

INFLUÊNCIA DE VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS NO DESEMPENHO DE TRELIÇAS DE MADEIRA

Felipe Souza Ferreira¹, Lauren Karoline De Sousa Gonçalves²

¹*Graduando na Faculdade de Engenharia Civil – FECIV, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, Brasil – felipe.ferreira1@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 avaliar o comportamento estrutural de diferentes configurações de treliças de madeira aplicadas em coberturas, por meio do dimensionamento estrutural. A estrutura adota é de uma edificação comercial, submetida a diversas variações: redução da altura, retirada parcial e total de elementos internos. As análises foram realizadas considerando os critérios estabelecidos pelas normas ABNT NBR 7190:2022, NBR 6120:2019 e NBR 8681:2004, com verificação dos estados limite último (ELU) e de serviço (ELS). Os resultados mostraram que a configuração original apresenta melhor desempenho global, enquanto alterações severas, como a retirada completa de elementos internos, comprometem a estabilidade e segurança da estrutura. A utilização de *softwares* como *Ftool* e *VisualVentos* demonstrou-se fundamental para a precisão das análises e para a verificação de diferentes cenários estruturais. Conclui-se que o uso racional da madeira, aliado ao dimensionamento adequado, permite otimizar soluções estruturais com segurança e eficiência.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira estrutural, Treliça de cobertura, Dimensionamento, Simulação computacional, Estabilidade.

ABSTRACT:

This study aims to assess the structural behavior of various wooden truss configurations employed in roof systems through structural analysis and design. The structure analyzed corresponds to a commercial building and is subjected to different modifications, including height reduction and partial or complete removal of internal members. The evaluations were

conducted in accordance with the standards ABNT NBR 7190:2022, NBR 6120:2019, and NBR 8681:2004, considering both ultimate limit states (ULS) and serviceability limit states (SLS). The results indicate that the original truss configuration provides superior global performance, while significant alterations—such as the complete removal of internal elements—adversely affect the stability and safety of the structure. The application of structural analysis software, including Ftool and VisualVentos, proved essential for ensuring analytical precision and evaluating multiple structural scenarios. It is concluded that the rational use of timber, combined with proper structural design, enables the development of safe and efficient structural solutions.

KEYWORDS: Structural timber, Roof truss, Design, Computational simulation, Stability.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de cobertura são componentes essenciais em edificações, especialmente aquelas que requerem grandes vãos livres e resistência a diversos tipos de carregamentos. Nesse contexto, a madeira destaca-se como uma alternativa eficiente e sustentável para aplicações estruturais, devido às suas propriedades físico-mecânicas favoráveis e à sua renovabilidade (MORAES et al., 2022).

Dentre as soluções estruturais disponíveis, as treliças de madeira são amplamente utilizadas em coberturas por permitirem vencer grandes vãos com menor consumo de material, além de proporcionarem leveza à estrutura. Alterações na geometria ou na disposição dos elementos internos dessas treliças podem impactar significativamente o desempenho global da estrutura, exigindo análises criteriosas quanto à segurança, estabilidade e deformações admissíveis (MEDEIROS, 2010).

O avanço das ferramentas computacionais tem possibilitado a simulação de diferentes configurações estruturais de forma prática e precisa, permitindo a avaliação de diversos cenários antes da execução da obra. Essas simulações contribuem significativamente para o processo de tomada de decisão no projeto, otimizando recursos e assegurando a conformidade com as normas técnicas vigentes (FUZARO, 2019).

Diante desse panorama, este trabalho tem como objetivo realizar a análise estrutural de uma cobertura com treliça de madeira por meio de simulação computacional, avaliando os

efeitos provocados pela retirada e modificação de elementos estruturais. A partir de um modelo base dimensionado conforme as normas da ABNT, serão propostas três variações, com as mesmas seções transversais para os elementos, cujos resultados serão comparados quanto ao atendimento aos estados limite último (ELU) e de serviço (ELS), bem como à eficiência estrutural de cada configuração.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Madeira como material estrutural

A madeira é um dos materiais mais antigos utilizados na construção civil e, apesar da crescente industrialização de outros insumos, ela continua sendo amplamente aplicada devido à sua sustentabilidade, disponibilidade e boas propriedades físico-mecânicas. Além de ser renovável e biodegradável, a madeira possui uma elevada resistência específica, tornando-a uma alternativa eficiente para estruturas leves e de médio porte (CORDEIRO JÚNIOR; SILVA; SOARES, 2017).

Os autores destacam que a escolha adequada da espécie é um fator determinante no desempenho estrutural, já que diferentes madeiras apresentam variações significativas em propriedades como densidade, módulo de elasticidade e resistência à compressão e à flexão. Tais características influenciam diretamente na durabilidade e na segurança da estrutura ao longo do tempo (CORDEIRO JÚNIOR; SILVA; SOARES, 2017).

No estudo de Santos et al. (2020), foram analisadas quatro espécies de madeira amazônica quanto às suas propriedades físicas e mecânicas, revelando variações consideráveis entre elas. Os resultados evidenciaram a importância da correta caracterização da madeira para aplicações estruturais, uma vez que o uso inadequado de espécies com baixo desempenho pode comprometer a estabilidade das construções.

Adicionalmente, a resistência da madeira à ação de agentes biológicos e às variações climáticas também deve ser considerada. Tratamentos preservativos e técnicas de secagem controlada são fundamentais para ampliar a vida útil do material, bem como para assegurar o desempenho adequado em diferentes condições ambientais (SANTOS et al., 2020).

2.2. Treliças de Cobertura

As treliças de madeira são amplamente utilizadas em coberturas devido à sua eficiência estrutural e economia de material. Essas estruturas permitem vencer grandes vãos e distribuir

cargas de maneira eficaz, sendo fundamentais em projetos de edificações rurais e urbanas (CALIL JÚNIOR; DIAS, 2005).

A escolha adequada da tipologia de treliça é essencial para o desempenho da cobertura. Modelos como as tesouras de duas águas, lanternim e shed são comumente empregados, cada um com características específicas que atendem a diferentes necessidades arquitetônicas e estruturais (SOUSA, 2002).

A industrialização do sistema construtivo, incluindo a pré-fabricação de treliças, tem se mostrado uma tendência na construção civil brasileira. Essa abordagem facilita a montagem no canteiro de obras e melhora a qualidade das estruturas de madeira (CALIL JÚNIOR; DIAS, 2005).

Além disso, o uso de softwares de análise estrutural, como o método dos elementos finitos, permite simular diferentes configurações de treliças, auxiliando na otimização do consumo de material e garantindo a segurança das estruturas (CHRISTOFORO; LAHR, 2007).

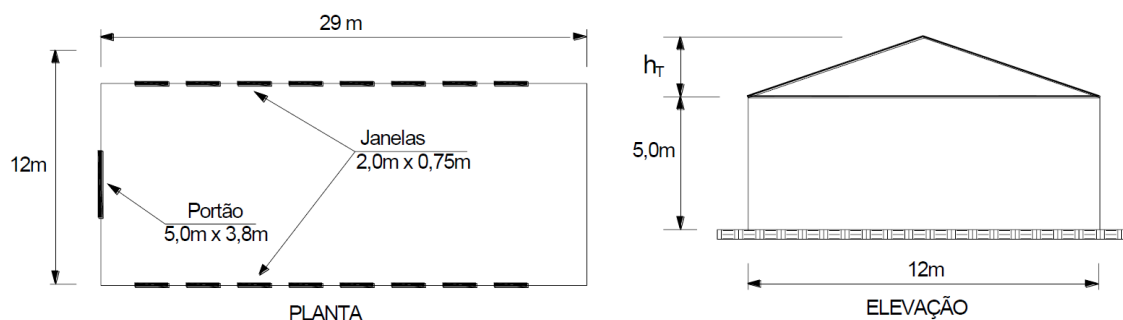
3. METODOLOGIA

Este trabalho consiste em dimensionar uma estrutura de cobertura de uma edificação para uso comercial, variando a disposição das terças e a estrutura da tesoura a fim de verificar o impacto desta variação na estabilidade e resistência total da estrutura.

3.1. Especificações da edificação

Para este estudo, utilizou-se um modelo de edificação para uso comercial adaptado de Pinheiro, Molina e Lahr (2010), com 12,00 metros de largura, 29,00 metros de comprimento, 5,00 metros de altura, 16 aberturas nas faces laterais de 2,00m x 0,75m (8 aberturas em cada face) e uma abertura frontal de 5,00m x 3,80m, como mostra a Figura a seguir.

Figura 1: Projeto de edificação para uso comercial com cobertura em duas águas



Fonte: Pinheiro, Molina e Lahr (2010)

Para a cobertura, foi utilizada uma telha ondulada de fibrocimento da marca Multilit, com espessura de 6,00mm, peso de 18 kgf/m² e inclinação mínima de 15°. A treliça escolhida foi do tipo Howe, tipo mais comum de treliça para vãos até 18 metros segundo Gesualdo (2003), com distância entre as terças de 3,125m nas extremidades e 3,25m entre as tesouras intermediárias, sendo adotada madeira folhosa classe D40, com densidade aparente de 660 kg/m³. As classes de resistência dos tipos de madeira definidas em ensaio de peças estruturais foram retiradas da Tabela 3 da ABNT NBR 7190-1:2022.

3.2. Ação do vento

Para cálculo das ações devidas ao vento, foi considerado que a edificação está localizada na cidade de Resende, no Rio de Janeiro, em zona urbana, com terreno fracamente acidentado e cota média estimada dos obstáculos de 10m, considerações essas feitas baseadas no material de aula de Alva (2024).

As ações do vento foram calculadas utilizando o software VisualVentos, programa de cálculo de esforços devido ao vento em edificações com planta regular e telhado a duas águas, segundo a ABNT NBR 6123:1988, desenvolvido por Pravia (2008), na Universidade de Passo Fundo (UPF). A ferramenta considera os efeitos dinâmicos do vento que entram em contato na parte externa da edificação. Sua estrutura é organizada em etapas, nas quais o usuário deve fornecer os parâmetros necessários, como as dimensões geométricas da planta arquitetônica e os dados meteorológicos característicos da região em estudo.

Neste trabalho, para o cálculo das ações do vento, será considerada a maior hipótese de sucção e a maior hipótese de sobrepressão, com o vento nas duas direções (0 e 90°), dentre quatro 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.

3.3. Dimensionamento

Todos os cálculos das ações permanentes e variáveis, combinações de ações no estado limite último e de serviço e dimensionamento seguiram os pr

ocedimentos de cálculo das normas técnicas ABNT NBR 7190-1:2022 e NBR 6120:2019.

A fim de estudar o comportamento de uma treliça em diferentes situações e formatos, foi considerado, em todos os casos, a mesma seção transversal para os elementos estruturais:

- Terças: 10cm x 20cm
- Banzos superior e inferior: 6cm x 12 cm
- Diagonais: 6cm x 12cm
- Montantes: 2 peças de 3cm x 12cm, com espaçamento de 6cm
- Barras de rigidez: 2 peças de 3cm x 12cm
- Barras de contraventamento: Barras de aço Ø 10mm

As combinações de ações também foram as mesmas, sendo, no total, cinco combinações para verificação no estado limite último, que foram calculadas seguindo a equação do item 5.1.3.1 da ABNT NBR 8681:2004, Eq. (1).

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

A partir da equação geral e considerando os coeficientes de ponderação correspondentes, foram elaboradas cinco combinações de ações para a verificação no estado limite último. Essas combinações são apresentadas a seguir:

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

$$F_d = \sum_{i=1}^m 1,40 * F_{Gi,k} + 1,40 * F_{Q1,k} \quad (2)$$

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

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

3. Sobrecarga como ação variável principal e vento de sobrepressão a 0 como ação variável secundária, conforme Eq. (4)

$$F_d = \sum_{i=1}^m 1,40 * F_{Gi,k} + 1,40 * F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n 1,40 * 0,50 * F_{Qj,k} \quad (4)$$

4. Vento de sucção à 0 como única ação variável, conforme Eq. (5)

$$F_d = \sum_{i=1}^m 0,90 * F_{Gi,k} + 1,40 * F_{Q1,k} \quad (5)$$

5. Vento de sucção à 90 graus como única ação variável, conforme Eq. (6)

$$F_d = \sum_{i=1}^m 0,90 * F_{Gi,k} + 1,40 * F_{Q1,k} \quad (6)$$

Para a verificação no estado limite de serviço, foi adotada a combinação quase permanente, 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 Tabela 21 da 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.

4. DIMENSIONAMENTO DA TRELIÇA

4.1. Dimensionamento inicial

4.1.1. Geometria e contraventamento

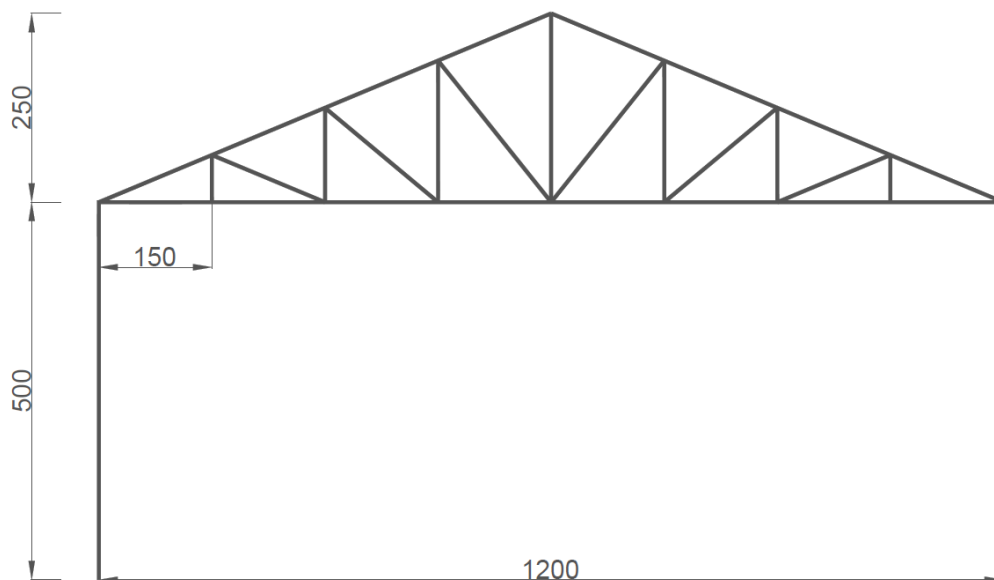
Segundo Gesualdo (2003), a proporção mais adequada entre a distância dos banzos (h) na região central e o vão livre (L) está compreendida no intervalo $L/7 \leq h \leq L/4$. Portanto, para um vão de 12 metros, a altura da treliça deve variar de 1,71m a 3,00m. Para o dimensionamento inicial, foi adotado uma altura $h_T = 2,50$ m. A inclinação do telhado é de $22,62^\circ$ para uma altura de 2,50 metros, respeitando a inclinação mínima de 15° estabelecida pelo fabricante.

Para o dimensionamento da estrutura, adotaram-se as seguintes premissas:

- A estrutura principal é composta por uma treliça do tipo Howe, cuja geometria está apresentada na Figura 3, e cujas seções transversais dos elementos estruturais são detalhadas no item 3.3 deste trabalho;
- Os nós da treliça foram considerados como rótulas ideais, ou seja, sem transmissão de momento fletor;

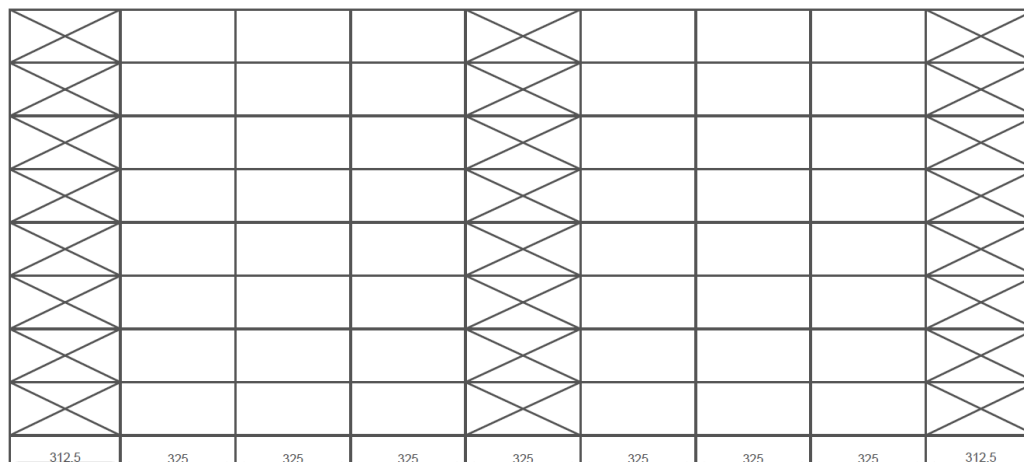
- A treliça foi modelada como estrutura isostática, com um apoio fixo e um apoio móvel;
- A treliça está apoiada sobre pilares metálicos, os quais não foram dimensionados neste estudo;
- O contraventamento horizontal no plano das terças (banzos superior e inferior) é do tipo "X", instalado a cada quatro tramos, conforme ilustra a Figura 4;
- O contraventamento vertical no plano do montante central também é do tipo "X", posicionado a cada quatro tramos, conforme mostrado na Figura 5;
- Nas duas treliças centrais foram previstas barras de rigidez longitudinal, dispostas ao longo do eixo principal do galpão;
- As ligações entre os elementos estruturais são realizadas por meio de parafusos passantes;
- Considera-se que o material atua no regime elástico linear, ou seja, todos os elementos permanecem dentro da validade da Lei de Hooke;
- O módulo de elasticidade longitudinal (E_c0) é considerado constante para toda a estrutura.

Figura 3 – Seção transversal da tesoura



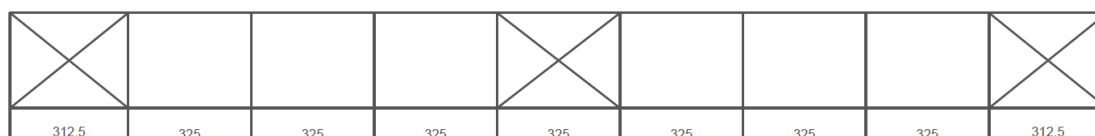
Fonte: Autor (2025)

Figura 4 – Contraventamento no plano das terças



Fonte: Autor (2025)

Figura 5 – Contraventamento no plano vertical



Fonte: Autor (2025)

4.1.2. Cálculo das ações e combinação

4.1.2.1. Cargas atuantes

As cargas atuantes foram calculadas considerando o peso próprio estrutural (peças estruturais) e não estrutural (telhas) como carregamento permanente, e sobrecarga e carga de vento como carregamento variável.

Para o cálculo do carregamento permanente, considerou-se a carga dos banzos, montantes, diagonais, barras de rigidez e as barras de aço de contraventamento, além do peso das peças metálicas de união, que, segundo a ABNT NBR 7190-1:2022, a fim de cálculo inicial, considera-se 3% (três por cento) do valor do peso próprio da estrutura de madeira, além do peso próprio da telha, definido pelo fabricante. Assim, o carregamento permanente total foi de 34,14 kgf/m². Como a área de influência de cada nó da tesoura é de 4,88 m², o carregamento permanente total da estrutura inicial foi de 1,66 kN em cada nó da tesoura.

A norma técnica ABNT NBR 6120:2019 define que, para inclinações superiores a 5%, a carga variável uniformemente distribuída deve ser de 0,25 kN/m². Considerando a área de influência, a carga variável é de 1,22 kN em cada nó.

Já o carregamento variável devido ao vento foi calculado com o software VisualVentos, onde, das quatro hipóteses, a hipótese 3 apresentou a maior carga de sucção, enquanto a hipótese 4 apresentou a maior carga de sobrepressão. O software VisualVentos apresenta seus resultados em kN/m, onde o carregamento está distribuído de forma longitudinal na edificação. Na Tabela 1 estão descritos os carregamentos calculados a partir do software VisualVentos nas duas direções e nos dois eixos.

Tabela 1: Forças provocadas pela ação do vento

Lado		Direito	Esquerdo
Vento 0			
Vento Sucção	kN (nó) - y	-3,20	-3,20
	kN (nó) - x	-0,86	-0,86
Vento Sobrepressão	kN (nó) - y	0,46	0,46
	kN (nó) - x	0,12	0,12
Vento 90			
Vento Sucção	kN (nó) - y	-2,27	-2,51
	kN (nó) - x	-0,61	-0,67
Vento Sobrepressão	kN (nó) - y	1,38	1,14
	kN (nó) - x	0,37	0,31

Fonte: Autor (2025)

4.1.2.2. Combinações

Com os carregamentos permanentes e variáveis definidos, foi possível calcular as combinações de ações para a tesoura, a fim de verificá-la quanto ao estado limite último. A norma técnica ABNT NBR 8681:2004 apresenta todo o procedimento de cálculo das combinações, suas respectivas equações, bem como os coeficientes de ponderação, fatores de combinação e fatores de redução utilizados em carregamentos variáveis. Os resultados dos esforços por nó são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Esforços por nó de cada combinação (kN)

Lado:	Direito	Esquerdo
Sobrecarga como única ação variável		
Fd (kN)	4,04	4,04
Sobrecarga como ação variável principal, vento a 90 graus com sobrepressão		
Fd,y (kN)	5,00	4,84
Fd,x (kN)	4,29	4,25
Sobrecarga como ação variável principal, Vento a 0 graus com sobrepressão		
Fd,y (kN)	4,36	4,36
Fd,x (kN)	4,12	4,12
Vento à 0 graus como única ação variável (sucção apenas)		
Fd,y (kN)	-2,99	-2,99
Fd,x (kN)	0,30	0,30
Vento à 90 graus como única ação variável (sucção apenas)		
Fd,y (kN)	-1,69	-2,01
Fd,x (kN)	0,64	0,56

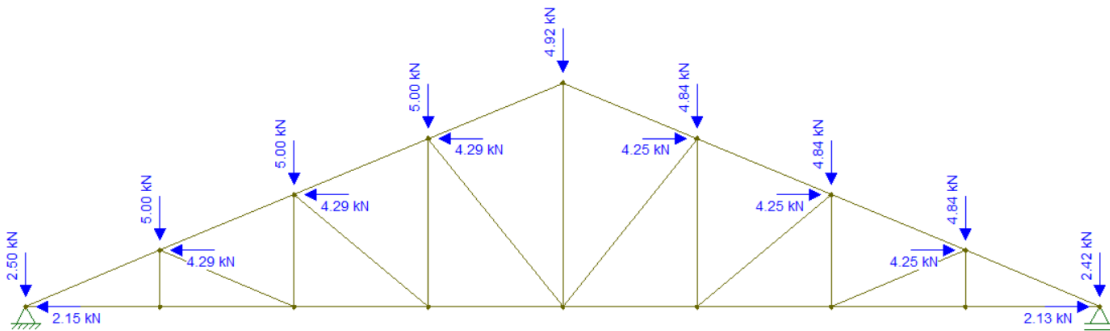
Fonte: Autor (2025)

É possível notar que, a combinação com o vento de sobrepressão a 90° apresentou os maiores carregamentos na estrutura. Percebe-se, também, que para os ventos a 90°, o carregamento varia conforme o lado da tesoura, enquanto, para o vento a 0, se mantém constante ao longo da estrutura.

Para cálculo dos esforços nas extremidades da tesoura, utilizou-se metade do carregamento no nó, pelo fato da área de influência dos nós dos apoios ser metade do nó central.

Todas as combinações apresentadas na tabela 2 foram inseridas no software *ftool*, onde, na figura 6, está apresentada a combinação mais crítica utilizada para verificação do estado limite último e de serviço.

Figura 6: Combinação mais crítica - sobrecarga como ação principal, vento de sobrepressão 90° com ação secundária



Fonte: Autor (2025)

Com a treliça modelada e os carregamentos devidamente aplicados no software Ftool, foi possível determinar os esforços solicitantes em cada barra da estrutura. A Tabela a seguir resume os valores máximos de força normal, tanto de tração quanto de compressão, obtidos para os diferentes elementos estruturais:

- Banzo superior: tração máxima de 26,10 kN e compressão máxima de 43,30 kN;
- Banzo inferior: tração máxima de 42,10 kN e compressão máxima de 24,00 kN;
- Montante: tração máxima de 11,60 kN e compressão máxima de 9,10 kN;
- Diagonal: tração máxima de 5,70 kN e compressão máxima de 7,30 kN.

4.1.3. Verificações

O coeficiente de modificação foi calculado a partir das Tabelas 4 e 5 da ABNT NBR 7190-1:2022, onde considerou-se um carregamento de longa duração, com coeficiente de modificação 1 (k_{mod1}) igual a 0,7, e classe de umidade 1, com coeficiente de modificação 2 (k_{mod2}) igual a 1,0. Portanto, o coeficiente de modificação final (k_{mod}) foi igual a 0,7. A norma também apresenta todo o procedimento para verificação dos estados limite último e de serviço para terças e tesouras.

4.1.3.1. Estado Limite Último (ELU)

4.1.3.1.1. Terças

As 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. Para ambas as verificações, a seção transversal da terça atende quanto a condição de segurança.

4.1.3.1.2. Tesoura

A tesoura deve ser verificada quanto a estabilidade, descrita no item 6.5 da ABNT NBR 7190-1:2022, com a verificação de esbeltez (6.5.3), esbeltez relativa (6.5.4) e a condição de estabilidade de peças comprimidas e flexocomprimidas (6.5.5). Além disso, deve ser verificada quanto a segurança, itens 6.3.2 (tração axial) e 6.3.3 (compressão axial).

Toda a estrutura da tesoura (montantes, diagonais, banzos inferior e superior) atendeu as verificações de estabilidade e segurança. Vale ressaltar que os critérios de estabilidade foram mais críticos para a escolha das seções transversais dos elementos quando se comparado aos critérios de segurança.

A Tabela 3 apresenta um resumo com os esforços solicitantes em cada elemento, suas tensões, e as verificações de segurança e estabilidade. Para que o elemento seja verificado, ele deve atender aos seguintes critérios:

- Comprimento de flambagem: deve ser menor que 140;
- Segurança:
 - Cisalhamento: menor que a força de cisalhamento, que, para o tipo de madeira escolhida, é igual a 2,33;
 - Flexão oblíqua, flexotração e flexocompressão: menor que 1,00;
 - Compressão e tração axial: menor que a resistência da madeira, sendo 13,0 MPa para tensões de compressão e 12,0 MPa para tensões de tração.
- Estabilidade: deve ser menor que 1,00;
- Deslocamento: deslocamento da peça deve ser menor que o limite.

Tabela 3: Resumo de verificações para o estado limite último (ELU)

		UN	Terça	Tesoura			
				Montante	Banzo Inferior	Banzo Superior	Diagonal
Seção Transversal		cm	10X20	2. 3X12	6X12	6X12	6X12
Kx.Lx		cm	325,00	250,00	150,00	162,50	240,12
Ky.Ly		cm	325,00	250,00	150,00	162,50	240,12
Resistência	fc0d	MPa	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
	ft0d	MPa	-	12,00	12,00	12,00	12,00
E0,05		N/mm ²	13000,00	13000,00	13000,00	13000,00	13000,00
λx			-	72,17	43,30	46,91	69,32
λy			-	54,55	86,60	93,82	138,63
Solicitações	Nc,d	N	-	9100,00	24000,00	43300,00	7300,00
	Nt,d	N	-	11600,00	42100,00	26100,00	5700,00
	MSd,x	kN.m	1,39	-	-	-	-
	MSd,y	kN.m	1,28	-	-	-	-
	Vsd,x	kN	1,71	-	-	-	-
	Vsd,y	kN	1,05	-	-	-	-
Tensões	σNc,d	N/mm ²	-	1,26	3,33	6,01	1,01
	σNt,d	N/mm ²	-	1,61	5,85	3,63	0,79
	σMx,d	N/mm ²	2,08	-	-	-	-
	σMy,d	N/mm ²	5,12	-	-	-	-
	τd,x	N/mm ²	0,13	-	-	-	-
	τd,y	N/mm ²	0,08	-	-	-	-
ELU	Segurança	Compressão	-	PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
		Tração	-	PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
		Flexão oblíqua	0,51	-	-	-	-
		Cisalhamento	0,13	-	-	-	-
	Estabilidade	x	-	0,13	0,27	0,49	0,10
		y	-	0,10	0,45	0,92	0,32

Fonte: Autor (2025)

4.1.3.2. Estado Limite de Serviço (ELS)

As verificações de deslocamentos limites instantâneos e finais foram feitas de acordo com o capítulo 8 da ABNT NBR 7190-1:2022. Para as terças, foram calculadas as flechas instantâneas e finais nas duas direções, a fim de verificar a estrutura. Já para a tesoura, utilizou-se os deslocamentos encontrados no software Ftool para realizar as verificações.

Segundo a Tabela 21 da ABNT NBR 7190-1:2022, para vigas bi-apoiadas, o deslocamento instantâneo deve variar de $L/300$ a $L/500$, sendo L o comprimento do vão da tesoura. Para deslocamentos finais, essa variação muda de $L/150$ a $L/300$, sendo L o vão livre da estrutura analisada. Para as terças, $L = 3,25$ m, já para a tesoura, $L = 12,0$ m.

Com os valores dos comprimentos de cada peça, foi possível calcular os deslocamentos limites necessários para a verificação do estado limite de serviço. As flechas limites

instantâneas variam de 0,65 cm a 1,08 cm, enquanto as flechas finais variam de 1,08 cm a 2,17 cm para as terças, e 2,40 cm a 4,00 cm e 4,00 cm a 8,00 cm para a tesoura.

No caso das terças, a flecha instantânea foi de 0,18 cm no eixo x 0,30 cm no eixo y, enquanto a flecha final foi de 0,15 cm no eixo x e 0,24 cm no eixo y, valores menores que as limites e, portanto, foi verificada quanto ao estado limite de serviço. Já para a tesoura, a flecha instantânea foi de 0,084 cm, enquanto a final foi de 0,071, também verificadas.

Seguindo os procedimentos de cálculo encontrados no item 8.1 da norma, a estrutura está verificada quanto ao estado limite de serviço.

4.1.4. Ligações

O cálculo das ligações seguiu o capítulo 7 da ABNT NBR 7190-1:2022. Segundo a norma, o critério de dimensionamento dos elementos de ligação deve atender a condição de segurança apresentada no item 7.1.2, onde o valor da resistência da ligação deve ser maior ou igual a solicitação atuante. Para a solicitação, foi utilizado o maior valor dentre tração e compressão de toda a tesoura, a fim de calcular o maior número de parafusos entre uma das ligações da estrutura.

O tipo de ligação escolhido foi ligações por parafusos passantes, sendo o parafuso passante padrão ASTM A307, com resistência $f_{y,k}$ de 250 MPa e $f_{u,k}$ de 415 MPa, com diâmetro nominal utilizado de 10 mm.

Para cálculo dos modos de falha, utilizou-se a Tabela 19 da NBR 7190:2022, que apresenta os modos de falha e as equações para ligações com pinos metálicos com duas seções de corte.

Seguindo os critérios de dimensionamento, são necessários 6 parafusos passantes Ø 10 mm ASTM A307 para que a ligação resista a maior solicitação.

4.2. Análises

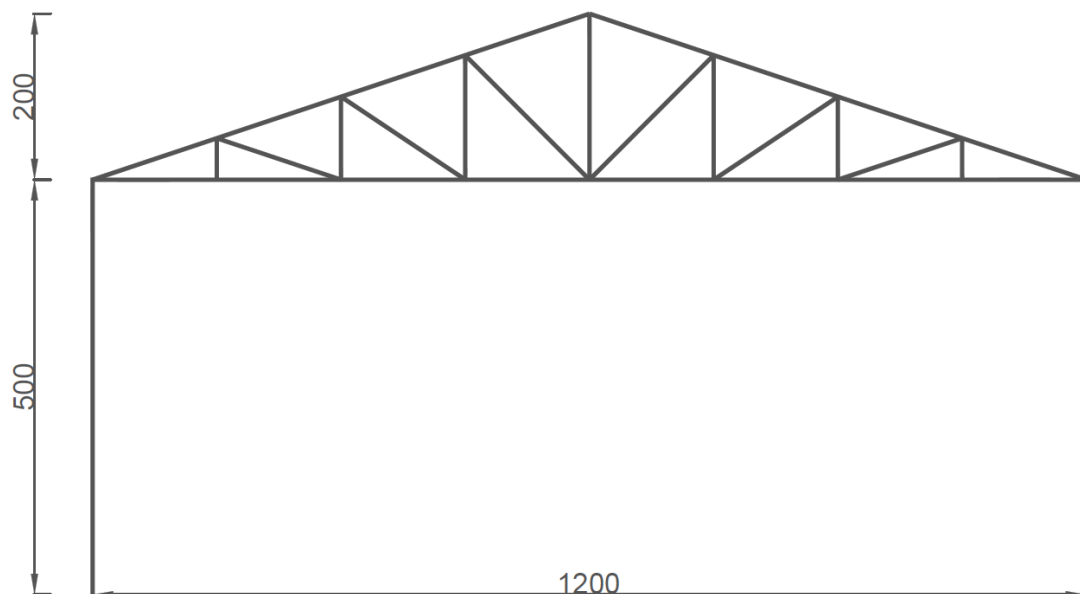
A fim de identificar o efeito da alteração da estrutura da treliça na edificação, foram realizadas três análises, mantendo os procedimentos de cálculo e verificação, a seção transversal dos elementos estruturais e os tipos de combinação realizados.

4.2.1. Variação de altura

Nesta análise, a altura da tesoura foi reduzida para 2,00 m, respeitando as proporções calculadas no item 4.1.1 deste trabalho. Para esta altura, a inclinação do telhado diminuiu para

18,43°, se mantendo acima da inclinação mínima das telhas especificadas pela fabricante. A redução na altura provocou alterações nas medidas dos elementos estruturais da tesoura, como mostra a Figura 7 abaixo.

Figura 7: Seção transversal da tesoura com variação de altura



Fonte: Autor (2025)

Para esta análise, o carregamento permanente por nó foi de 1,64 kN e o carregamento variável dado pela sobrecarga foi de 1,22 kN (mantendo os 0,25 kN/m² da norma). A variação de altura provocou uma alteração da carga variável provocada pela ação do vento, apresentada na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Carga variável provocada pela ação do vento para hT = 2,00 m

Lado:		Direito	Esquerdo
Vento 0			
Vento Sucção	kN (nó) - y	-3,22	-3,22
	kN (nó) - x	-0,86	-0,86
Vento Sobrepressão	kN (nó) - y	0,38	0,38
	kN (nó) - x	0,10	0,10
Vento 90			
Vento Sucção	kN (nó) - y	-2,88	-2,46
	kN (nó) - x	-0,77	-0,66
Vento Sobrepressão	kN (nó) - y	0,70	1,12
	kN (nó) - x	0,19	0,30

Fonte: Autor (2025)

A partir desses carregamentos, foi possível calcular os esforços por nó de cada combinação, valores esses apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Combinações de ações (kN)

Lado:	Direito	Esquerdo
Sobrecarga como única ação variável		
Fd (kN)	4,01	4,01
Sobrecarga como ação variável principal, vento a 90 graus com sobrepressão		
Fd,y (kN)	4,49	4,79
Fd,x (kN)	4,14	4,22
Sobrecarga como ação variável principal, Vento a 0 graus com sobrepressão		
Fd,y (kN)	4,27	4,27
Fd,x (kN)	4,08	4,08
Vento à 0 graus como única ação variável (sucção apenas)		
Fd,y (kN)	-3,02	-3,02
Fd,x (kN)	0,27	0,27
Vento à 90 graus como única ação variável (sucção apenas)		
Fd,y (kN)	-2,56	-1,97
Fd,x (kN)	0,40	0,56

Fonte: Autor (2025)

O procedimento de cálculo foi o mesmo utilizado no dimensionamento anterior, com a treliça sendo considerada uma treliça ideal, aplicando as cargas em cada nó e utilizando o software Ftool para encontrar os esforços solicitantes.

A tabela 8 apresenta um resumo com todas os perfis de cada elemento, comprimentos de flambagem, solicitações máximas de cada elemento, tensões e as verificações, que seguiram o mesmo procedimento descrito anteriormente.

Tabela 8: Resumo de verificações – ELU e ELS

		UN	Terça	Tesoura			
				Montante	Banzo Inferior	Banzo Superior	Diagonal
Seção Transversal		cm	10X20	2. 3X12	6X12	6X12	6X12
Kx.Lx		cm	325,00	200,00	150,00	158,11	212,13
Ky.Ly		cm	325,00	200,00	150,00	158,11	212,13
Resistência	fc0d	MPa	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
	ft0d	MPa	-	12,00	12,00	12,00	12,00
E0,05		N/mm ²	13000,00	13000,00	13000,00	13000,00	13000,00
λx			-	57,74	43,30	45,64	61,24
λy			-	43,64	86,60	91,28	122,47
Solicitações	Nc,d	N	-	8800,00	29100,00	47700,00	7800,00
	Nt,d	N	-	11300,00	47700,00	30600,00	6100,00
	MSd,x	kN.m	1,40	-	-	-	-
	MSd,y	kN.m	1,04	-	-	-	-
	Vsd,x	kN	1,72	-	-	-	-
	Vsd,y	kN	0,85	-	-	-	-
Tensões	σNc,d	N/mm ²	-	1,22	4,04	6,63	1,08
	σNt,d	N/mm ²	-	1,57	6,63	4,25	0,85
	σMx,d	N/mm ²	2,10	-	-	-	-
	σMy,d	N/mm ²	5,16	-	-	-	-
	τd,x	N/mm ²	0,13	-	-	-	-
	τd,y	N/mm ²	0,06	-	-	-	-
ELU	Segurança	Compressão	-	PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
		Tração	-	PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU
		Flexão oblíqua	0,51	-	-	-	-
		Cisalhamento	0,13	-	-	-	-
	Estabilidade	x	-	0,11	0,33	0,54	0,10
		y	-	0,10	0,54	0,97	0,27
ELS	δinst	x	cm	0,18	0,092		
	δinst	y	cm	0,24			
	δfin	x	cm	0,15	0,076		
	δfin	y	cm	0,20			
	δinst,lim	x	cm	1,08	2,40		
	δinst,lim	y	cm	0,65			
	δfin,lim	x	cm	5,33	4,00		
	δfin,lim	y	cm	2,67			

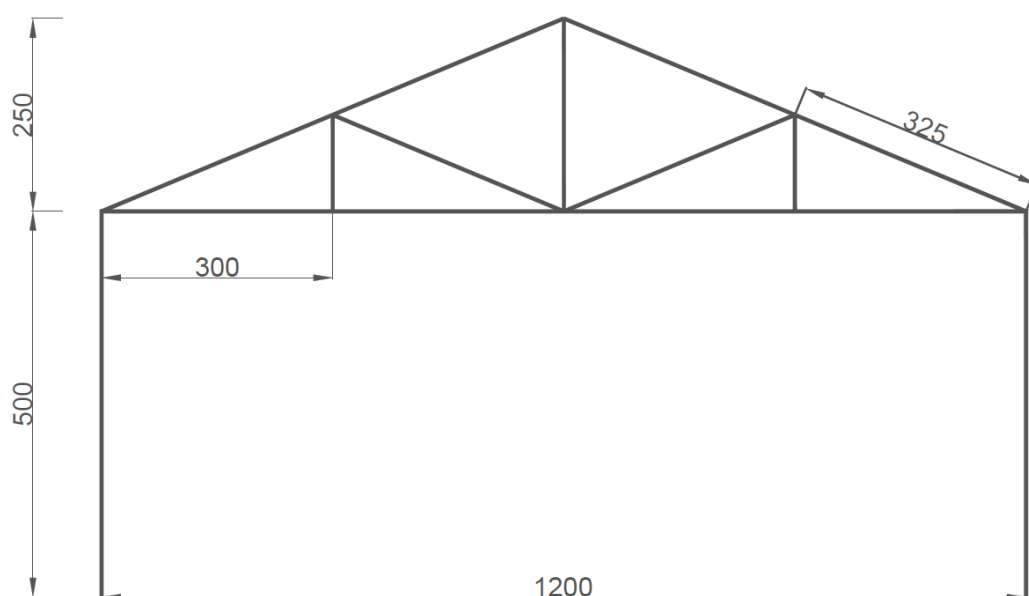
Fonte: Autor (2025)

Devido ao aumento do carregamento máximo solicitante para esta análise, adotando o mesmo tipo de ligação utilizado no dimensionamento inicial, são necessários 7 parafusos para que a ligação tenha a resistência necessária.

4.2.2. Retirada de diagonais e montantes

Nesta análise, foram retirados duas diagonais e dois montantes, mantendo a altura da treliça original. Para que a estrutura continue se comportando como uma treliça ideal, ou seja, apenas esforços normais, duas terças tiveram que ser retiradas, aumentando assim o comprimento de flambagem dos banzos inferior e superior. É possível ver a seção transversal da edificação na Figura 13.

Figura 13: Seção transversal da tesoura com retirada de elementos



Fonte: Autor (2025)

Como a estrutura externa da edificação se manteve, os carregamentos provocados pela ação do vento são os mesmos do dimensionamento inicial, alterando, portanto, apenas a carga permanente e o carregamento variável provocado pela sobrecarga.

A diminuição na quantidade de nós da estrutura gerou um aumento na área de influência em 100% de cada nó, provocando carregamentos consideravelmente maiores que os vistos anteriormente neste trabalho. Foi obtido uma carga permanente de 2,73 kN/nó, um aumento de 64% em relação ao dimensionamento inicial e uma carga variável de 2,44 kN/nó, um aumento de 100%. A Tabela 9 apresenta os resultados das cargas para cada combinação, e a Tabela 10, os esforços solicitantes por nó.

Com isso, foi realizada a segunda análise onde foram retirados oito elementos. A Figura 14 mostra a configuração da estrutura e a nomenclatura das barras para esta análise.

Tabela 9: Combinações de ações (kN)

Lado:	Direito	Esquerdo
Sobrecarga como única ação variável		
Fd (kN)	7,23	7,23
Sobrecarga como ação variável principal, vento a 90 graus com sobrepressão		
Fd,y (kN)	9,15	8,83
Fd,x (kN)	7,74	7,66
Sobrecarga como ação variável principal, Vento a 0 graus com sobrepressão		
Fd,y (kN)	7,88	7,88
Fd,x (kN)	7,40	7,40
Vento à 0 graus como única ação variável (sucção apenas)		
Fd,y (kN)	-6,51	-6,51
Fd,x (kN)	0,05	0,05
Vento à 90 graus como única ação variável (sucção apenas)		
Fd,y (kN)	-3,92	-4,57
Fd,x (kN)	0,75	0,57

Fonte: Autor (2025)

Na Tabela 11 observa-se o resumo das verificações no estado limite último e de serviço.

Tabela 11: Resumo de verificações – ELU e ELS

			UN	Terça	Tesoura			
				Montante	Banzo Inferior	Banzo Superior	Diagonal	
Seção Transversal			cm	10X20	2. 3X12	6X12	6X12	6X12
Kx.Lx			cm	325,00	250,00	300,00	325,00	325,00
Ky.Ly			cm	325,00	250,00	300,00	325,00	325,00
Resistência	fc0d	MPa	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	
	ft0d	MPa	-	12,00	12,00	12,00	12,00	
E0,05		N/mm ²	13000,00	13000,00	13000,00	13000,00	13000,00	
λx			-	72,17	86,60	93,82	93,82	
λy			-	54,55	173,21	187,64	187,64	
Solicitações	Nc,d	N	-	6400,00	23200,00	34900,00	9000,00	
	Nt,d	N	-	7100,00	35900,00	25100,00	8100,00	
	MSd,x	kN.m	2,59	-	-	-	-	
	MSd,y	kN.m	9,39	-	-	-	-	
	Vsd,x	kN	3,19	-	-	-	-	
	Vsd,y	kN	3,85	-	-	-	-	
Tensões	σNc,d	N/mm ²	-	1,26	3,33	6,01	1,01	
	σNt,d	N/mm ²	-	1,61	5,85	3,63	0,79	
	σMx,d	N/mm ²	3,89	-	-	-	-	
	σMy,d	N/mm ²	9,57	-	-	-	-	
	τd,x	N/mm ²	0,24	-	-	-	-	
	τd,y	N/mm ²	0,29	-	-	-	-	
ELU	Segurança	Compressão	-	PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU	
		Tração	-	PASSOU	PASSOU	PASSOU	PASSOU	
		Flexão oblíqua	0,95	-	-	-	-	
		Cisalhamento	0,29	-	-	-	-	
	Estabilidade	x	-	0,09	0,43	0,74	0,19	
		y	-	0,07	1,57	2,76	0,09	
ELS	δinst	x	cm	0,32	0,140			
	δinst	y	cm	0,57				
	δfin	x	cm	0,26	0,112			
	δfin	y	cm	0,44				
	δinst,lim	x	cm	1,08	2,40			
	δinst,lim	y	cm	0,65				
	δfin,lim	x	cm	5,33	4,00			
	δfin,lim	y	cm	2,67				

Fonte: Autor (2025)

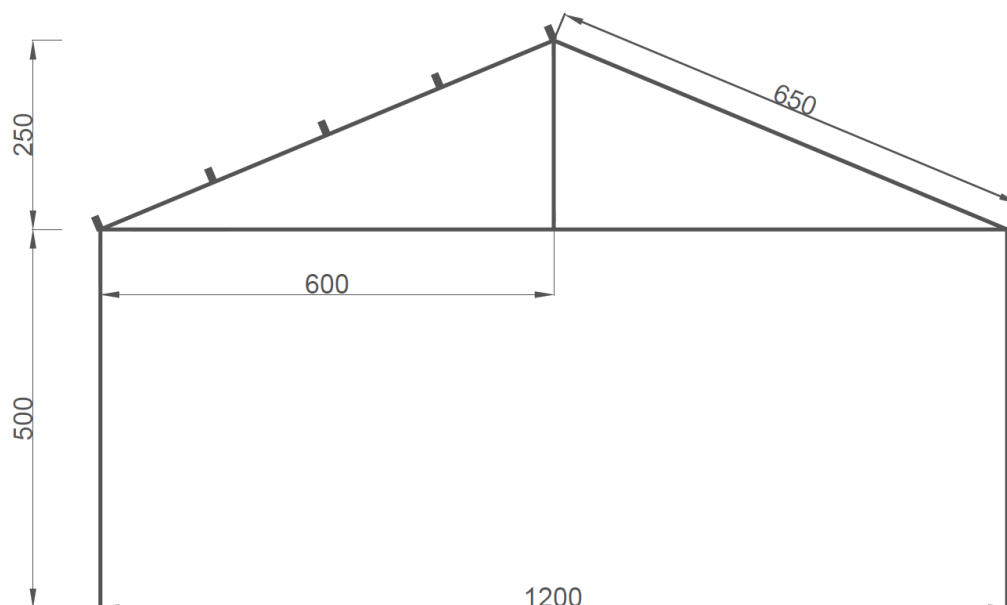
A redução no carregamento máximo solicitante provocou uma redução no número de parafuso, que foi de 6 parafusos no dimensionamento inicial para 5 parafusos nesta análise.

4.2.3. Retirada dos elementos internos da tesoura

Por fim, na terceira e última análise, retirou-se todos os elementos internos da tesoura, deixando apenas os banzos superior e inferior e o montante central, conforme visto na Figura 15. Essa retirada gerou um aumento considerável no comprimento de flambagem dos banzos,

e, portanto, se fez necessário a permanência de todas as terças conforme o dimensionamento inicial.

Figura 15: Seção transversal da tesoura



Fonte: Autor (2025)

Nessa análise, a tesoura deixou de ser uma treliça ideal, isto é, os elementos da tesoura estão submetidos a força normal, força cortante e momento fletor. Para isso, é necessário verificar a os banzos e montante de acordo com os itens 6.3.6 e 6.3.7 da ABNT NBR 7190-1:2022, verificações de segurança para barras submetidas a flexotração e flexocompressão. Para as terças, a verificação se manteve.

Para essa situação, o carregamento permanente foi de 1,52 kN/nó, enquanto os carregamentos variáveis se mantiveram, devido a não alteração da área de influência ou das dimensões externas da treliça, quando se comparado ao dimensionamento inicial.

A Tabela 12 apresenta as forças por nó de cada combinação, enquanto as Tabelas 13, 14 e 15 mostram as forças normais, forças cortantes e momento fletor solicitantes por barra, respectivamente. A nomenclatura das barras é mostrada na Figura 16.

Tabela 12: Combinações de ações (kN)

Lado:	Direito	Esquerdo
Sobrecarga como única ação variável		
Fd (kN)	3,83	3,83
Sobrecarga como ação variável principal, vento a 90 graus com sobrepressão		
Fd,y (kN)	4,79	4,63
Fd,x (kN)	4,09	4,04
Sobrecarga como ação variável principal, Vento a 0 graus com sobrepressão		
Fd,y (kN)	4,15	4,15
Fd,x (kN)	3,91	3,91
Vento à 0 graus como única ação variável (sucção apenas)		
Fd,y (kN)	-3,12	-3,12
Fd,x (kN)	0,16	0,16
Vento à 90 graus como única ação variável (sucção apenas)		
Fd,y (kN)	-1,82	-2,15
Fd,x (kN)	0,51	0,42

Fonte: Autor (2025)

Na Tabela 17 é possível visualizar o resumo das verificações do estado limite último e de serviço. Para esta análise, foram necessários 5 parafusos Ø 10mm ASTM A307 para resistir ao esforço solicitado.

Tabela 17: Resumo de verificações – ELU e ELS

		UN	Terça	Tesoura		
				Montante	Banzo Inferior	Banzo Superior
Seção Transversal		cm	10X20	2. 3X12	6X12	6X12
Kx.Lx		cm	325,00	250,00	600,00	650,00
Ky.Ly		cm	325,00	250,00	600,00	650,00
Resistência	fc0d	MPa	13,00	13,00	13,00	13,00
	ft0d	MPa	-	12,00	12,00	12,00
E0,05		N/mm ²	13000,00	13000,00	13000,00	13000,00
λ_x			-	72,17	173,21	187,64
λ_y			-	54,55	346,41	375,28
Solicitações	Nc,d	N	-	1500,00	18200,00	36300,00
	Nt,d	N	-	1800,00	34000,00	21400,00
	MSd,x	kN.m	1,39	0,50	3,70	8,80
	MSd,y	kN.m	1,28	-	-	-
	Vsd,x	kN	1,71	0,30	0,90	6,00
	Vsd,y	kN	1,05	-	-	-
Tensões	$\sigma_{Nc,d}$	N/mm ²	-	0,21	2,53	5,04
	$\sigma_{Nt,d}$	N/mm ²	-	0,25	4,72	2,97
	$\sigma_{Mx,d}$	N/mm ²	2,08	3,47	25,69	61,11
	$\sigma_{My,d}$	N/mm ²	5,12	-	-	-
	$\tau_{d,x}$	N/mm ²	0,13	0,06	0,19	1,25
	$\tau_{d,y}$	N/mm ²	0,08	-	-	-
ELU	Flexocompressão		-	0,12	0,94	2,39
	Flexotração		-	0,14	1,29	2,29
	Flexão oblíqua		0,51	-	-	-
	Cisalhamento		0,13	0,06	0,19	1,25
	Estabilidade	x	-	0,02	2,52	5,93
		y	-	0,02	5,72	11,39
ELS	δ_{inst}	x	cm	0,18	2,251	
	δ_{inst}	y	cm	0,30		
	δ_{fin}	x	cm	0,15	1,849	
	δ_{fin}	y	cm	0,24		
	$\delta_{inst,lim}$	x	cm	1,08	2,40	
	$\delta_{inst,lim}$	y	cm	0,65		
	$\delta_{fin,lim}$	x	cm	5,33	4,00	
	$\delta_{fin,lim}$	y	cm	2,67		

Fonte: Autor (2025)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do dimensionamento das quatro estruturas, é possível analisá-las quanto as verificações de segurança, estabilidade, deslocamentos limites e número de ligações. Na Tabela 18, é possível observar a verificação dos comprimentos de flambagem. A tabela 19 já apresenta as verificações de segurança e estabilidade no estado limite último, enquanto na Tabela 20 estão indicadas as verificações do estado limite de serviço e o número de parafusos para cada tipo de análise.

Tabela 18: Comparação das verificações para as quatro estruturas – parte 1

Estrutura	Tipo de Análise	Elemento	λ_x	λ_y
1	Análise Inicial	Terças	-	-
		Banzo inferior	PASSOU!	PASSOU!
		Banzo superior	PASSOU!	PASSOU!
		Diagonais	PASSOU!	PASSOU!
		Montantes	PASSOU!	PASSOU!
2	Diminuição de altura da treliça para H=2,00m	Terças	-	-
		Banzo inferior	PASSOU!	PASSOU!
		Banzo superior	PASSOU!	PASSOU!
		Diagonais	PASSOU!	PASSOU!
		Montantes	PASSOU!	PASSOU!
3	Alteração da estrutura da treliça, com redução do número de diagonais, montantes e terças	Terças	-	-
		Banzo inferior	PASSOU!	NÃO PASSOU!
		Banzo superior	PASSOU!	NÃO PASSOU!
		Diagonais	PASSOU!	NÃO PASSOU!
		Montantes	PASSOU!	PASSOU!
4	Retirada dos elementos internos da tesoura, deixando apenas o montante central	Terças	-	-
		Banzo inferior	NÃO PASSOU!	NÃO PASSOU!
		Banzo superior	NÃO PASSOU!	NÃO PASSOU!
		Montantes	PASSOU!	PASSOU!

Fonte: Autor (2025)

Tabela 19: Comparação das verificações para as quatro estruturas – parte 2

Estrutura	Elemento	ELU						Estabilidade
		Compressão	Tração	Flexão oblíqua	Flexocompressão	Flexotração	Cisalhamento	
1	Terças	-	-	PASSOU!	-	-	PASSOU!	-
	Banzo inferior	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	PASSOU!
	Banzo superior	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	PASSOU!
	Diagonais	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	PASSOU!
	Montantes	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	PASSOU!
2	Terças	-	-	PASSOU!	-	-	PASSOU!	-
	Banzo inferior	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	PASSOU!
	Banzo superior	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	PASSOU!
	Diagonais	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	PASSOU!
	Montantes	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	PASSOU!
3	Terças	-	-	PASSOU!	-	-	PASSOU!	-
	Banzo inferior	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	NÃO PASSOU!
	Banzo superior	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	NÃO PASSOU!
	Diagonais	PASSOU!	PASSOU!	-	-	-	-	NÃO PASSOU!
	Montantes	PASSOU!	PASSOU!	-	PASSOU!	PASSOU!	-	PASSOU!
4	Terças	-	-	PASSOU!	-	-	PASSOU!	-
	Banzo inferior	-	-	-	PASSOU!	NÃO PASSOU!	PASSOU!	NÃO PASSOU!
	Banzo superior	-	-	-	NÃO PASSOU!	NÃO PASSOU!	PASSOU!	NÃO PASSOU!
	Montantes	-	-	-	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!

Fonte: Autor (2025)

Tabela 20: Comparação das verificações para as quatro estruturas – parte 3

Estrutura	Elemento	ELS								Nº Parafusos
		δinst				δfin				
		L/300		L/500		L/150		L/300		
		x	y	x	y	x	y	x	y	
1	Terças	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	6,00
	Banzo inferior									
	Banzo superior									
	Diagonais	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	
	Montantes									
2	Terças	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	7,00
	Banzo inferior									
	Banzo superior									
	Diagonais	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	
	Montantes									
3	Terças	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	5,00
	Banzo inferior									
	Banzo superior									
	Diagonais	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	
	Montantes									
4	Terças	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	5,00
	Banzo inferior									
	Banzo superior	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	PASSOU!	
	Montantes									

Fonte: Autor (2025)

A análise das quatro configurações estruturais da cobertura da edificação revelou diferenças significativas em relação à estabilidade da estrutura, mas poucas diferenças quanto as verificações de segurança e deslocamento. Também foi possível observar que a variação do número de parafusos para cada tipo de estrutura foi pequena. A estrutura inicial, apresentou

bom desempenho em todas as verificações, servindo como base para as demais análises comparativas.

A primeira variação consistiu na redução da altura da treliça para 2,0 m, o que diminuiu a inclinação do telhado, mas manteve-se dentro dos limites da fabricante. Apesar do aumento dos esforços solicitantes, a estrutura continuou atendendo aos critérios de segurança, estabilidade e deslocamentos. Para este caso, houve um aumento pequeno no número de parafusos, de 6 para 7, devido ao aumento da solicitação máxima.

Quando se retirou dois montantes e duas diagonais de cada lado da tesoura, observou-se uma redução do carregamento total, porém, uma maior carga por nó, resultante do aumento da área de influência por nó da tesoura. A retirada desses elementos afetou o comprimento de flambagem dos banzos e diagonais, que o comprometeu a estabilidade nessas estruturas, mas não afetou a estrutura quanto à segurança nos outros critérios do ELU e os deslocamentos limites. Nessa análise, o número de parafusos na ligação diminuiu de 6 para 5 parafusos, devido a redução dos esforços solicitantes nos elementos.

Por fim, foi feita uma análise mais extrema, retirando todas as estruturas internas da tesoura, restando apenas os banzos e o montante central. Essa configuração alterou o comportamento da estrutura, que deixou de se comportar como uma treliça ideal. Os critérios de deslocamentos foram atendidos para essa estrutura, contudo, o aumento do comprimento de flambagem dos banzos e a inclusão de momentos fletores e forças cortantes na estrutura à comprometeu quanto aos critérios de segurança e estabilidade. Quanto ao número de ligações, houve uma redução de 6 para 5 parafusos, provocada pela diminuição dos esforços solicitantes.

6. CONCLUSÃO

Este estudo teve como finalidade analisar, por meio de simulações computacionais e dimensionamentos estruturais, o desempenho de diferentes configurações de treliças de madeira utilizadas na cobertura de uma edificação.

Os resultados indicaram que a configuração original da estrutura oferece o melhor equilíbrio entre segurança, estabilidade e deslocamento. A redução da altura da treliça demonstrou ser uma alternativa possível, embora exija reforços adicionais nas ligações. A remoção parcial de elementos internos também se mostrou viável, desde que acompanhada de ajustes específicos no projeto, a fim de garantir o desempenho estrutural adequado.

Por outro lado, a remoção total dos elementos internos da treliça revelou-se tecnicamente inviável, uma vez que não atende aos critérios de segurança, estabilidade e deslocamentos

estabelecidos pela ABNT NBR 7190-1:2022, principalmente no que tange à estabilidade dos banzos submetidos à flexocompressão e flexotração.

Dessa forma, ressalta-se a relevância da utilização de ferramentas computacionais associada à observância das normas técnicas, permitindo a avaliação criteriosa de diferentes soluções estruturais antes de sua aplicação prática.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1** – Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2022, 81p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120** – Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2019, 61p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123** – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. 95p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681** – Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 22p.
- GESUALDO, F. A. R. **Estruturas de madeira**: notas de aula. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia, 2003. 93 p.
- PINHEIRO, R. V.; MOLINA, J. C.; LAHR, F. A. R. Estrutura treliçada de madeira tipo “Howe” para cobertura – exemplo. In: CALIL JUNIOR, C.; MOLINA, J. C. (Ed.). **Coberturas em estruturas de madeira**: exemplos de cálculo. São Paulo: PINI, 2010. p. 37–100.
- ALVA, G. M. S. **COBERTURA EM ESTRUTURA DE MADEIRA – Exemplo de Cálculo**. [Notas de aula]. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. 33p.
- FUZARO, O. A. I. **Análise estrutural de treliça**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, 2019.
- MEDEIROS, R. C. de. **Forças em peças de contraventamento de treliças de madeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- MORAES, M. H. M. *et al.* **Análise comparativa do desempenho mecânico de tipologias estruturais de treliças de madeira aplicando inteligência computacional**. Revista Árvore, Viçosa, v. 46, e254000, 2022.
- CORDEIRO JÚNIOR, C. R.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. T. M. L. **Uso da madeira na construção civil**. *Projectus*, v. 2, n. 4, 2017.
- SANTOS, J. O. X.; FERNANDES, S. C.; FREITAS, H. S.; BARROS, R. P.; BARROS, L. M. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de quatro espécies de madeira amazônica**

para uso na construção civil. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 12, p. e44891211379, 2020.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. **Utilização da madeira em construções rurais.** Piracicaba: IPEF, 2005.

CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. **Influência dos modelos idealizados de ligações no comportamento de treliças de cobertura em madeira.** *Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia*, v. 8, n. 18, p. 1-14, 2007.

SOUSA, J. A. F. **Desenvolvimento de um software de apoio ao estudo de treliças em pontes e telhados.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BENZOR ENGENHARIA. **VisualVentos: cálculo da ação do vento conforme NBR 6123:1988** [recurso eletrônico]. Passo Fundo: Benzor Engenharia, 2023.

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/>.