros humanos ao realizar os processos de dimensionamento e verificação. Essa análise reforça a validade da metodologia adotada e sua adequação para aplicações práticas no dimensionamento de ligações pregadas em estruturas de madeira.

5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme discutido no item 4.3, é possível concluir que a planilha desenvolvida cumpre de maneira precisa e eficiente o objetivo proposto, retornando valores que atendem às condições estabelecidas pela ABNT NBR 7190:2022. A ferramenta se mostrou confiável na automação dos cálculos necessários para a verificação de resistência em ligações pregadas, proporcionando praticidade e rapidez ao usuário.

Entretanto, é importante destacar algumas limitações intrínsecas à funcionalidade da planilha. Uma delas refere-se à impossibilidade de determinar automaticamente o número efetivo de pregos a serem utilizados, bem como sua distribuição em termos de linhas e posições específicas. Este tipo de cálculo é essencial em cenários práticos onde, ao se conhecer o esforço de solicitação, busca-se otimizar a quantidade e a distribuição dos pregos, garantindo o melhor custo-benefício e eficiência estrutural.

Apesar dessa limitação, a planilha compensa por sua versatilidade, permitindo ao usuário ajustar e testar diferentes combinações de valores com agilidade. Essa funcionalidade possibilita a análise de diversas configurações até que se atinja a resistência de cálculo desejada. Ademais, a planilha permite a inserção manual da quantidade de pregos por linha, proporcionando uma abordagem iterativa para verificar se os resultados de resistência atendem às necessidades do projeto.

Embora a planilha não substitua completamente uma análise mais aprofundada ou softwares especializados para projetos mais complexos, ela se estabelece como uma ferramenta robusta e de grande utilidade no dimensionamento preliminar de ligações em estruturas de madeira. Seu uso contribui para a economia de tempo e para a redução de erros humanos, além de fornecer suporte confiável para decisões técnicas.

6. AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela dádiva do conhecimento e pela oportunidade de viver o aprendizado nesta experiência única de formação acadêmica e pessoal. À Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), pela oferta do curso de Engenharia Civil, que figura entre os melhores do país, e pela estrutura e ambiente propício ao desenvolvimento acadêmico e profissional. Ao Curso de Engenharia Civil da UFMS, por proporcionar não apenas conhecimentos técnicos fundamentais para o exercício da profissão, mas também experiências que agregaram valores importantes à minha vida. À Prof^{ra} Dra. Christiane Areias Trindade, por sua orientação dedicada, disponibilidade e contribuição decisiva no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso. Aos meus pais, Wagner e Neilsa, e ao meu irmão Alisson, por serem o alicerce da minha jornada, oferecendo suporte incondicional, incitamento constante e uma estrutura familiar indispensável na realização deste propósito. À minha companheira Ana Júlia, pela compreensão, incentivo e carinho, que foram fundamentais para que eu pudesse manter o equilíbrio emocional e resiliência ao longo desta trajetória acadêmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190-1: projeto de estruturas de madeira. Parte 1: critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6627: pregos comuns e arestas de aço para madeiras. Rio de Janeiro, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5589: arame de aço de baixo teor de carbono - requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- TRINDADE, Christiane Areias. Notas de aula: estruturas de madeira. Campo Grande, 4ª edição. 2022. 92p.