

Desempenho Mecânico de Treliças de Madeira em Coberturas:

Análise Howe, Pratt e Belga

André de Souza Campisi¹, Lauren Karoline De Sousa Gonçalves²

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

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

Resumo:

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho estrutural de três tipologias de treliças de madeira Howe, Pratt e Belga aplicadas à cobertura de um galpão, por meio de dimensionamentos e simulações computacionais. As análises foram realizadas conforme os critérios das normas brasileiras, com verificação dos estados limite último (ELU) e de serviço (ELS). O estudo considerou a comparação entre as tipologias originais, bem como variações relativas às seções dos elementos, à classe de resistência da madeira e à modificação geométrica das treliças. Os resultados mostraram que a configuração original da treliça Howe apresentou o desempenho melhor, enquanto as alterações de rigidez e geometria tornaram os elementos comprimidos das treliças Pratt e Belga mais suscetíveis à instabilidade. A utilização dos softwares Ftool e VisualVentos permitiu obter os valores dos esforços e deslocamentos, permitindo avaliar os cenários propostos e concluir que a treliça tipo Howe é a alternativa mais eficiente entre as analisadas.

Palavras-chave: *Madeira, Tipos de treliças, Dimensionamento estrutural, Análise de desempenho.*

Abstract:

This study aims to analyze the structural performance of three wooden truss typologies Howe, Pratt, and Belg ianapplied to the roof of an industrial shed, through structural design and computational simulations. The analyses followed the criteria established by ABNT standards NBR 7190:2022, NBR 6120:2019, and NBR 8681:2004, with verification of the ultimate (ULS) and serviceability (SLS) limit states. The study compared the original configurations and evaluated the influence of variations in cross-sections, wood strength class, and geometric modifications of the trusses. The results showed that the original Howe truss presented the most balanced and stable performance,

while reductions in stiffness and geometric simplifications made the compressed elements of the Pratt and Belgian trusses more susceptible to instability. The use of Ftool and VisualVentos software proved essential for accurately determining internal forces and displacements, allowing a consistent assessment of the proposed structural scenarios. It is concluded that proper structural design, combined with computational tools, supports safer engineering decisions, with the Howe truss standing out as the most efficient configuration among those analyzed.

Keywords: *Timber, Type of trusses, Structural design, Performance analysis*

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material estrutural amplamente disponível e, quando manejada de forma responsável, pode se tornar uma alternativa sustentável e competitiva para a construção civil. Essa perspectiva se reforça tanto pelos benefícios econômicos e ambientais que a madeira oferece, quanto pelas suas propriedades mecânicas, que a tornam uma alternativa eficiente e vantajosa em diversas aplicações estruturais (CORREIA, 2009).

Entre as diversas soluções estruturais disponíveis, as treliças de madeira destacam-se pelo uso recorrente em coberturas, uma vez que possibilitam vencer grandes vãos com menor utilização de material, conferindo menor peso próprio. No entanto, modificações na geometria ou na configuração dos elementos internos dessas treliças podem influenciar de forma significativa o desempenho global do sistema, tornando indispensáveis análises rigorosas relacionadas à segurança, estabilidade e aos limites de deformação admissíveis (MEDEIROS, 2010).

A utilização das ferramentas computacionais tem permitido realizar análises estruturais de maneira eficiente e precisa, pois, é possível avaliar o desempenho de múltiplos cenários durante a concepção do projeto antes do início da construção, promovendo o uso racional dos recursos e garantindo o atendimento às normas técnicas em vigor (FUZARO, 2019).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento estrutural de uma cobertura em treliças de madeira por meio de modelagem computacional, avaliando o desempenho das tipologias Howe, Pratt e Belga, modelos dimensionados conforme as normas, foram desenvolvidas três configurações estruturais com as mesmas seções transversais, permitindo a comparação direta entre elas quanto ao

atendimento aos Estados Limites Último (ELU) e de Serviço (ELS), bem como à eficiência estrutural resultante de cada geometria.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira é um dos materiais estruturais mais antigos utilizados pelo ser humano, com grande importância no desenvolvimento da arquitetura e da engenharia civil. Seu uso evoluiu a partir do reconhecimento de suas qualidades naturais e da superação de limitações. Atualmente, diversas espécies são empregadas na construção, classificadas em dois grupos principais: madeiras duras, de crescimento lento e alta qualidade, como Peroba, Ipê e Carvalho; e madeiras macias, de crescimento rápido, como o Pinheiro-do-Paraná e o Pinheiro Europeu (TENÓRIO, 2016).

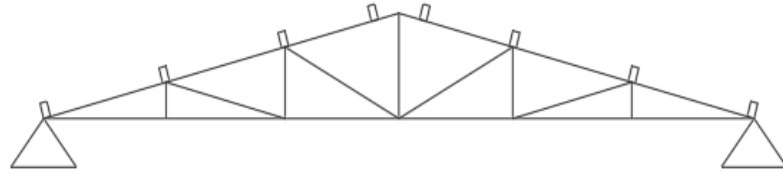
As treliças de madeira são amplamente utilizadas em coberturas devido à sua eficiência estrutural e capacidade de vencer grandes vãos com baixo peso próprio. O comportamento dessas estruturas depende da tipologia adotada, das propriedades mecânicas da madeira e do atendimento aos critérios normativos de segurança, estabilidade e deformabilidade, conforme estabelecido pela ABNT NBR 7190-1:2022 (BALOTIN, 2025).

Entre as principais características físicas da madeira que influenciam seu uso na construção civil, destacam-se: umidade, densidade, retratibilidade, resistência ao fogo, durabilidade natural e resistência química (TEREZO, 2015). Adicionalmente, a resistência da madeira frente à ação de agentes biológicos, como fungos e insetos, bem como às variações climáticas, é um fator determinante para seu desempenho na construção civil. Para minimizar esses efeitos e prolongar a vida útil do material, são aplicados tratamentos preservativos e adotadas técnicas de secagem controlada, que ajudam a manter a estabilidade dimensional e a integridade da madeira em diferentes condições ambientais (SANTOS *et al.*, 2020).

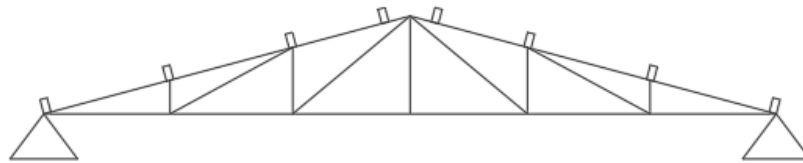
A escolha do elemento madeira para uma cobertura está ligado a facilidade com que formas usuais treliçadas podem ser fabricadas e montadas em madeira. A industrialização dos sistemas construtivos, especialmente com a pré-fabricação de treliças, vem se consolidando como uma tendência na construção civil brasileira. Essa prática contribui para a agilidade na montagem em obra e promove maior padronização e qualidade nas estruturas de madeira (CALIL JÚNIOR; DIAS, 2005).

A partir disso destacam três tipos de treliças planas comumente utilizadas em telhados, são elas, Pratt, Howe e Belga, que são os modelos analisados no trabalho, mostrado na (Figura 1).

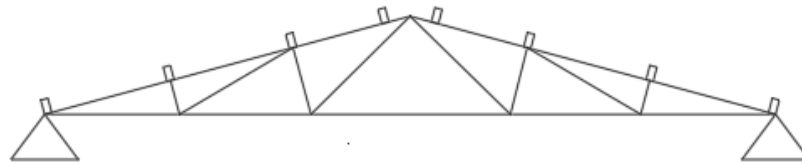
Figura 1: Tipos comuns de treliça para telhados: a) Howe; b) Pratt; c) Belga



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor, 2025

3. METODOLOGIA

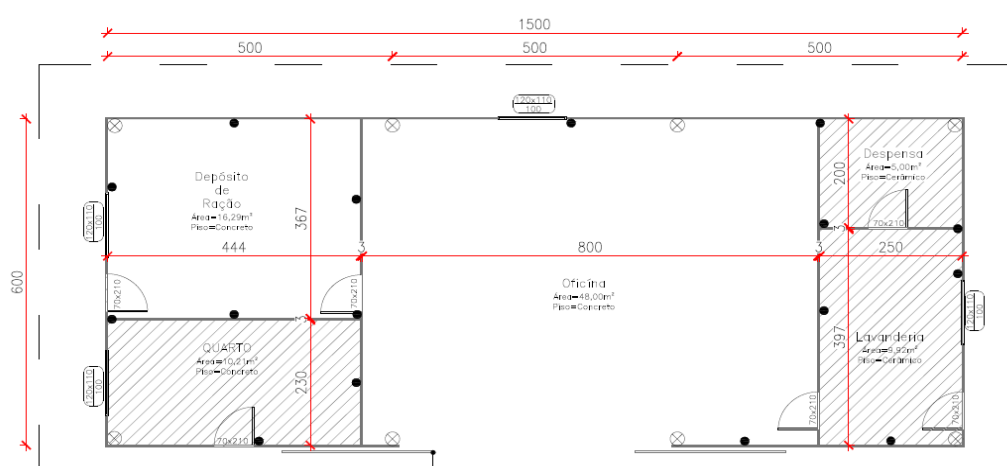
Este trabalho consiste em dimensionar a estrutura de uma cobertura de galpão variando-se o tipo de treliça em Pratt, Howe e Belga. O objetivo do dimensionamento é analisar, utilizando ferramentas de simulações computacionais, o desempenho estrutural dos diferentes tipos de cobertura, além de insights sobre eficiência e segurança.

Este tópico apresenta a estrutura a ser dimensionada, bem como os desenhos esquemáticos, a descrição dos detalhes de projeto, as formulações, normativas e programas utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

3.1 Especificação do projeto

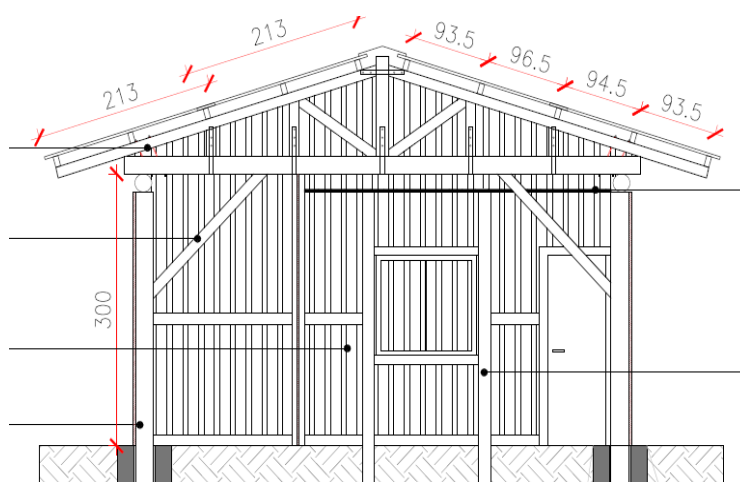
A geometria da edificação analisada neste estudo foi definida a partir de um projeto arquitetônico previamente desenvolvido pela ML Arquitetura, cuja planta técnica serviu como base para a caracterização dimensional do galpão. O mesmo modelo foi utilizado por Góis (2022) em sua investigação sobre a ação do vento em estruturas de madeira. A edificação possui 6 metros de largura, 15 metros de comprimento e 3 metros de altura, além de oito aberturas distribuídas em três portas (2,10m×0,70m), quatro janelas (1,20m×1,10 m) e um portão (5,00m×3,00 m), conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3.

Figura 2: Geometria do galpão executado pela Família X (Unidades em cm)



Fonte: ML Arquitetura, 2020.

Figura 3: Fachada do galpão executado pela Família X (Unidades em cm)



Fonte: ML Arquitetura, 2020.

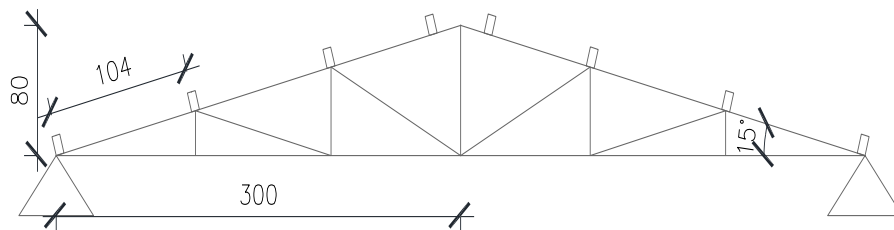
O estudo analisou os efeitos da ação do vento em coberturas de galpões de madeira, considerando diferentes regiões do Brasil e avaliando as combinações de sucção e sobrepressão previstas em norma. Os resultados indicaram variações significativas nos

esforços solicitantes em função da região analisada, evidenciando que a ação do vento pode se tornar determinante no dimensionamento estrutural, sobretudo para os elementos de cobertura e sistemas de contraventamento. A análise reforça a importância de considerar corretamente os parâmetros regionais do vento para garantir segurança e desempenho adequado das estruturas de madeira (GÓIS, 2022).

3.2 Cobertura treliçada

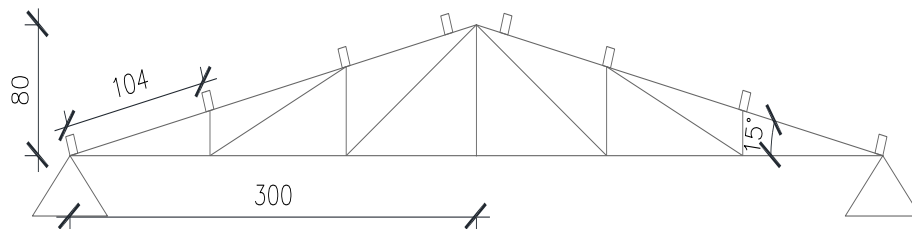
Neste estudo foram avaliadas três tipologias de treliças de madeira, Pratt, Howe e Belga, conforme ilustrado nas Figuras 4, 5 e 6, respectivamente. Embora o projeto arquitetônico original desenvolvido pela ML Arquitetura utilize apenas a treliça Howe na cobertura, as três tipologias foram projetadas e analisadas pelo autor para possibilitar uma comparação direta e consistente entre seus desempenhos estruturais.

Figura 4: Treliça Howe em estudo (Unidades em cm)



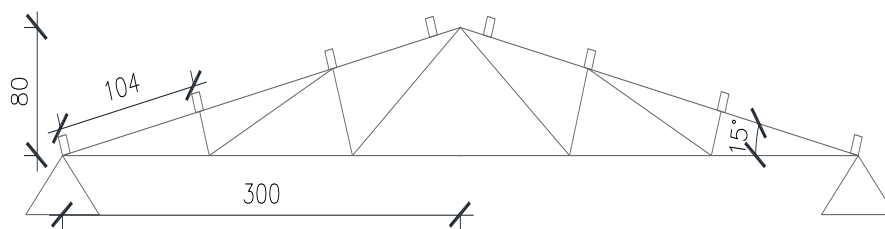
Fonte: Autor, 2025

Figura 5: Treliça Pratt em estudo (Unidades em cm)



Fonte: Autor, 2025

Figura 6: Treliça Belga em estudo (Unidades em cm)



Fonte: Autor, 2025

No dimensionamento foi considerado na cobertura o uso de telha ondulada de fibrocimento da linha essencial Brasilit, com espessura de 6,00 mm, peso de 18,00kgf/m² e inclinação recomendada de 15° (27%). Além disso, considerou-se inicialmente o distanciamento entre terças de 1,04 m e o entre as treliças com 2,50 m de afastamento. E para as propriedades da madeira, considerou-se os valores estabelecidos na norma para madeira folhosa com classe de resistência D40, apresentado na tabela 1 os valores, ressalta-se que compõem essa classe de resistência as madeiras ipê, mogno, carvalho, nogueira e jatobá,

Tabela 1: Propriedades da madeira que foi utilizada.

Madeira	Fc0,k (MPa)	Ft0,k (MPa)	Ec0,m (GPa)	ρ (kg/m ³)
D40	26	24	13	660

Fonte: Autor, 2025

3.3 Ações atuantes na cobertura

Nesta etapa, consideraram-se as principais ações atuantes na cobertura, incluindo o peso próprio dos elementos estruturais de madeira, peças metálicas de ligação, contraventamentos e o peso das telhas. Adotou-se a sobrecarga distribuída para coberturas conforme a ABNT NBR 6120:2019, no valor de 0,25 kN/m², além das ações do vento, responsáveis por efeitos de sucção e sobrepressão. As ações consideradas no modelo estrutural abrangeram o peso próprio dos elementos estruturais, bem como das componentes não estruturais, como as telhas, caracterizando o carregamento permanente. Além disso, foram incluídas a sobrecarga de uso e a ação do vento. Para a determinação do carregamento permanente, contabilizaram-se os pesos dos banzos, montantes, diagonais, barras de rigidez e elementos de contraventamento em aço, juntamente com o peso das ligações metálicas. Conforme a ABNT NBR 7190-1:2022,

para estimativas iniciais, o peso das peças metálicas deve corresponder a 3% do peso próprio da estrutura de madeira. Também foi considerado o peso das telhas, conforme especificado pelo fabricante.

Para cálculo das ações devidas ao vento, foi considerado que a edificação está localizada na cidade de Curitiba, no Paraná, em zona urbana, com terreno plano e cota média estimada dos obstáculos de 10 m. Tais considerações são as mesmas que Góis (2022) adotou em seu trabalho.

As ações do vento foram determinadas por meio do *software* VisualVentos, desenvolvido por Pravia (2003) na Universidade de Passo Fundo (UPF). O programa realiza o cálculo dos esforços provocados pelo vento em edificações com planta regular e telhado de duas águas, de acordo com os critérios da ABNT NBR 6123:1988. A ferramenta considera os efeitos dinâmicos do vento atuando sobre a parte externa da edificação. Sua interface é organizada em etapas, nas quais o usuário insere os parâmetros necessários, como as dimensões geométricas da planta arquitetônica e os dados meteorológicos característicos da região analisada.

Neste trabalho, para o cálculo das ações do vento, foi considerada o maior valor de sucção e o maior valor de sobrepressão, com o vento nas duas direções (0 e 90°), com aberturas e faces permeáveis a partir do projeto executivo, dentre 4 hipóteses:

- Hipótese 1: 4 faces igualmente permeáveis;
- Hipótese 2: Abertura dominante na face de barlavento, com demais faces igualmente permeáveis;
- Hipótese 3: Abertura dominante na face de sotavento, com demais faces igualmente permeáveis;
- Hipótese 4: Abertura dominante em uma face paralela ao vento.

3.4 Dimensionamento

Seguindo as normas técnicas ABNT NBR 7190-1:2022, ABNT NBR 6120:2019 e ABNT NBR 8681:2025, foi realizado todos os cálculos das ações permanentes e variáveis, combinações de ações no estado limite último e por fim calculado no estado limite de serviço.

Às terças foram verificadas utilizando os itens 6.3.5, que verifica a peça no estado limite último quanto a flexão simples oblíqua e 6.4.2, que verifica quanto ao cisalhamento, da ABNT NBR 7190-1:2022.

A tesoura deve ser analisada quanto à estabilidade conforme estabelece o item (6.5) da ABNT NBR 7190-1:2022, abrangendo as verificações de esbeltez (6.5.3), esbeltez relativa (6.5.4) e a condição de estabilidade para peças submetidas à compressão e flexocompressão (6.5.5). Também é necessária a avaliação da segurança estrutural, conforme os itens (6.3.2), referente à tração axial, e (6.3.3), relativo à compressão axial.

As verificações dos deslocamentos limites, tanto instantâneos quanto finais, foram realizadas conforme as diretrizes do capítulo 8 da ABNT NBR 7190-1:2022. No caso das terças, foram determinadas as flechas instantâneas e finais nas duas direções para avaliar seu desempenho estrutural. Para a tesoura, utilizaram-se os deslocamentos obtidos no *software* Ftool como base para as análises.

A fim de estudar o comportamento de três modelos de treliças diferentes, foi considerado, para todos os casos, a mesma seção transversal para os elementos estruturais:

- Terças: 8 cm x 12 cm.
- Banzo superior: 6 cm x 12 cm
- Banzo inferior: 6 cm x 16 cm
- Diagonais: 6 cm x 12 cm
- Montantes: 2 peças de 3 cm x 12 cm com o espaçamento de 6 cm
- Barra de rigidez: 2 peças 3 cm x 12 cm
- Barras de contraventamento: Barras de aço Ø 10 mm

As combinações de ações também foram as mesmas, sendo, no total, quatro combinações para verificação no estado limite último, que foram calculadas seguindo a equação do item 5.1.3.1 da ABNT NBR 8681:2025, Eq. (1).

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

A partir da equação geral e considerando os coeficientes de ponderação correspondentes e fatores de ponderação foram elaboradas quatro combinações de ações para a verificação no estado limite último.

Todos os coeficientes de ponderação foram retirados da ABNT NBR 8681:2025, presente nas Tabelas: Ações permanentes diretas agrupadas; Ações variáveis consideradas separadamente; Ações variáveis consideradas conjuntamente; Valores dos fatores de combinação (ψ_{0j}), classificando a estrutura como local que não há predominância de pesos. Essas combinações são apresentadas a seguir:

a) Combinação 1: Sobrecarga como única ação variável, conforme Eq. (2)

$$F_d = \sum_{i=1}^m 1,35 \times F_{Gi,k} + 1,50 \times F_{Q1,k} \quad (2)$$

b) Combinação 2: Sobrecarga como ação variável principal e vento de sobrepressão e sucção a 90 graus como ação variável secundária, conforme Eq. (3)

$$F_d = \sum_{i=1}^m 1,35 \times F_{Gi,k} + 1,50 \times F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n 1,40 \times 0,50 \times F_{Qj,k} \quad (3)$$

c) Combinação 3: Vento de sucção à 0 como única ação variável, conforme Eq. (4)

$$F_d = \sum_{i=1}^m 1,00 \times F_{Gi,k} + 1,40 \times F_{Q1,k} \quad (4)$$

d) Combinação 4: Vento de sucção à 90 graus como única ação variável, conforme Eq. (5)

$$F_d = \sum_{i=1}^m 1,00 \times F_{Gi,k} + 1,40 \times F_{Q1,k} \quad (5)$$

Em que:

$F_{Gi,k}$ = é o valor característico das ações permanentes (diretas e indiretas);

$F_{Q1,k}$ = é o valor característico da ação variável considerada a ação principal para a combinação;

$\psi_{0j} \times F_{Qj,k}$ = representa os valores reduzidos de combinação de cada uma das demais ações variáveis;

γ_{gi} = representa os valores dos coeficientes de ponderação para as ações permanentes;

γ_{q1} = representa os valores dos coeficientes de ponderação para as ações variáveis.

Para a verificação no estado limite de serviço, foi adotada a combinação quase permanente para flecha final. Para flecha instantânea a norma recomenda utilizar a combinação rara de serviço, considerando apenas a sobrecarga como ação variável. A verificação incluiu tanto os deslocamentos instantâneos quanto os finais, cujos limites admissíveis para elementos correntes fletidos foram estabelecidos conforme a norma ABNT NBR 7190:2022.

Os valores de tensões normais, forças cortantes e momentos fletores na tesoura foram calculados utilizando o *software* Ftool, um programa de desenvolvimento de cálculo e análise estrutural de pórticos planos, desenvolvido pelo do Instituto Tecgraf (PUC-Rio).

Para a determinação dos esforços nas extremidades da tesoura, considerou-se metade do carregamento aplicado em cada nó, uma vez que a área de influência dos nós apoiados corresponde a 50% daquela atribuída aos nós centrais

Complementarmente, empregou-se uma planilha elaborada no Microsoft Excel, na qual foram automatizados os procedimentos normativos para o dimensionamento e verificação dos critérios de tração, compressão, flexão simples reta, flexocompressão e cisalhamento em todos os elementos das treliças.

3.5 Cálculo de ações e combinações

3.5.1 Cargas atuantes

O carregamento permanente das treliças Howe, Pratt e Belga foi de 34,72 kgf/m², 34,87 kgf/m² e 34,52 kgf/m², respectivamente. Considerando que cada nó das tesouras possui uma área de influência de 2,5 m², obtiveram-se carregamentos permanentes por nó iguais a 0,868 kN para a treliça Howe, 0,872 kN para a Pratt e 0,863 kN para a Belga. Para a sobrecarga, adotando-se a mesma área de influência, o valor obtido foi de 0,625 kN por nó para todas as tipologias analisadas. A Tabela 2 apresenta a síntese dos valores de carregamento considerados.

Tabela 2: Valores dos carregamentos permanentes

Treliça	Howe	Pratt	Belga
Peso próprio total (kN/m ²)	0,347	0,349	0,345
Nó (kN)	0,868	0,872	0,863
Sobrecarga (kN/m ²)	0,250	0,250	0,250
Nó (kN)	0,625	0,625	0,625

Fonte: Autor, 2025

O carregamento variável devido à ação do vento foi obtido por meio do *software* VisualVentos. Dentre as quatro hipóteses mencionadas no tópico 3.4, a hipótese 3 foi a que resultou nos maiores valores de sucção, enquanto que a hipótese 4 apresentou as maiores sobrepressões. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos nas duas direções e para ambos os eixos, conforme cálculo realizado pelo *software*.

Tabela 3: Forças provocadas pela ação do vento

Lado		Unidades	Direito	Esquerdo
Vento 0°				
Vento Sucção	(nó) - y	kN	-2,34	-2,34
	(nó) - x	kN	-0,63	-0,63
Vento Sobrepressão	(nó) - y	kN	0,15	0,15
	(nó) - x	kN	0,04	0,04
Vento 90°				
Vento Sucção	(nó) - y	kN	-2,65	-1,71
	(nó) - x	kN	-0,71	-0,46
Vento Sucção/Sobrepressão	(nó) - y	kN	-0,31	0,78
	(nó) - x	kN	-0,08	0,21

Fonte: Autor, 2025

3.5.2 Combinações críticas

Com os carregamentos permanentes e variáveis previamente determinados, procedeu-se ao cálculo das combinações de ações aplicáveis à tesoura, com o objetivo de verificar o elemento no estado limite último (ELU). A ABNT NBR 8681:2025 estabelece todo o procedimento necessário para essa etapa, incluindo as expressões para combinação de ações, os coeficientes de ponderação correspondentes e os fatores de combinação e redução aplicáveis aos carregamentos variáveis. Os valores dos esforços obtidos para cada nó das estruturas Howe, Pratt e Belga encontram-se apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Carregamentos por nó de cada combinação

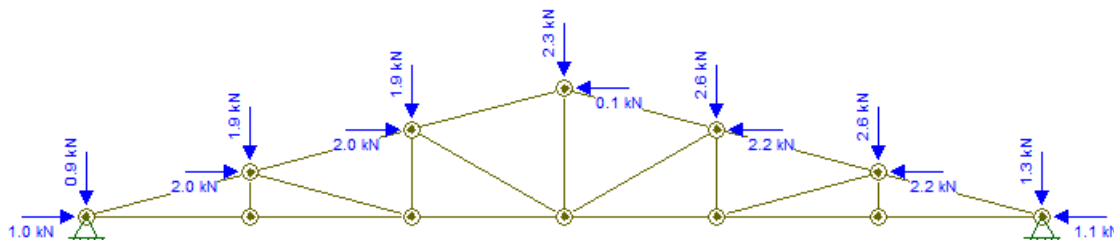
	Howe		Pratt		Belga	
	Nós 1-3	Nós 5-7	Nós 1-3	Nós 5-7	Nós 1-3	Nós 5-7
1) Sobrecarga como única ação variável						
Fd (kN)	2,11	2,11	2,11	2,11	2,10	2,10
2) Sobrecarga como ação variável principal, vento a 90 graus com suc/sobre						
Fd,y (kN)	1,89	2,66	1,90	2,66	1,89	2,65
Fd,x (kN)	2,05	2,26	2,06	2,26	2,04	2,25
3) Vento à 0 graus como única ação variável (sucção apenas)						
Fd,y (kN)	-2,40	-2,40	-2,40	-2,40	-2,41	-2,41
Fd,x (kN)	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
4) Vento à 90 graus como única ação variável (sucção apenas)						
Fd,y (kN)	-2,84	-1,53	-2,83	-1,52	-2,84	-1,53
Fd,x (kN)	-0,12	0,23	-0,12	0,23	-0,13	0,22

Fonte: Autor, 2025

Analisando os valores da Tabela 4, percebe-se que mesmo variando a configuração da treliça os valores das combinações são próximos. Isso pode ser justificado pela similaridade entre as ações consideradas, distâncias entre elementos e quantidades de peças serem também similares.

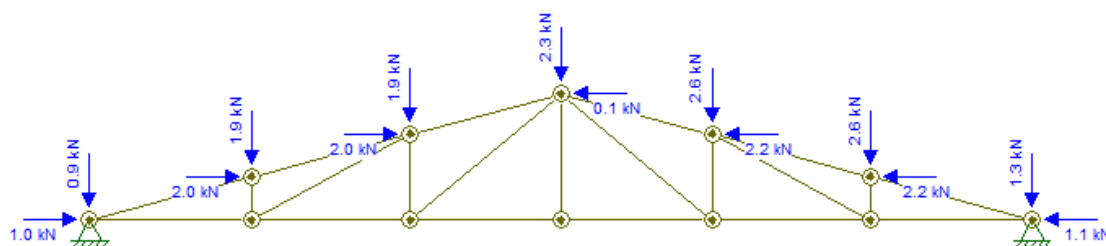
Todas as combinações apresentadas na Tabela 4 foram inseridas no *software* Ftool. A Figura 7, 8 e 9 apresenta combinação 2 (Sobrecarga como ação variável principal e vento a 90° como secundária), de cada treliça, adotada para as verificações no ELU e no ELS.

Figura 7: Combinação 2 aplicada no ftool (Howe)



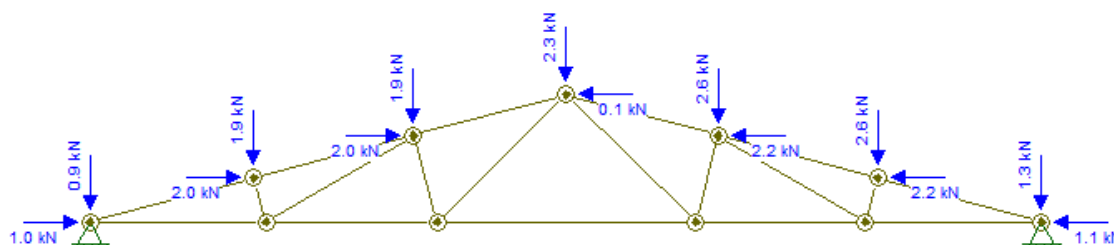
Fonte: Autor, 2025

Figura 8: Combinação 2 aplicada no ftool (Pratt)



Fonte: Autor, 2025

Figura 9: Combinação 2 aplicada no ftool (Belga)



Fonte: Autor, 2025

3.6 Verificações Estado Limite Último

O coeficiente de modificação foi determinado com base nas Tabelas 4 e 5 da ABNT NBR 7190-1:2022. Considerou-se a ação como sendo de longa duração, resultando em um coeficiente k_{mod1} igual a 0,7, além da adoção da classe de umidade 2, para a qual o coeficiente k_{mod2} é igual a 0,9. Dessa forma, o coeficiente de modificação final (k_{mod}) adotado no dimensionamento foi de 0,63. A norma também descreve integralmente o procedimento necessário para a verificação dos ELU e ELS aplicáveis às terças e tesouras.

3.6.1 Terças

A terça foi verificada considerando o critério de flexão oblíqua (N/mm^2) a partir das tensões máximas de cálculo associadas às componentes de flexão nas direções principais, σM_x , e σM_y , enquanto o critério de cisalhamento (N/mm^2) considerou as tensões de cálculo Td_x e Td_y . Os valores correspondentes a essas verificações estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resumo de verificações para o estado limite último

		Unid.	Terça/Howe	Terça/Pratt	Terça/Belga
Solicitações	MSd,x	kN.m	0,55	0,55	0,57
	MSd,y	kN.m	0,15	0,15	0,15
	Vsd,x	kN	0,88	0,88	0,91
	Vsd,y	kN	0,23	0,23	0,24
Tensões	$\sigma_{Mx,d}$	N/mm ²	2,86	2,86	2,96
	$\sigma_{My,d}$	N/mm ²	6,85	6,85	7,09
	$\tau_{d,x}$	N/mm ²	0,14	0,14	0,14
	$\tau_{d,y}$	N/mm ²	0,04	0,04	0,04
ELU	Segurança	Flexão oblíqua	0,74	0,74	0,77
		Cisalhamento	0,14	0,14	0,14

Fonte: Autor, 2025

Destaca-se que a seção transversal da terça atendeu às condições de segurança estabelecidas. Os resultados mostraram que as solicitações e tensões nas terças apresentaram valores praticamente idênticos entre as tipologias, existindo uma pequena variação apenas na treliça Belga. Essa diferença ocorre porque, embora os carregamentos nas terças sejam os mesmos para todas as treliças, a Belga possui uma geometria em que a distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga é superior.

3.6.2 Tesoura

De acordo com o item 6.5.5 da ABNT NBR 7190-1:2022, a verificação da estabilidade de peças comprimidas exige que o valor obtido na relação entre a tensão solicitante e a resistência de cálculo reduzida pelos efeitos de instabilidade seja obrigatoriamente menor que 1,00. Esse limite estabelece que o elemento possui capacidade resistente suficiente para suportar os esforços atuantes, considerando a perda de resistência decorrente da esbeltez. Assim, valores superiores a 1 indicam que o elemento não atende ao critério de estabilidade previsto pela norma.

As Tabelas 6, 7 e 8 apresentam um resumo com os esforços solicitantes, cálculo de esforço normal de compressão e tração ($N_{c,d}$ e $N_{t,d}$), em cada elemento, suas tensões ($\sigma_{N_{c,d}}$ e $\sigma_{N_{t,d}}$), e as verificações de segurança e sua porcentagem do cálculo da tensão em relação ao cálculo da resistência da madeira. Para que o elemento seja verificado, ele deve atender aos seguintes critérios:

- Comprimento de flambagem: deve ser menor que 140;
- Segurança:
 - Compressão e tração axial: menor que a resistência da madeira, sendo 11,70 MPa para tensões de compressão e 10,8 MPa para tensões de tração.
- Estabilidade: deve ser menor que 1,00;

Tabela 6: Resumo de verificações para o estado limite último (Howe)

		Unid.	Tesoura Howe				
			Montante	Banzo Inferior	Banzo Superior	Diagonal	
Solicitações		Nc,d	N	4900	3600	20000	6400
		Nt,d	N	5500	3000	21100	5800
Tensões		σNc,d	N/mm²	0,68	0,38	2,78	0,89
		σNt,d	N/mm²	0,76	0,31	2,93	0,81
ELU	Segurança	Compressão		PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
		Tração		PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
	σNc,d/ fc0,d	Compressão (%)		5,82	3,21	23,74	7,60
		Tracção (%)		7,07	2,89	27,13	7,46

Fonte: Autor, 2025

Tabela 7: Resumo de verificações para o estado limite último (Pratt)

			Unid.	Tesoura Pratt			
				Montante	Banzo Inferior	Banzo Superior	Diagona
Solicitações		Nc,d	N	3400	3800	20400	5100
		Nt,d	N	3100	3600	20300	5500
Tensões		σNc,d	N/mm²	0,47	0,4	2,83	0,71
		σNt,d	N/mm²	0,43	0,38	2,82	0,76
ELU	Segurança	Compressão		PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
		Tração		PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
	σNc,d/ fc0,d	Compressão (%)		4,04	3,38	24,22	6,05
		Tração (%)		3,99	3,47	26,11	7,07

Fonte: Autor, 2025

Tabela 8: Resumo de verificações para o estado limite último (Belga)

		Unid.	Tesoura Belga			
			Montante	Banzo Inferior	Banzo Superior	Diagonal
Solicitações	Nc,d	N	3800	4400	20300	5300
	Nt,d	N	3500	3800	20800	5700
Tensões	$\sigma_{Nc,d}$	N/mm ²	0,53	0,46	2,82	0,74
	$\sigma_{Nt,d}$	N/mm ²	0,49	0,4	2,89	0,79
ELU	Segurança	Compressão	PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
		Tração	PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
	$\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$	Compressão (%)	4,51	3,92	24,10	6,29
		Tração (%)	4,50	3,67	26,75	7,33

Fonte: Autor, 2025

Como apresentado nas tabelas anteriores, todas as tipologias atenderam às verificações no Estado Limite Último, além de todas as partes que compõem a tesoura montantes, diagonais e banzos inferior e superior atenderam plenamente aos critérios de estabilidade estabelecido pela norma. Isso indica que os valores de tensão de compressão e tração calculados permaneceram inferiores às respectivas resistências de cálculo da madeira. Logo abaixo dessas verificações, são apresentadas as porcentagens que representam a relação entre o valor de cálculo da resistência e o valor de cálculo da tensão em cada elemento.

3.7 Verificações Estado Limite de Serviço

De acordo com a Tabela 21 da ABNT NBR 7190-1:2022, o deslocamento instantâneo admissível ($\delta_{inst,lim}$) para vigas biapoiadas deve situar-se entre $L/300$ e $L/500$, onde L corresponde ao vão da tesoura. Para os deslocamentos finais ($\delta_{final,lim}$), os limites variam de $L/150$ a $L/300$, considerando-se o vão livre da peça. No presente estudo, adotou-se $L = 2,50$ m para as terças e $L = 6,0$ m para a tesoura.

A partir da verificação em Estado Limite de Serviço, avaliaram-se os deslocamentos excessivos das treliças ($\delta_{máx}$), buscando garantir maior conforto e segurança estrutural. Com base nas flechas obtidas no *software* Ftool, observou-se que todas as tipologias Howe, Pratt e Belga apresentaram deslocamentos, de suas tesouras, inferiores aos limites estabelecidos pela norma, como mostra na Tabela 9. No entanto, apenas a treliça Howe apresentou flecha suficientemente reduzida para atender também ao critério mais rigoroso

de deslocamento instantâneo, destacando-se como a configuração com melhor desempenho nesse aspecto.

Tabela 9: Comprimentos das flechas das tesouras (cm).

	δ	$\delta_{inst,lim}$ (L/300)	$\delta_{inst,lim}$ (L/500)	$\delta_{final,lim}$ (L/150)	$\delta_{final,lim}$ (L/300)
Howe	1,12	2	1,2	4	2
Pratt	1,3	2	1,2	4	2
Belga	1,25	2	1,2	4	2

Fonte: Autor, 2025

Com base nos procedimentos normativos estabelecidos da norma, a estrutura está verificada quanto ao estado limite de serviço.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caso 1

O Caso 1 corresponde à configuração original da tesoura, sem a aplicação de quaisquer modificações geométricas ou dimensionais, apresentando os valores das solicitações atuantes em cada elemento estrutural.

A partir das combinações críticas, determinou-se os esforços solicitantes em cada barra da estrutura. A Tabela 10 mostra a comparação dos valores máximos de esforço normal, tanto de tração quanto de compressão, obtidos para os diferentes elementos estruturais, em relação a cada tipo de treliça, com isso podendo notar de qual estrutura cada elemento é mais solicitado.

Tabela 10: Maior solicitação nos elementos das treliças.

ELEMENTO/TRELIÇA	Unid.	Howe	Pratt	Belga
Montante (comp.)	N	4900	3400	3800
Montante (traç.)	N	5500	3100	3500
Diagonal (comp.)	N	6400	5100	5300
Diagonal (traç.)	N	5800	5500	5700
B. Superior (comp.)	N	20000	20400	20300
B. Superior (traç.)	N	21100	20300	20800
B. Inferior (comp.)	N	3600	3800	4400
B. Inferior (traç.)	N	3000	3600	3800

Fonte: Autor, 2025

A análise dos esforços evidencia que, na treliça Howe, os montantes e diagonais são os elementos mais solicitados, enquanto na treliça Pratt esses mesmos componentes apresentam as menores demandas, posicionando a Belga em um comportamento

intermediário. Em relação ao banzo inferior, a treliça Belga mostrou-se a mais solicitada, ao passo que a Howe apresentou os menores valores de esforço. Para o banzo superior, a comparação entre Howe e Pratt varia conforme o tipo de esforço (compressão ou tração), sendo que, a treliça Belga tende a apresentar comportamento intermediário entre as duas tipologias.

4.2 Caso 2

A partir dos resultados obtidos no problema original (Caso 1), foram realizadas análises adicionais com o objetivo de comparar o desempenho estrutural das treliças Howe, Pratt e Belga. Para isso, no Caso 2A procedeu-se à redução das seções transversais dos elementos que compõem cada treliça. Na sequência, no Caso 2B, alterou-se a classe de resistência da madeira, que passou a ser considerada como conífera C24. Ressalta-se que o pinus, espécie amplamente utilizada na produção de madeira engenheirada, integra essa classe de resistência. Por fim, no Caso 2C, modificou-se o número de montantes e diagonais, a fim de avaliar a influência dessas alterações na rigidez global, na distribuição dos esforços internos e no comportamento estrutural de cada tipologia. Essas análises permitem compreender o impacto de cada variável sobre a eficiência estrutural das treliças estudadas.

4.2.1 Variação na seção dos elementos – Caso 2A

Nesta etapa da análise estrutural, procedeu-se à alteração das dimensões dos elementos que compõem as treliças avaliadas. Os montantes e diagonais passaram a adotar seções de 5×7 cm, enquanto os banzos superior e inferior foram redefinidos para a seção de 5×10 cm. Essas modificações foram aplicadas de forma uniforme às treliças Howe, Pratt e Belga, a fim de possibilitar uma comparação direta do comportamento estrutural entre as diferentes tipologias.

Com a redução das seções, verificou-se uma alteração nas tensões atuantes devido à diminuição da área resistente e às mudanças na distribuição das solicitações. A partir desses novos valores, tornou-se possível comparar o comportamento dos elementos das treliças por meio da relação tensão calculada ($\sigma N, d$) sobre resistência de cálculo (f_0, d), sendo uma relação adimensional, multiplicando por 100 para analisar em porcentagem, permitindo avaliar como cada tipologia respondeu às modificações propostas, resultados esses que serão apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13, logo em seguida os Gráficos 1 e 2 para melhor visualização da análise feita.

Tabela 11: Análise da razão $\sigma_{N,d}/f_{0,d}$ (Howe)

HOWE	Montante	B. Inferior	B. Superior	Diagonal
Caso 1 ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	5,82	3,21	23,74	7,60
Caso 2A ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	6,51	7,60	40,65	15,87
Caso 1 ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	7,07	2,89	27,13	7,46
Caso 2A ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	7,28	8,74	51,44	16,83
Compressão (%)	12	137	71	109
Tração (%)	3	202	90	126

Fonte: Autor, 2025

Tabela 12: Análise da razão $\sigma_{N,d}/f_{0,d}$ (Pratt)

PRATT	Montante	B. Inferior	B. Superior	Diagonal
Caso 1 ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	4,04	3,38	24,22	6,05
Caso 2A ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	5,74	12,93	46,34	17,58
Caso 1 ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	3,99	3,47	26,11	7,07
Caso 2A ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	6,10	13,07	51,44	19,34
Compressão (%)	42	282	91	190
Tração (%)	53	276	97	173

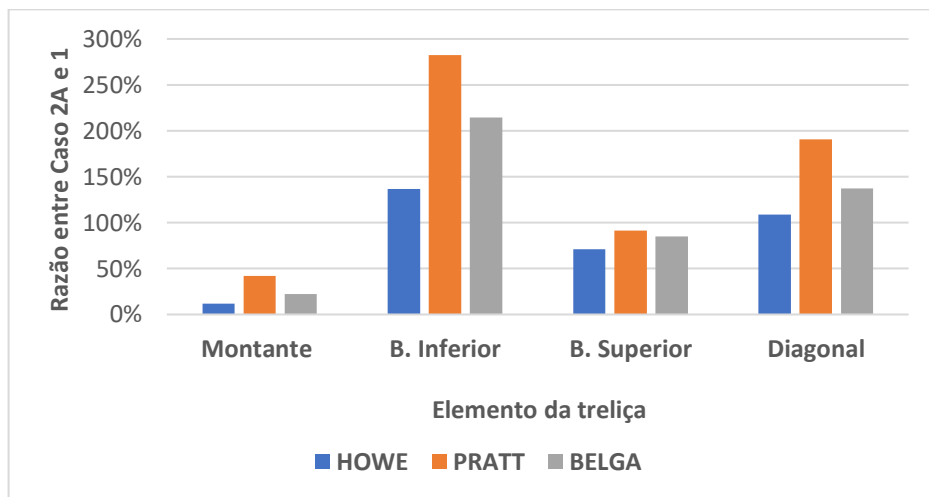
Fonte: Autor, 2025

Tabela 13: Análise da razão $\sigma_{N,d}/f_{0,d}$ (Belga)

BELGA	Montante	B. Inferior	B. Superior	Diagonal
Caso 1 ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	4,51	3,92	24,10	6,29
Caso 2A ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	5,51	12,33	44,52	14,92
Caso 1 ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	4,50	3,67	26,75	7,33
Caso 2A ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	5,90	12,26	51,11	16,53
Compressão (%)	22	215	85	137
Tração (%)	31	235	91	126

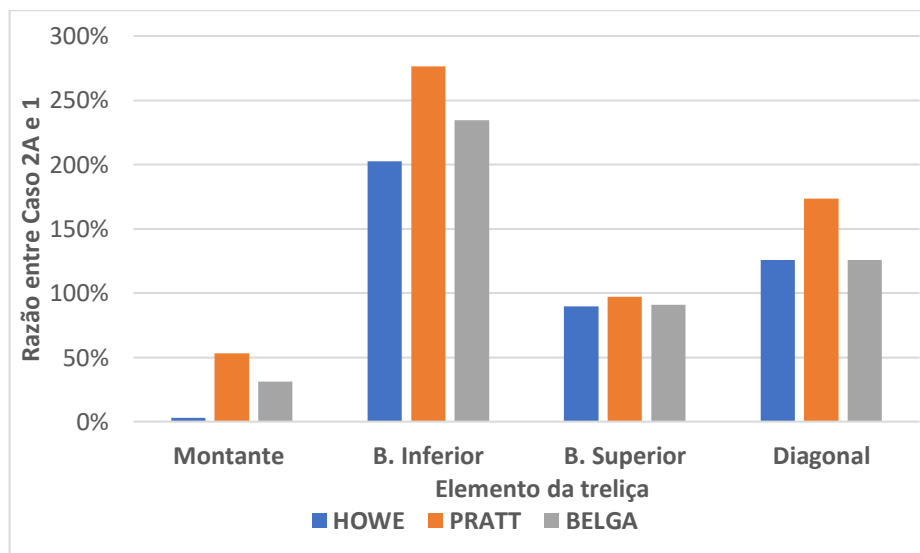
Fonte: Autor, 2025

Gráfico 1: Análise de resultado de compressão (referente às tabelas 11, 12 e 13)



Fonte: Autor, 2025

Gráfico 2: Análise de resultado de tração (referente às tabelas 11, 12 e 13)



Fonte: Autor, 2025

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a redução das seções dos elementos estruturais impactou cada tipologia de treliça de maneira distinta. Dentre elas, a treliça Pratt apresentou o maior aumento na razão $\sigma_{N,d}/f_{0,d}$ comparando os valores obtidos no Caso 1 para Caso 2A (alteração das seções), indicando que sua configuração geométrica é mais sensível às variações dimensionais dos seus elementos. Esse comportamento indica que a treliça Pratt apresenta maior eficiência no aproveitamento do material após a redução das seções, uma vez que pequenas variações dimensionais promovem aumento

na relação $\sigma N, d / f_0, d$. Quanto mais próxima de 1,0 essa relação, mais os elementos estruturais passam a operar próximos à sua capacidade resistente, caracterizando um dimensionamento menos conservador.

A treliça Belga, por sua vez, manteve um comportamento intermediário em toda a análise, situando-se entre os desempenhos observados para a Howe e a Pratt. Esse resultado indica que a Belga pode ser compreendida como uma alternativa de transição, combinando características de ambas as tipologias.

Em contraste, a treliça Howe demonstrou melhor comportamento na distribuição de solicitações entre montantes, diagonais e banzos. A variação na razão tensão/resistência foi menor, em comparação as outras tipologias, sugerindo um comportamento estrutural mais persistente com as alterações feitas, em relação ao caso 1.

No Estado Limite de Serviço, os resultados do Caso 2A indicaram resultados semelhantes em relação ao Caso 1 quanto à segurança estrutural. Entretanto, ao se adotar o critério de verificação mais rigoroso, constatou-se que nenhuma das treliças atendeu plenamente às exigências normativas, incluindo a tipologia Howe, conforme apresentado pela tabela 14.

Tabela 14: Comprimentos das flechas das tesouras (cm).

	δ	$\delta_{inst,lim}$ (L/300)	$\delta_{inst,lim}$ (L/500)	$\delta_{final,lim}$ (L/150)	$\delta_{final,lim}$ (L/300)
Howe	1,6	2	1,2	4	2
Pratt	1,95	2	1,2	4	2
Belga	1,89	2	1,2	4	2

Fonte: Autor, 2025

4.2.2 Alteração na classe de resistência – Caso 2B

Nesta etapa da análise, procedeu-se à alteração da classe de resistência da madeira utilizada nas treliças, além de manter as mudanças feitas no caso 2A, adotando-se a classe Coníferas C24. Essa segunda mudança foi com o interesse em analisar novamente a relação tensão calculada ($\sigma N, d$) e resistência de cálculo (f_0, d) além de verificar a estabilidade de cada tipologia. A adoção da classe C24 permite avaliar o comportamento das treliças Howe, Pratt e Belga sob um material com propriedades mecânicas diferentes da classe D40 possibilitando comparar diretamente como cada tipologia responde à substituição da madeira.

Assim, no Caso 2B, manteve-se a alteração das dimensões dos elementos adotada no Caso 2A e modificou-se a classe de resistência da madeira. Essas considerações tiveram como objetivo obter um aproveitamento mais eficiente do material em todos os seus componentes, sendo os resultados obtidos para cada treliça apresentados nas Tabelas 15, 16 e 17, logo em seguida os Gráficos 3 e 4 para melhor visualização da análise feita.

Tabela 15: Análise da razão $\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$ (Howe)

HOWE	Montante	B. Inferior	B. Superior	Diagonal
Caso 1 ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	5,82	3,21	23,74	7,60
Caso 2B ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	11,87	9,62	46,56	25,40
Caso 1 ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	7,07	2,89	27,13	7,46
Caso 2B ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	16,10	15,63	91,39	42,22
Compressão (%)	104	200	96	234
Tração (%)	128	441	237	466

Fonte: Autor, 2025

Tabela 16: Análise da razão $\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$ (Pratt)

PRATT	Montante	B. Inferior	B. Superior	Diagonal
Caso 1 ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	4,04	3,38	24,22	6,05
Caso 2B ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	9,19	16,67	52,84	31,87
Caso 1 ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	3,99	3,47	26,11	7,07
Caso 2B ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	15,30	20,95	92,38	42,92
Compressão (%)	128	393	118	426
Tração (%)	284	503	254	507

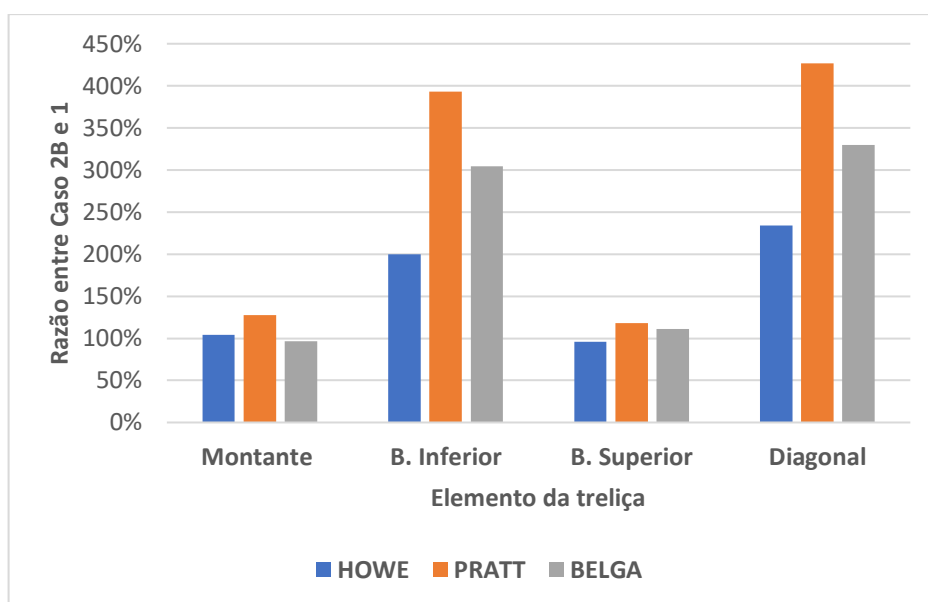
Fonte: Autor, 2025

Tabela 17: Análise da razão $\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$ (Belga)

BELGA	Montante	B. Inferior	B. Superior	Diagonal
Caso 1 ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	4,51	3,92	24,10	6,29
Caso 2B ($\sigma_{Nc,d}/f_{c0,d}$) (%)	8,87	15,85	50,91	27,05
Caso 1 ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	4,50	3,67	26,75	7,33
Caso 2B ($\sigma_{Nt,d}/f_{t0,d}$) (%)	14,79	19,40	91,39	36,89
Compressão (%)	97	305	111	330
Tração (%)	229	429	242	403

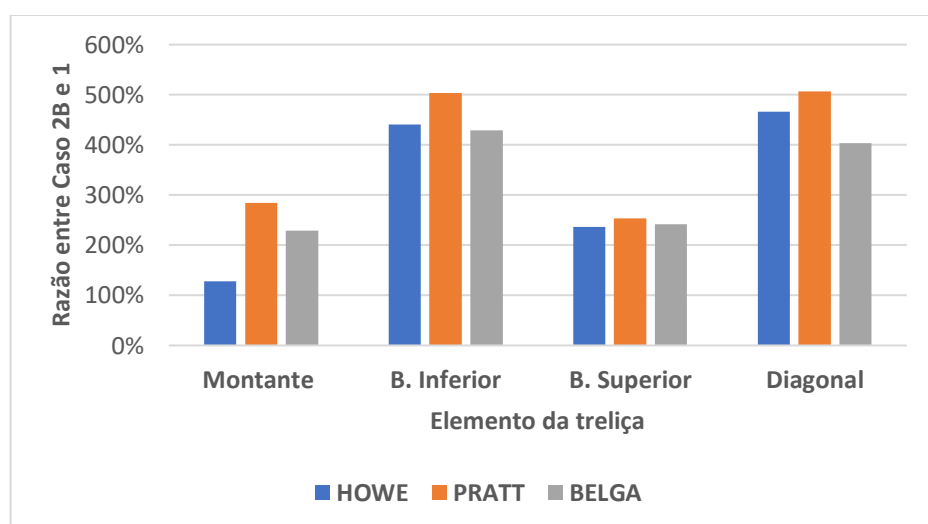
Fonte: Autor, 2025

Gráfico 3: Análise de resultado de compressão (referente às tabelas 15, 16 e 17)



Fonte: Autor, 2025

Gráfico 4: Análise de resultado de tração (referente às tabelas 15, 16 e 17)



Fonte: Autor, 2025

A análise comparativa das três tipologias evidenciou que a treliça Pratt apresentou aumento na razão $\sigma_{N,d}/f_{0,d}$ após a redução das seções e alteração da classe de madeira, indicando maior aproveitamento do material. Entretanto, as tipologias Howe e Belga apresentaram valores próximos aos obtidos para a Pratt, demonstrando que a variação da classe de madeira não produz diferenças significativas entre as treliças quando analisada essa relação.

Considerando a esbeltez relativa dos banzos superiores, observou-se que, nas treliças Pratt e Belga, esse elemento não atende à condição de estabilidade, apresentando valores superiores a 1, como é apresentado na Tabela 18. Isso indica que, entre as tipologias avaliadas, a Pratt e a Belga seriam as primeiras a entrar em instabilidade, devido as alterações feitas, portanto, demanda, um banzo superior com maior rigidez seja por meio de uma seção mais robusta ou pelo aumento de sua inércia.

Tabela 18: Estabilidade Banzo Superior

		Howe B.superior	Pratt B. superior	Belga B.superior
ESTABILIDADE	x	0,49	0,55	0,53
	y	0,95	1,08	1,04

Fonte: Autor (2025)

Tal comportamento está diretamente associado ao cálculo da esbeltez relativa, definido no item 6.5.4 da norma, cuja formulação incorpora a resistência de cálculo do material.

Além disso, ao avaliar o comportamento das treliças no ELS, observou-se que as modificações realizadas tanto na classe de resistência da madeira quanto nas seções dos elementos não foram suficientes para garantir o desempenho adequado da treliça Pratt. Observa-se na Tabela 19 que a flecha instantânea da Pratt ultrapassou o limite normativo estabelecido, comprometendo os requisitos de conforto e segurança previstos pela ABNT NBR 7190-1:2022.

Tabela 19: Flechas de deslocamentos da estrutura (cm)

		Howe	Pratt	Belga
ELS	δ_{ftool} (cm)	1,66	2,04	1,98
	$\delta_{inst,lim}$ (cm)	2,00	2,00	2,00
	$\delta_{fin,lim}$ (cm)	4,00	4,00	4,00

Fonte: Autor (2025)

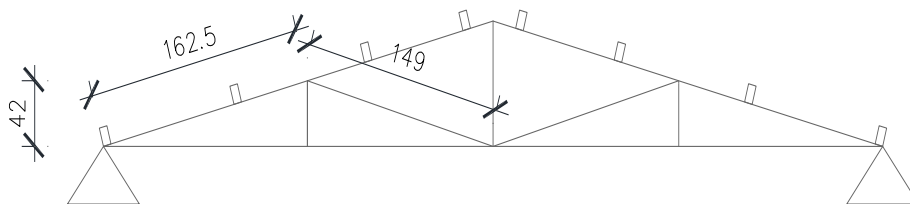
Nesse tópico evidencia que treliça Howe continuou demonstrando o comportamento mais seguro, mantendo todos os elementos dentro dos limites de estabilidade e apresentando melhor distribuição das solicitações internas. Já as treliças Pratt e Belga, apresentaram instabilidade no banzo superior, evidenciando maior sensibilidade à variação do material. Assim, mesmo com a alteração da classe de resistência, a Howe se mantém como a configuração de menor variação de valores em

relação aos outros casos, enquanto a Pratt e a Belga exigem maior robustez ou aumento de inércia no banzo superior para atingir um desempenho estrutural equivalente.

4.2.3 Mudança na geometria das tesouras – Caso 2C.

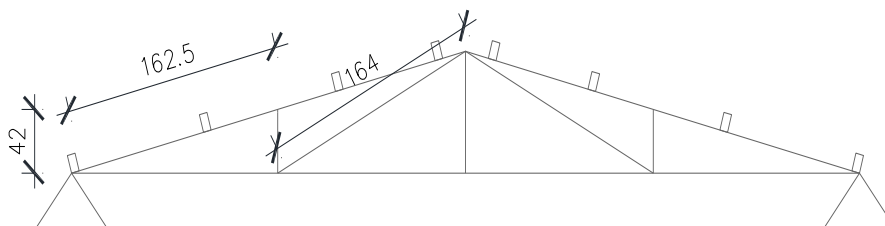
Nesta etapa da pesquisa, procede-se à investigação do impacto da alteração geométrica das treliças Howe, Pratt e Belga, realizada a partir da retirada de dois montantes e duas diagonais, seguida do redimensionamento da estrutura. O objetivo central desta análise é avaliar como essa simplificação afeta a estabilidade dos elementos comprimidos, uma vez que tais barras tendem a se tornar mais suscetíveis à perda de estabilidade quando há aumento no comprimento dos elementos, ao redimensionar as treliças, mantendo as condições dos casos 2A e 2B.

Figura 10: Treliça Howe redimensionada.



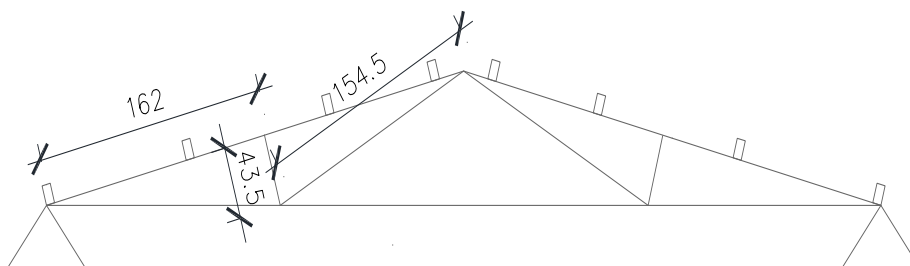
Fonte: Autor (2025)

Figura 11: Treliça Pratt redimensionada.



Fonte: Autor (2025)

Figura 12: Treliça Belga redimensionada.



Fonte: Autor (2025)

Assim, busca-se identificar qual tipologia apresenta maior sensibilidade à modificação geométrica, como variam os índices de esbeltez e as condições de estabilidade, e se a configuração resultante permanece compatível com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7190-1:2022 para peças comprimidas e flexocomprimidas.

Com os resultados apresentados nas Tabelas 20 e 21 evidenciam que os banzos superiores e as diagonais não atendem às condições mínimas de estabilidade exigidas, apresentando índices superiores ao limite admissível. Isso demonstra que esses elementos se tornaram mais suscetíveis à instabilidade após a redução do número de barras e redistribuição dos esforços, além das alterações da classe e da seção feita anteriormente, comprometendo a segurança estrutural das tipologias avaliadas.

Tabela 20: Estabilidade Banzo Superior.

		Howe B.superior	Pratt B. superior	Belga B.superior
ESTABILIDADE	x	0,56	0,66	0,62
	y	2,14	2,50	2,35

Fonte: Autor (2025)

Tabela 21: Estabilidade Diagonal.

		Howe Diagonal	Pratt Diagonal	Belga Diagonal
ESTABILIDADE	x	1,19	1,75	1,38
	y	1,19	1,75	1,38

Fonte: Autor (2025)

Os resultados demonstram que nenhuma das tipologias analisadas manteve a estabilidade dos elementos comprimidos, Banzo Superior e Diagonal, após o redimensionamento geométrico.

Contudo, observa-se que Pratt e Belga apresentaram os maiores desvios, sobretudo no banzo superior e nas diagonais, evidenciando maior sensibilidade à redução de inércia

e ao aumento de esbeltez. A Howe, embora igualmente reprovada, mostrou valores menos elevados, indicando melhor desempenho estrutural frente às alterações impostas. Isso sugere que, na Howe, pequenos ajustes de inércia ou comprimento dos elementos comprimidos podem ser suficientes para restabelecer as condições de estabilidade, ao contrário das demais tipologias, que demandariam intervenções mais significativas.

No Estado Limite de Serviço, os resultados do Caso 2C apresentaram comportamento distinto em relação aos casos anteriores. Observou-se que as tipologias Pratt e Belga passaram a não atender ao critério de flecha instantânea limite estabelecido pela norma. A treliça Howe, por sua vez, manteve os deslocamentos dentro dos limites admissíveis, atendendo às exigências de segurança para o ELS, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22: Comprimentos das flechas das tesouras (cm).

	δ	$\delta_{inst,lim}$ (L/300)	$\delta_{inst,lim}$ (L/500)	$\delta_{final,lim}$ (L/150)	$\delta_{final,lim}$ (L/300)
Howe	1,65	2	1,2	4	2
Pratt	2,32	2	1,2	4	2
Belga	2,21	2	1,2	4	2

Fonte: Autor, 2025.

5. CONCLUSÃO

A partir das análises desenvolvidas neste trabalho, foi possível comparar de forma sistemática o comportamento estrutural das treliças Howe, Pratt e Belga frente às verificações normativas de Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), considerando alterações nas seções dos elementos, mudança da classe de resistência da madeira e modificação geométrica das tesouras. Os resultados demonstraram que a treliça Howe apresentou o desempenho mais eficiente entre as tipologias estudadas, mantendo melhores condições de estabilidade e menores deslocamentos, mesmo após as modificações impostas ao modelo original.

Observou-se que, nas análises em ELU, todas as tipologias atenderam inicialmente às verificações de segurança; porém, ao reduzir as seções e alterar a classe da madeira, Pratt e Belga passaram a apresentar instabilidade no banzo superior, característica decorrente do aumento de esbeltez. No ELS, a treliça Pratt deixou de atender ao limite de deslocamento instantâneo, evidenciando que sua rigidez global é mais sensível às alterações geométricas e de material. A Howe, por outro lado, manteve desempenho satisfatório em todas as verificações, reforçando sua maior robustez estrutural.

A comparação geral entre ELU e ELS mostra que a Howe se comporta de forma mais segura nos dois estados limites, enquanto Pratt e Belga se tornam mais suscetíveis à instabilidade à medida que os elementos comprimidos perdem rigidez. Assim, recomenda-se atenção especial ao banzo superior, elemento crítico nas três tipologias, mas sobretudo nas treliças Pratt e Belga, para as quais se sugere maior robustez ou aumento do momento de inércia com o objetivo de garantir estabilidade adequada.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a investigação considerando modelos tridimensionais, que permitam captar o comportamento espacial da estrutura; estudar possíveis modelos de ligação, avaliando diferentes configurações, rigidezes e dispositivos de união que influenciam diretamente a distribuição dos esforços; e analisar a influência de diferentes arranjos de contraventamento, bem como a resposta dinâmica das treliças sob carregamentos variáveis, como vento ou ações acidentais, além de analisar também qual tipologia possui o consumo maior de tipologia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 61 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 95 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190-1 – Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 81 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2025. 22 p.

BOMFIM, F.; TENÓRIO, L. L. Perfil e memórias do elemento estrutural: madeira. Caderno de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas – UNIT – Alagoas, v. 3, n. 3, p. 147–147, 2016.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 1, p. 71–77, 1997.

FERREIRA, E. M. Ftool – Two-Dimensional Frame Analysis Tool, versão 2.10. Rio de Janeiro: DECiv/PUC-Rio, 2004. Programa de computador. Disponível em: <http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>.

FUZARO, O. A. I. Análise estrutural de treliça. Trabalho acadêmico – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procopio, [S.l.: s.n., s.d.].

GÓIS, Renan. Estudo do efeito do vento sobre o telhado de galpão de madeira considerando cinco regiões do Brasil. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

MEDEIROS, Rodolfo Costa de. Forças em peças de contraventamento. [S.l.: s.n., s.d.].

PRAVIA, Z. M. C.; CHIARELLO, J. A. O programa VisualVentos: determinação de forças devidas ao vento em edificações de base retangular e cobertura a duas águas segundo a NBR 6123. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo (UPF) – Etools/UPF, [s.d.].

RUI, D.; CARVALHO, M.; FARIA, M. Análise e dimensionamento de estruturas de madeira. Relatório de Projeto (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Estruturas). [S.l.: s.n., s.d.].

SILVA, Clara Balotin Leocadio da; GONÇALVES, Lauren Karoline de Sousa. Dimensionamento de uma treliça de madeira segundo as normas brasileira e americana. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil. Trabalho acadêmico. [s.d.].